



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

FRANCISCO GILCIVAN MOREIRA SILVA

**MINERALOGIA DO SAPROLITO E MANEJO DE ÁREAS NO NÚCLEO DE
DESERTIFICAÇÃO DE IRAUÇUBA, CEARÁ: RELAÇÕES COM A PEDOGÊNESE
DE PLANOSSOLOS**

FORTALEZA

2026

FRANCISCO GILCIVAN MOREIRA SILVA

MINERALOGIA DO SAPROLITO E MANEJO DE ÁREAS NO NÚCLEO DE
DESERTIFICAÇÃO DE IRAUÇUBA, CEARÁ: RELAÇÕES COM A PEDOGÊNESE DE
PLANOSSOLOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Ciência do solo. Área de concentração: Pedologia.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero.

Coorientador: Prof. Dr. Jean Cheyson Barros.

FORTALEZA

2026

FRANCISCO GILCIVAN MOREIRA SILVA

MINERALOGIA DO SAPROLITO E MANEJO DE ÁREAS NO NÚCLEO DE
DESERTIFICAÇÃO DE IRAUÇUBA, CEARÁ: RELAÇÕES COM A PEDOGÊNESE DE
PLANOSSOLOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Ciência do solo. Área de concentração: Pedologia.

Aprovada em: 28/08/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jean Cheyson Barros (Coorientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Diana Ferreira de Freitas
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raul Shiso Toma
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Ivan e Anailce, esposa, Régia,
meus filhos Giulia e Ivo, e minha irmã, Gisele.

AGRADECIMENTOS

À Instituição Universidade Federal do Ceará, pelo apoio estrutural e de corpo técnico. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao INCT em Agricultura Sustentável no Semiárido Tropical-INCTAGriS (CNPq/Funcap/Capes).

Ao Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero, pela excelente orientação, e por sempre estar presente quando precisei, me ajudando a ser um bom profissional e, principalmente, um homem íntegro e do bem.

Aos professores participantes da banca examinadora Jean Cheyson, Raul Shiso, Diana Ferreira e Jaedson Cláudio pelo tempo investido, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A minha amiga da turma de doutorado Thaís Martins, pela ajuda de sempre, e por compartilhar momentos decisivos em nossas vidas.

Aos meus amigos que encontrei no decorrer desta trajetória Mateus Guimarães e Luan, que sempre estiveram do meu lado, ajudando em várias etapas de meu trabalho.

Sertão depois da
tormenta – Sobre o solo, que as amarílis
atapetam, ressurgue triunfalmente a flora
tropical. É uma mutação de apoteose.
(EUCLIDES DA CUNHA, 1954, p. 49).

RESUMO

A segurança alimentar de populações vulneráveis em regiões áridas e semiáridas de países subdesenvolvidos na Ásia, África e América do Sul é limitada pelas características climáticas, ambientais e socioeconômicas dessas regiões. Um exemplo desse cenário pode ser observado na mais povoada região semiárida subdesenvolvida do mundo, localizada no Nordeste do Brasil, a qual enfrenta sérios problemas na produção agrícola, devido ao processo de desertificação em alguns locais. No entanto, práticas de restauração (por exemplo, pousio) são promissoras para conter a desertificação e, eventualmente, aumentar o funcionamento do solo. Porém, a compreensão do efeito do pousio, a gênese e a mineralogia de solos sob desertificação ainda permanecem mal compreendidas. Portanto, neste trabalho foi integrada a pedologia e o manejo com objetivo de ampliar o conhecimento sobre a gênese de Planossolos originários de gnaisses situados em área desertificada no clima semiárido, além de verificar o efeito do pousio na evolução intempérica do perfil de solo em relação a uma área de mata e outra sobrepastejada. O experimento foi conduzido no núcleo de desertificação no município de Irauçuba, região semiárida brasileira, onde foi realizada descrição morfológica dos perfis de solo e coletadas amostras indeformadas e deformadas de solo e saprólito, em três perfis, um situado em uma área sob prática de pousio há 20 anos, outro em uma área sobrepastejada e o último em uma área de mata. Em seguida foram realizadas análises químicas e físicas, além de análise mineralógica e micromorfológica para fins de classificação e determinação da gênese e evolução intempérica do solo. Os resultados indicaram que a pedogênese foi alterada por influência do manejo, pois o pousio promoveu alterações consideráveis nos horizontes superficiais, com aumento da matéria orgânica e melhoria da estrutura do solo. A análise mineralógica evidenciou a predominância de aluminossilicatos secundários (esmectíticos e caulíníticos) e a presença de minerais primários intemperáveis. A micromorfologia revelou a presença de biotita e feldspatos em processo de decomposição, e a indicação da importância da argilação no processo pedogenético dos horizontes Bt. Contudo, o tipo de manejo não influenciou significativamente as taxas de intemperismo. Portanto, é possível concluir que o processo pedogenético predominante é o de argilação no Bt, com vários minerais de biotita e feldspatos se desintegrando, apesar de ser observada leve deposição de argila nas partículas do horizonte Bt de todas as áreas. Com a utilização de índices de intemperismo verificou-se que o manejo não influencia significativamente nas taxas de intemperismo das áreas.

Palavras-chave: Degradação; intemperismo; geoquímica; micromorfologia.

ABSTRACT

Food security for vulnerable populations in arid and semi-arid regions of underdeveloped countries in Asia, Africa, and South America is limited by the climatic, environmental, and socioeconomic characteristics of these regions. An example can be seen in the most populated underdeveloped semi-arid region in the world, Northeast Brazil, which faces serious problems in agricultural production due to desertification in some areas. However, restoration practices (e.g., fallowing) are promising for containing desertification and potentially increasing soil function. However, the understanding of the effect of fallowing, the genesis, and the mineralogy of soils under desertification remains poorly understood. Therefore, this work integrated pedology and management with the aim of expanding knowledge about the genesis of Planosols originating from gneiss located in a desertified area in a semi-arid climate, as well as verifying the effect of fallowing on the weathering evolution of the soil profile in relation to a forested area and an overgrazed area. The experiment was conducted in the desertification nucleus in the municipality of Irauçuba, a semi-arid region of Brazil, where a morphological description of the soil profiles was carried out and undisturbed and disturbed soil and saprolite samples were collected from three profiles: one located in an area under fallow practice for 20 years, another in an overgrazed area, and the last in a forested area. Subsequently, chemical and physical analyses were performed, in addition to mineralogical and micromorphological analyses for classification and determination of the genesis and weathering evolution of the soil. The results indicated that pedogenesis was altered by the influence of management, as fallow promoted considerable changes in the surface horizons, with an increase in organic matter and improvement in soil structure. The mineralogical analysis showed the predominance of secondary aluminosilicates (smectite and kaolinitic) and the presence of weatherable primary minerals. Micromorphology revealed the presence of biotite and feldspars undergoing decomposition, indicating the importance of clay deposits in the pedogenetic process of the Bt horizons. However, the type of management did not significantly influence weathering rates. Therefore, it is possible to conclude that the predominant pedogenetic process is clay deposits in the Bt horizon, with several biotite and feldspar minerals disintegrating, although slight clay deposition was observed in the particles of the Bt horizon in all areas. Using weathering indices, it was found that management does not significantly influence the weathering rates of the areas.

Keywords: Degraded; weathering; geochemical; micromorphology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Localização do município de Irauçuba, Ceará	26
Figura 2	– Imagem de satélite com indicação das áreas experimentais e fotos dos perfis de solo	27
Figura 3	– Fotografia mostrando contraste da área em pousio e sobrepastejo, na estação seca, no município de Irauçuba, Ceará	28
Figura 4	– Fotografia mostrando estrutura laminar de uma camada compactada na superfície do solo	35
Figura 5	– Análise de componentes principais (PCA) dos atributos químicos, com a combinação contendo maiores interações, sendo a cor vermelha representando as variáveis observadas e em azul os tratamentos	42
Figura 6	– Difratogramas de raios X da fração argila tratada com peróxido de hidrogênio e ditionito citrato bicarbonato, do horizonte Bt da área de mata com picos aluminossilicatos sódio magnesianos	50
Figura 7	– Difratogramas de raios X da fração argila tratada com peróxido de hidrogênio e ditionito citrato bicarbonato, do horizonte Bt da área de mata com picos aluminossilicatos de ferro	50
Figura 8	– Fotomicrografias (10x) do horizonte Ap das áreas de mata (1) e pousio (2) e AE do sobrepastejo (3); os horizontes Bt das áreas de mata (4), pousio (5) e sobrepastejo (6); os horizontes Cr das áreas de mata (7), pousio (8) e sobrepastejo (9); deposição difusa de argila nas partículas no horizonte Bt da área de mata (10); grão de quartzo com deposição de argila no horizonte Bt do sobrepastejo (11); plagioclásio se desintegrando no horizonte Cr da área de pousio; conjunto de biotita sendo intemperizada no horizonte Cr da área de mata. NF = Nódulo de alteração; ANF = Anfibólio; BT = Biotita; PL = Plagioclásio	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição dos solos no município de Irauçuba	28
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos morfológicos de Planossolos em áreas sob processo de desertificação no município de Irauçuba-CE	34
Tabela 2 – Atributos físicos de Planossolos em áreas sob processo de desertificação no município de Irauçuba-CE	37
Tabela 3 – Atributos químicos de Planossolos em áreas sob processo de desertificação no município de Irauçuba-CE	41
Tabela 4 – Teores dos elementos das extrações seletivas e índices geoquímicos das áreas de mata, pousio e sobrepastejo	46
Tabela 5 – Atributos micromorfológicos das áreas de mata, pousio e sobrepastejo	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
ONU	Organização das Nações Unidas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	HIPÓTESE	16
3	OBJETIVOS	17
3.1	Objetivo geral	17
3.2	Objetivos específicos	17
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
4.1	Degradação de solos e desertificação	18
4.2	Evolução geoquímica, índices de intemperismo e efeitos do uso no solo	19
4.3	Característica de Planossolos e sua gênese	22
4.4	Mineralogia de Planossolos	24
5	MATERIAL E MÉTODOS	26
5.1	Local e caracterização da área de estudo	26
5.2	Seleção de perfis e amostragem para análises	29
5.3	Análises físicas	29
5.4	Análises químicas	30
5.4.1	<i>Extrações seletivas</i>	30
5.5	Análise mineralógica	31
5.6	Análise micromorfológica	31
5.6.1	<i>Impregnação das amostras</i>	31
5.6.2	<i>Descrição das lâminas</i>	31
5.7	Análise estatística dos dados	32
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
6.1	Atributos morfológicos	33
6.2	Atributos físicos	36
6.3	Atributos químicos	34
6.3.1	<i>Índices de intemperismo</i>	45
6.4	Atributos mineralógicos	47
6.5	Atributos micromorfológicos	50
7	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DO PERFIL 1	70

APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DO PERFIL 2	72
APÊNDICE C – DESCRIÇÃO DO PERFIL 3	74

1 INTRODUÇÃO

A degradação do solo está relacionada à redução ou perda da biodiversidade e da habilidade de produzir de forma sustentável numa área. Documentos da Organização das Nações Unidas (ONU) para a Alimentação e Agricultura (FAO), relatam que um terço dos solos do mundo são afetados pela degradação e, dentre as causas, a maior ameaça é a erosão, seguidos por poluição do solo, uso excessivo de agroquímicos, salinização e compactação. Ressalta-se também que os sistemas agrícolas são formados pela interação entre solo e água, e que estão em ponto de rutura, se não houver alguma intervenção (FAO, 2022, Roma).

Em algumas áreas o processo de degradação é mais intensificado, ocasionando um fenômeno chamado desertificação, o qual é um processo dinâmico de degradação, com interações restritas entre variações climáticas e ações antrópicas que, com a ausência de intervenções de recuperação poderá se tornar irreversível. Portanto, a desertificação afeta diversas regiões no mundo, concentradas nas áreas com índice de aridez (razão entre precipitação e evapotranspiração) entre 0,05 e 0,6, valores estes que abrangem zonas de climas, árido, semiárido e subúmido seco, de acordo com a classificação de United Nations Environment Programme (UNEP).

No Brasil, as áreas suscetíveis à desertificação estão presentes em diversas regiões, atingindo parte dos Estados de Alagoas, da Bahia, do Espírito Santo, do Maranhão, de Minas Gerais, da Paraíba, de Pernambuco, do Piauí, do Rio Grande do Norte e de Sergipe, além do Estado do Ceará (Montenegro, 2023). A maioria desses estados pertence à região Nordeste, que possui grandes extensões de área com um bioma exclusivamente brasileiro chamado caatinga, conhecido por ocorrer em condições de baixa pluviosidade e altas taxas de evapotranspiração, típicas de clima semiárido e árido. Tais condições aliadas ao uso inadequado das terras promovem a degradação de áreas que, em casos severos, as tornam improdutivas e, por vezes, acarretam desertificação.

A desertificação na região semiárida brasileira é resultado, além das condições climáticas e do tipo de uso da terra, da incidência de solos pouco desenvolvidos que geralmente predominam nestes ambientes, pois, apesar de alguns desses solos apresentarem horizonte B, os fatores de formação ativos não são intensos e, associado a isto, o material de origem geralmente é mais resistente ao intemperismo. Nessas áreas, os Planossolos, Neossolos Litólicos e Luvisolos se destacam como as principais classes de solo, as quais apresentam distribuições distintas na paisagem.

Neste contexto, os Planossolos se destacam por apresentar significativa importância econômica nas regiões semiáridas do Brasil, tanto pela área ocupada de aproximadamente 78.500 km², equivalente a 10,5% da região semiárida, quanto pela sua intensa exploração (Melo Filho; Souza, 2006). Esses solos, apesar de conterem boa fertilidade natural, podem apresentar limitações por excesso de sódio, e apresentam restrições físicas devido ao seu horizonte B plânico adensado, favorecendo a erosão. E, embora os Planossolos dessas áreas não possuam boa capacidade de suporte, a pecuária extensiva, em condições de sobrepastejo, se destaca como a principal atividade agropecuária, o que agrava ainda mais as condições de desertificação.

Ao estudar solos sabe-se que todos os fatores de formação são atuantes, mas, no caso dos Planossolos o relevo e o material de origem podem ser marcantes na sua gênese, sendo que o uso também pode influenciar os seus atributos. E, por este motivo, estudos voltados à gênese dos Planossolos favorecem o melhor entendimento sobre os processos pedogenéticos envolvidos e a influência do tipo de uso na pedogênese, além de fornecer subsídios para promoção de estratégias de ocupação e uso de Planossolos em regiões secas afetadas pela desertificação.

A classe dos Planossolos é caracterizada pela ocorrência de um horizonte B plânico, no qual pode envolver processos distintos na sua gênese, dependendo dos fatores de formação. Dentre esses processos estão inclusos a argilação (formação “in situ” — por neoformação ou por transformação); destruição de argilas dos horizontes subjacentes; perda de argila nos horizontes superficiais e ganho de argila nos horizontes de subsuperfície (argiluviação), remoção preferencial de argilas dos horizontes superficiais, porém, estudos indicam que a descontinuidade litológica é o processo de ocorrência mais provável nestes solos.

O objetivo deste estudo é investigar a gênese e a evolução de Planossolos derivados de rochas gnáissicas em uma área desertificada do semiárido, com foco no Núcleo de Desertificação de Irauçuba. Através da caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de perfis de solo em áreas sob pousio, sobrepastejo e mata nativa, busca-se avaliar o efeito do manejo na evolução intempérica do perfil. Este estudo contribui para o entendimento dos processos pedogenéticos em ambientes áridos e semiáridos, fornecendo subsídios para o manejo sustentável desses solos.

2 HIPÓTESE

Planossolos derivados de rochas gnáissicas em uma área desertificada sob clima semiárido apresentam dominância do processo de argilação durante a gênese do horizonte B, preservação de minerais remanescentes do saprolito e distintas evoluções intempéricas devido à existência de diferentes manejos.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Aprofundar o conhecimento sobre os processos de formação e evolução de Planossolos desenvolvidos sobre saprólitos de gnaiss em áreas semiáridas sob processo de desertificação. Além disso, busca-se avaliar a influência de diferentes usos da terra (pousio, sobrepastoreio e mata nativa) nos processos de intemperismo e na dinâmica dos constituintes minerais e orgânicos do perfil, com o intuito de compreender os impactos da degradação ambiental na qualidade desses solos.

3.2 Objetivos específicos

Realizar caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica dos perfis de Planossolos;

Utilizar índices de intemperismo para determinar o grau de desenvolvimento dos solos nas condições de sobrepastejo, pousio e mata;

Verificar os principais processos pedogenéticos atuantes na gênese do horizonte B textural dos Planossolos em uma área do Núcleo de Desertificação.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Degradação de solos e desertificação

A degradação do solo diz respeito a toda modificação que culmine em sua destruição. E este fenômeno é causado, principalmente, devido ao acelerado desenvolvimento socioeconômico, no qual, em muitos casos, é irreversível e acarreta riscos ecológicos a curto e longo prazo (Boulila *et al.*, 2021). E a causa mais comum é o uso intensivo da vegetação natural com pasto, no qual leva à deterioração da comunidade de plantas, reduzindo o banco de sementes do solo (Miao *et al.*, 2016), diversidade de espécies taxonômicas e funcionais (Chillo *et al.*, 2017), e qualidade estrutural do solo. O processo de degradação do solo pode ser acelerado pela combinação dos impactos das atividades antrópicas a longo prazo e condições climáticas, podendo resultar na desertificação (Li *et al.*, 2018) que, embora sua definição precisa seja um desafio, é considerada um problema socioambiental significativo, com prejuízo direto no desenvolvimento ambiental sustentável (Assefa; Hans-Rudolf, 2016). Contudo, as causas da degradação e desertificação das áreas são bem debatidas, porém, o maior obstáculo é a detecção da desertificação e degradação em larga escala, pois os custos elevados são limitantes (Bardgett *et al.*, 2021).

O processo de degradação do solo afeta grandes extensões de área espalhadas pelo mundo. Pois, de acordo com dados da ONU, cerca de 2 bilhões de hectares de terra estavam sob algum tipo de degradação, afetando 3,2 bilhões de pessoas que habitam nesses lugares (ONU News, 2019). Já a desertificação ocorre geralmente nas áreas chamadas de terras secas ou *drylands*, nas quais estão associadas a ecossistemas áridos, semiáridos e sub-úmidos secos, onde ocupam uma área aproximada de 41% da superfície terrestre, das quais 10–20% estão degradadas, afligindo direta ou indiretamente aproximadamente 250 milhões de pessoas no mundo (Huang *et al.*, 2020).

As *drylands* no Brasil são conhecidas como Áreas Suscetíveis à Desertificação (ASD) e são resultados da intensa exploração dos recursos naturais e do uso inadequado das terras sem considerar suas potencialidades e limitações. Ademais, a essa realidade somam-se os impactos da variabilidade e de mudanças climáticas (CGEE, 2016). Neste contexto o bioma caatinga é um dos mais afetados, pois apresenta condições favoráveis para a ocorrência deste fenômeno. Apesar deste problema ser relatado até em florestas no continente asiático, floresta onde o clima é predominantemente tropical e subtropical (Wu *et al.*, 2022; Guo *et al.*, 2021)

No Ceará, a área susceptível ao processo de desertificação (ASD) atinge cerca de 19,06% de seu território, segundo um estudo da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) em 2016, que corresponde a 28.919,56 km², afetando principalmente o núcleo de Irauçuba/Centro Norte, que tem mais de 8% do total, os Inhamuns, que possui 5,57%, e o Núcleo Médio Jaguaribe, com 5,3% da área contabilizada. Destacando-se Irauçuba por ser a região mais afetada em relação às demais, devido não apenas à ação antrópica e climática, mas também à classe dos Planossolos que recobre extensas áreas da região (Lima *et al.*, 2024) e por ser referência de diversos estudos, apresentando experiências que podem ser utilizadas como modelo para outras localidades do país, inclusive de outras ASD.

Em Irauçuba uma das principais causas antrópicas da desertificação é o sobrepastejo decorrente da pecuária extensiva, a qual é a atividade econômica mais importante na região (IPECE, 2017). Portanto, as ações combinadas de condições áridas com a pressão causada pelo superpastejo contribuem para diminuição do potencial produtivo dos solos, bem como da funcionalidade do sistema (Gaitan *et al.*, 2017). Com isso o risco de desertificação nas terras secas é acelerado (Lima *et al.*, 2024).

Para ser tomada alguma decisão de recuperação essas áreas precisam ser identificadas, e foi nesse contexto que, na tentativa de formular indicadores comuns a serem usados para mensurar processos de desertificação, está sendo implementado no continente sul-americano o Programa de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca, elaborando uma base sólida para a identificação de zonas áridas degradadas e secas na Argentina, no Brasil, na Bolívia, no Chile, no Equador e no Peru, segundo as diretrizes da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação (Araújo; Souza, 2017).

4.2 Evolução geoquímica, efeitos do uso na evolução do solo e índices de intemperismo

Ao longo do tempo o solo sofre intemperismo químico, físico e biológico formando os horizontes, decorrentes de processos pedogenéticos atuantes no perfil (Schaetzl; Anderson, 2005). E muitos estudos estão sendo realizados no intuito de elucidar os processos químicos e mineralógicos envolvidos na formação dos solos (Dosseto *et al.*, 2022; Tiomo *et al.*, 2021). Esses processos podem sofrer interferência dos tipos de uso da terra, e a investigação de alguns atributos é importante em solos agrícolas, particularmente dentro do contexto práticas agrícolas envolvidas (Rab *et al.*, 2014 ; Zhang *et al.*, 2015).

Ao estudar os processos envolvidos na evolução do solo, ressalta-se a geoquímica,

que é um ramo da Ciência Geológica, na qual compartimentou a realidade desde o cosmo até os solos, passando pelas rochas (Rohde, 2004). E o foco da geoquímica é a composição química da água, do solo, ou da solução do solo em relação à crosta terrestre, podendo ser utilizada na caracterização dos tipos de solo, na determinação dos processos do solo, ecológicos ou questões relacionadas à qualidade e saúde do solo (Van Der Jagt, 2018).

A composição geoquímica dos solos de regiões áridas é diretamente influenciada pelos materiais de origem (Tazikeh *et al.*, 2018). Pois as rochas têm efeitos importantes nos processos pedogênicos e nas vias de evolução do solo (Yousefifard *et al.*, 2015). Neste contexto, Pasquini *et al.* (2017), estudando geoquímica de solos no semiárido localizados na Argentina central, concluiu que a assinatura geoquímica, ou os componentes geoquímicos do material original foram preservados nos solos devido à fraca intensidade de intemperismo. Portanto, a composição química do solo é afetada diretamente pela combinação da litologia original e fatores ambientais locais (Dosseto *et al.*, 2022; Ludden *et al.*, 2015), além de sofrer variações devido a fatores antropogênicos (Nazarpour *et al.*, 2015; Câmara *et al.*, 2021).

No contexto do efeito de fatores antropogênicos influenciando nas variações químicas do solo ao longo de sua evolução, um estudo realizado por Fachin *et al.* (2020) no estado do Paraná, localizado na região Sul do Brasil, mostrou mudanças químicas significativas na profundidade de 0-5 cm devido ao manejo realizado. O autor concluiu que sucessivos ciclos de corte e queima utilizados nesse manejo promoveram o aumento do pH e redução da capacidade de troca catiônica do solo.

Outro trabalho mostrando a influência do uso da terra nos atributos do solo foi realizado por Alekseev *et al.* (2018). Neste estudo o autor avaliou mudanças geoquímicas e mineralógicas do solo em resposta ao uso da terra com pastagem em terras agrícolas de Moscou, na Rússia. Como conclusão observou-se a transformação de montmorilonita em vermiculita na parte superior do perfil da área pastejada em relação à área de mata, havendo também variação nas propriedades geoquímicas e mineralógicas do solo, devido a redistribuição de elementos químicos entre as diferentes subfrações de silte e argila estar relacionada ao uso da terra.

Em se tratando de transformações de argila é necessário estudar o processo de formação dos solos, também conhecido como pedogênese. Segundo Ahr *et al.* (2013), determinar o período da pedogênese é muito difícil em qualquer local devido a inúmeros processos ambientais que podem redefinir o tempo de início da formação do solo. Portanto, para fazer interpretações pedogenéticas é necessário considerar o grau de evolução e não o tempo cronológico, e essas interpretações são realizadas por meio de alguns parâmetros,

atributos relacionados ao solo.

A evolução dos solos pode ser deduzida a partir de análises no horizonte de maior expressão pedogenética, se houver. Este horizonte nos Planossolos é o B plânico que deve ocorrer abaixo de qualquer tipo de horizonte A, podendo ou não apresentar horizonte E. Geralmente este horizonte plânico apresenta-se adensado, devido ao grande acúmulo de argila (EMBRAPA, 2018).

A gênese do horizonte B plânico é diretamente dependente das condições de intensidade de intemperismo e das características do material de origem (Parahyba *et al.*, 2009). O predomínio de solos com esse horizonte no Brasil, apesar de ocorrer em todas as regiões, é na região semiárida do Nordeste, onde as chuvas são reduzidas, o que limita a pedogênese e favorece a formação de solos com atributos fortemente dependentes do material de origem (Santos *et al.*, 2017).

Ao ocorrer o intemperismo do material de origem dos Planossolos há uma atuação do processo de hidrólise, no qual resulta em argilominerais, como esmectita e caulinita, (Ameijeiras-Mariño *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2018). Portanto, a proporção desses minerais argilosos pode denotar o grau de intemperismo e de evolução dos solos, como mostra o trabalho de Silva *et al.* (2019), ao avaliarem o grau de intemperismo de um Planossolo com base nas proporções de minerais da fração argila do horizonte Bt. Porém, alguns outros parâmetros podem ser utilizados para determinar o grau de evolução de um solo, como os índices Ki e Kr utilizados por Sacramento *et al.* (2019) para avaliar a intensidade do intemperismo de um Planossolo, embora esses índices serem mais indicados para solos mais intemperizados.

Os índices geoquímicos em geral, são ferramentas eficientes na determinação do grau de intemperismo do solo, por possuírem métodos quantitativos de avaliação (Heidari; Osat; Konyushkova, 2022). E um dos mais indicado para avaliar grau de evolução de solos menos intemperizados é o índice de alteração química, pois este índice expresso como CIA (molar) é mais sensível ao grau de intemperismo químico. O CIA (molar) possui valor 1 para feldspatos e rochas ígneas não alteradas quimicamente, mas aumenta para o infinito à medida que o intemperismo químico progride (Goldberg; Humayun, 2010) .

Em alguns casos os índices de intemperismo são utilizados para o desenvolvimento de outros índices, como fez Koop *et al.*, (2020) que desenvolveram índices de desenvolvimento de horizontes e de perfis de solo partir de um índice de intemperismo químico, que foi o índice químico de alteração. Esses índices contribuíram para a compreensão dos processos pedogenéticos envolvidos nas classes e condições dos solos

estudados, tanto na superfície como na subsuperfície do solo.

4.3 Característica de Planossolo e sua gênese

Os planossolos são caracterizados por apresentarem horizontes superficiais arenosos com acentuado acúmulo de argila nos horizontes de subsuperfície (FAO, 2014). Esses solos possuem adensamento natural no horizonte subsuperficial (B) devido às suas propriedades pedogenéticas e, por esse motivo, práticas como a de subsolagem não é o suficiente para desfazer esse horizonte adensado. Outra limitação para o uso desses solos está na natureza física do horizonte subsuperficial que, além de ser adensado, é bastante duro, quando seco, impedindo a penetração das raízes e da água, geralmente acumulando água na superfície, facilitando o acúmulo de sais de acordo com a Base de Referência Mundial para Recursos do Solo (IUSS Working Group WRB, 2022).

Essa classe de solo ocorre predominantemente em áreas baixas e de relevo plano ou suave ondulado onde o ambiente favorece um acúmulo de água em determinado período de tempo durante o ano, apresentando ciclos prolongados de inundação e secagem (Schaetzl; Thompson, 2015). Outro fator que contribui para o acúmulo de água é a presença da camada de impedimento causada pela mudança textural abrupta do horizonte superficial arenoso para o horizonte B plânico adensado. A gênese da mudança textural abrupta, a qual é um atributo diagnóstico para Planossolos, advem de alguns processos pedogenéticos comuns nessas áreas (Van Oort *et. al.*, 2017).

Segundo Lepsch (2011), a drenagem restrita nessa classe de solo em combinação com o intemperismo de minerais contendo sódio promovem altos níveis desse elemento no solo. Podendo os Planossolos serem classificados em seu segundo nível categórico como Nátricos, com alto teor de sódio trocável (Na^+), ou Háplicos com baixo teor de sódio (EMBRAPA, 2018). Portanto, Planossolos imprimem características contidas no material de origem, como relatado por Silva *et al.* (2019), que observaram altos teores de Na^+ em um Planossolo derivado de saprólito rico em feldspato calco-sódicos (plagioclásio) e feldspato alcalino.

No Brasil a maior ocorrência de Planossolos é na região Nordeste onde esta classe de solo ocupa aproximadamente 10,5% dos solos da região (Jarbas *et al.*, 2024), apesar de também serem encontrados em regiões de clima mais úmido (Silva *et. al.*, 2019). Entretanto, independente a condição climática, sabe-se que para apresentar o horizonte B plânico, que é diagnóstico para Planossolos, é preciso haver uma desargilização de horizontes superficiais e

concentração de argila em subsuperfície (Santos *et al.*, 2018). Devido às diferentes condições das áreas de ocorrência desses solos, os processos pedogenéticos envolvidos são difíceis de serem determinados, pois o solo apresenta grande probabilidade de sofrer mais de um processo de formação importante (Silva *et al.*, 2019).

Essa maior concentração de argila no horizonte plânico, em relação aos horizontes superficiais, pode estar relacionada aos processos que promovem o enriquecimento no horizonte B, tais como, iluviação, formação “*in situ*” ou neoformação, como citados por Câmara *et al.* (2021). Por outro lado, Santos *et al.* (2018) também indicam que esse gradiente textural pode ser por empobrecimento em argila nos horizontes superficiais, por destruição ou remoção vertical e, ou, lateral de argila.

Ademais, a causa da mudança textural entre horizontes no perfil dos solos em geral pode ser por processos não pedogênicos, como: a) deposição coluvial / aluvial / fluvial em lagos / marinha de sedimentos de diferentes origens, causando descontinuidades litológicas; ou por outros processos pedogenéticos, como: b) erosão diferenciada da argila em horizontes superficiais, por fluxo lateral ou por atividades agrícolas; c) atividade da biota do solo, criando canais e poros que favorecem o movimento vertical da água carreando partículas em suspensão (Kämpf; Curi, 2012).

Segundo Schaeztl e Thompson (2015), em Planossolos ácidos encontrados em regiões de precipitação pluvial elevada, a formação de gradiente textural está possivelmente relacionada com a dispersão das argilas causada pelo elevado número de cátions H^+ ocupando os sítios de troca de solo. E posteriormente essas partículas dispersas são carregadas e depositadas em horizontes subsuperficiais, já que as argilas são mais suscetíveis à eluviação devido ao seu menor tamanho (Quénard *et al.*, 2011).

Para Silva *et al.* (2019), nas condições de clima úmido da região estudada, a pedogênese de Planossolos é principalmente devido ao processo de ferrólise, no qual está diretamente relacionada com altos teores de areia nos horizontes superficiais, juntamente com os processos de gleização e lessivagem. Por outro lado, Ranst *et al.* (2010), estudando Planossolos na Etiópia, concluíram que o processo de ferrólise seria improvável de atuar na formação desses solos, possivelmente devido às condições climáticas da área de estudo.

Inúmeros processos de formação do horizonte Bt foram citados para diferentes regiões e condições, inclusive o de elutriação, ainda pouco estudado, este contribui massivamente para a remoção do material fino dos horizontes superficiais promovendo a diferença textural expressiva. Segundo Câmara (2016), trabalhando com Planossolos da região semiárida do Brasil, apresentou a elutriação como um fator importante para a formação

do horizonte B plânico, apesar da formação de argila *in situ*, ou argilação, ter sido o principal processo atuante na formação.

Portanto, a gênese de Planossolos, semelhante a outras ordens, pode envolver diferentes processos que atuaram ao longo do tempo (Sousa *et al.*, 2023; Câmara *et al.*, 2021). Por esse motivo a pedogênese de muitos Planossolos ainda é desconhecida, apesar de sua importância ambiental e agrícola, principalmente na região Nordeste do Brasil.

4.4 Mineralogia de Planossolos

A mineralogia dos solos, de uma forma geral, é decorrente da atuação de um conjunto de processos e fatores de formação. Contudo, a cognição desses minerais é primordial na elucidação de questões existenciais do planeta, sendo importante também no conhecimento das funções do solo controladas pelos minerais (Rosin *et al.*, 2023). Portanto, as condições pedoambientais determinam quais processos e fatores atuaram, influenciando diretamente nos atributos mineralógicos do solo, e na ação do intemperismo (Tiomo, 2021). Contudo, a mineralogia do solo é de extrema importância em estudos de gênese, uma vez que, as populações mineralógicas encontradas na argila refletem características ambientais das regiões em que são formados (Montanari, *et al.* 2010).

Dentre os fatores de formação envolvidos na pedogênese o material de origem destaca-se por fornecer características suas ao solo que será formado, principalmente para a classe dos Planossolos que são pouco desenvolvidos, apesar de alguns perfis de solo derivados do mesmo material de origem e nas mesmas condições climáticas apresentarem atributos distintos (NEVES *et al.*, 2023). Este material de origem pode ser variado nos Planossolos, resultando em mineralogias distintas, que vai desde caulinítica até predominantemente esmectítica, embora todos apresentem baixos teores de óxidos de ferro livre, devido às condições de hidromorfismo temporário das regiões nas quais esses solos são formados (Oliveira, 2007).

A posição na paisagem é outro fator que interfere diretamente na mineralogia do solo, isto é evidenciado no trabalho de Sousa *et al.* (2020), no qual, estudando a mineralogia de um Planossolos na região Nordeste do Brasil observaram predominância de quartzo na fração areia, e na fração silte foram encontrados feldspato e quartzo em todos os perfis, já na fração argila alguns perfis apresentaram dominância mineralógica caulinítica, enquanto outros perfis continham maior quantidade de esmectita. Os autores explicam que tal diferenciação mineralógica na fração argila dos perfis é devido à posição na paisagem, visto que, o material

de origem, que é o granito, é comum para toda a área estudada, apesar que estudos indicam maior influência da mineralogia da rocha em relação a pequenas variações no relevo (Câmara *et al.*, 2021).

Contrastando ao que foi citado no parágrafo anterior, Silva *et al.* (2019) destacam uma descoberta importante, na qual a mineralogia não diferenciou em Planossolos formados a partir de diferentes materiais de origens na região sul do Brasil. Contendo na fração areia e silte abundância de quartzo, com pouca presença de feldspatos, já na fração argila o que predominou foi a caulinita, seguida por quartzo, feldspatos e algumas lepidocracitas. Os autores evidenciam que a mineralogia com feldspato e quartzo encontrados na fração argila são associados ao incipiente intemperismo, resultado inesperado nesse trabalho devido a forte atuação do processo de ferrólise, mas que pode ser explicado pela limitada remoção da sílica.

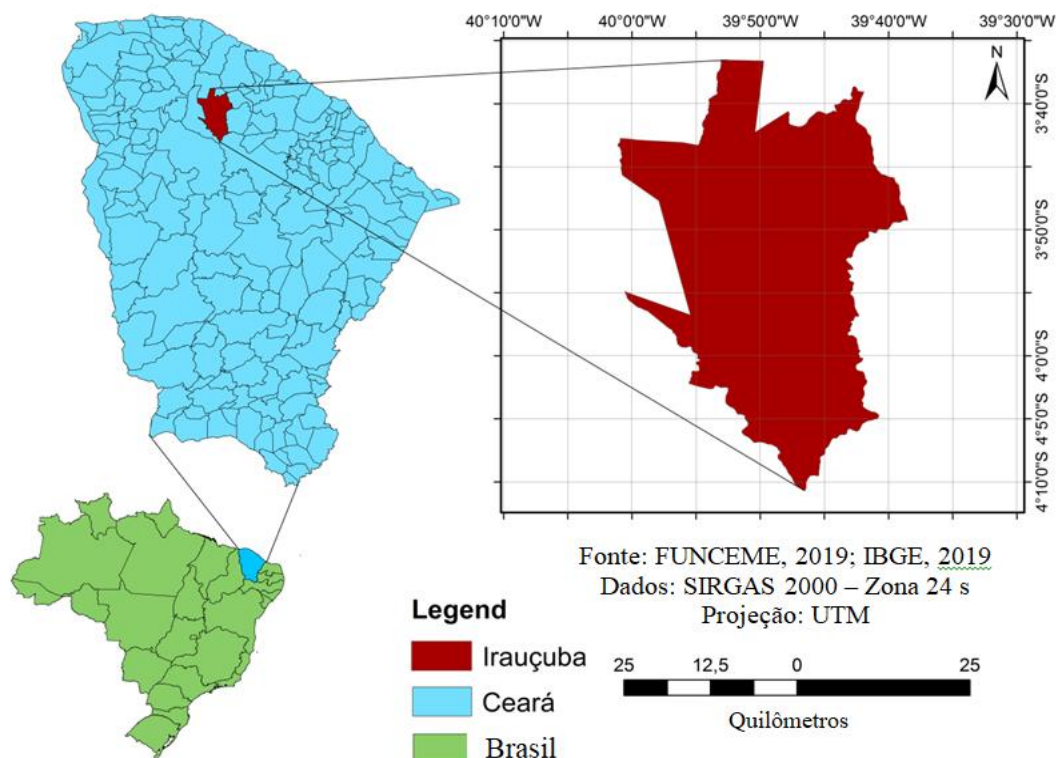
Contudo a grande variação dos atributos químicos e mineralógicos dos solos refletem os diferentes graus de intemperismo, além dos fatores e processos de formação do solo envolvidos (Silva *et al.*, 2021). E, por este motivo, vários estudos estão sendo realizados a respeito da mineralogia para verificar hipóteses relacionadas a gênese dos solos (Neves *et al.*, 2023; Bauwhede; Muys; Vancampenhout; Smolders, 2024; Silva *et al.*, 2021), havendo ainda uma vasta lacuna de conhecimento que precisa ser preenchida com a elaboração de novos estudos.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Local e caracterização da área de estudo

O trabalho foi conduzido na área experimental do projeto “Estudos dos processos de Degradação/Desertificação e suas relações com o uso da terra em Sistemas de Produção no Semiárido cearense: O caso da microrregião de Sobral –Ceará”, no município de Irauçuba - CE (Figura 1), o qual está inserido em um dos Núcleos de Desertificação do semiárido brasileiro, e se encontra a 146 km da capital Fortaleza-CE em linha reta (IPECE, 2014). Foram utilizadas três áreas da região (Figura 2), uma com um tempo de pousio de 20 anos, uma em área de mata secundária com mais de 50 anos sem utilização e outra em sobrepastejo historicamente há mais de 100 anos, com as respectivas coordenadas geográficas e altitude de 3°47' 23,62"S e 39°47' 51,86"W; altitude –164 m (pousio), 3°47'16,8"S 39°47'57,2"W; altitude – 164 m (mata) e 3°47'22,2"S e 39°47'54,6"W; altitude –164 m (sobrepastejo). O contraste entre a área de pousio e a sobrepastejada é possível ser verificado na figura 3, com a foto obtida no período seco no mês de outubro.

Figura 1 – Localização do município de Irauçuba, Ceará



Fonte: Autor

Figura 2 – Imagem de satélite com indicação das áreas experimentais e fotos dos perfis de solo

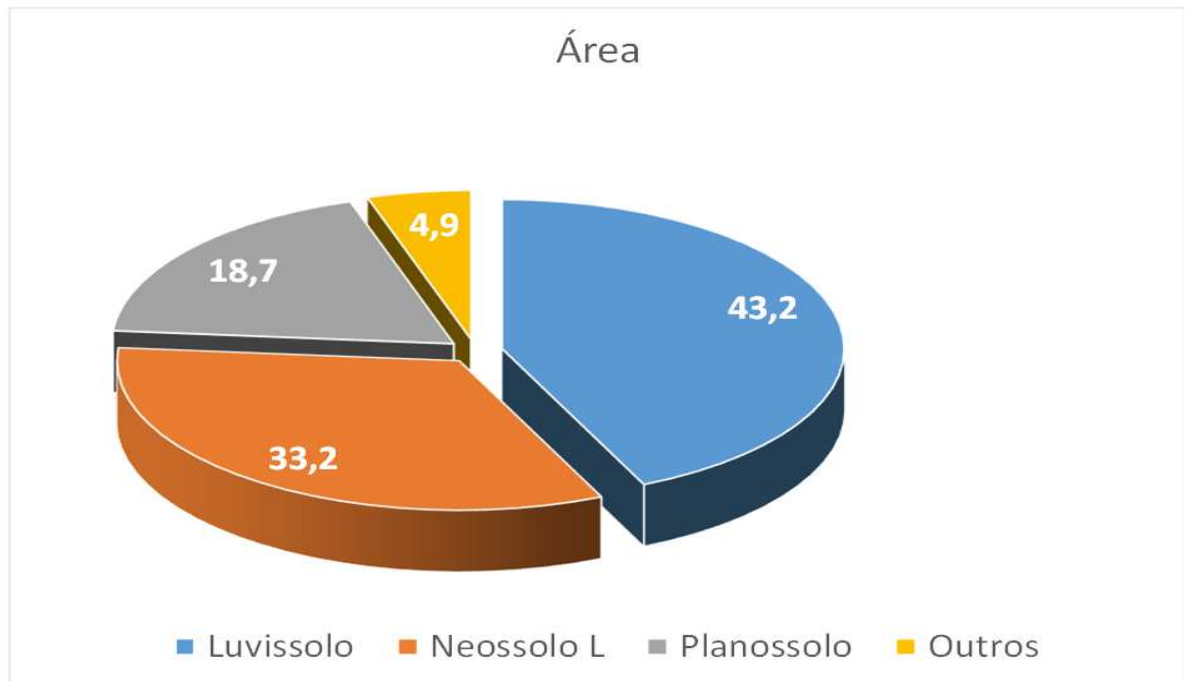


Fonte: Autor

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Bshw', equivalente a semiárido, megatérmico, com curta estação chuvosa no verão-outono, precipitações pluviiais concentradas nos meses de fevereiro a abril, com média anual de 539,5 mm e temperatura média entre 26° e 28°C (IPECE, 2014). Sendo uma das causas da deficiência de chuva no local o fato da área encontrar-se a sota-vento da serra de Uruburetama, constituindo-se em uma área de “sombra de chuva”.

As condições climáticas aliadas ao material de origem de gnaiss desta área favorecem a formação de solos pouco intemperizados com mais de 95% dos solos concentrando nas ordens de Luvisolos, Neossolos Litólicos e Planossolos (Gráfico 1) (Oliveira; Sales, 2015).

Gráfico 1 – Distribuição dos solos no município de Irauçuba



Fonte: Oliveira; Sales, 2015

Figura 3 – Fotografia mostrando contraste da área em pousio e sobrepastejo, na estação seca, no município de Irauçuba, Ceará



Fonte: Autor

Na região, os efeitos dos fatores físicos, como as condições edafoclimáticas e ação antrópica refletem na vegetação rala que predomina no local. Sales e Oliveira (2006) realizando um levantamento floral local, identificaram 112 espécies representando 35

famílias, além de forrageiras como a herbácea estilosa (*Stylosanthes humilis* Kunth) e de gramíneas do tipo milhã (*Brachiaria* sp., *Panicum* sp.).

A principal atividade agropecuária da região é a pecuária extensiva em condições de sobrepastejo, onde a capacidade de suporte da área não é respeitada, devido a escassez de conhecimento tecnológico sobre manejo agrícola, além disso, o desenvolvimento de culturas anuais como forma de subsistência também se apresenta como uma atividade danosa para o núcleo.

5.2 Seleção de perfis e amostragem para análises

Foram utilizados para o estudo três perfis de Planossolos, classificados pelo Sistema Brasileiro de Classificação do solo (EMBRAPA, 2018), um perfil na área que utiliza a prática de pousio, outro em uma área sobrepastejada, e outro em uma área de mata secundária. Os respectivos saprolitos foram descritos segundo método experimental em desenvolvimento pela SBCS e classificados pelo Subsolum Reference Groups (SRG) proposto por Juilleret *et al.* (2016). As coletas foram realizadas em todos os horizontes dos perfis, desde o horizonte de superfície até o saprolito, em maior profundidade possível.

Amostras deformadas e indeformadas foram coletadas para as análises laboratoriais. As amostras deformadas secas ao ar e tamisada em peneiras com abertura de malha de 2 mm, obtendo assim terra fina seca ao ar (TFSA) de acordo com o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017), com ausência da determinação de cascalho e calhaus.

5.3 Análises físicas

As análises físicas foram realizadas seguindo os procedimentos do Manual de Métodos de Análises de Solo (EMBRAPA, 2017). Os parâmetros analisados foram granulometria e argila dispersa em água (ADA) por tamização e pelo método da pipeta, densidade de partículas (Dp) pelo método do balão volumétrico, densidade do solo (Ds) pelo método da proveta. Com os resultados obtidos nessas análises foram calculados o grau de floculação ($GF = 100 \text{ (argila total - argila dispersa em água) / argila total}$), porosidade total ($P\% = (1 - Ds/Dp) \times 100$) e a relação silte/argila.

5.4 Análises químicas

As análises químicas foram realizadas de acordo com a metodologia descrita no Manual de Métodos de Análises de Solo (EMBRAPA, 2017). As quais consistiam em pH em água, extração de cátions trocáveis Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} utilizando KCl e determinados em espectrofotômetro de absorção atômica (EAA); Na^+ e K^+ trocáveis e P disponível extraídos por Mehlich-1, sendo Na^+ e K^+ determinados por espectrofotometria de chama e P disponível por colorimetria; acidez potencial (H^+ + Al^{3+}) extraída com acetato de cálcio a pH 7 e determinada por titulação; o carbono orgânico total (COT) determinado via úmida.

Após a obtenção dos resultados das análises, foram calculadas a soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V%), porcentagem de saturação por alumínio (m%) e porcentagem de sódio trocável (PST), seguindo os procedimentos do Manual de Métodos de Análises de Solo (EMBRAPA, 2017). E além das análises supracitadas foram também determinados os teores de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) por ataque sulfúrico, e leitura realizada em espectrômetro de absorção atômica com chama, onde os dados obtidos foram utilizados para determinar os índices K_i e K_r , que, usados para avaliar o intemperismo na área estudada.

5.4.1 Extrações seletivas

As formas de ferro livre, as quais incluem o conjunto dos óxidos cristalinos, de baixa e alta cristalinidade, chamados também de pedogênicos (Fe_d), e o alumínio (Al_d), ambos contidos na TFSA foram extraídas por dissolução seletiva dos óxidos de ferro pedogenéticos usando os métodos do Ditionito-Citrato-Bicarbonato de sódio (DCB) (Mehra; Jackson, 1960; Holmgren, 1967).

Para extração dos óxidos mal cristalizados de ferro (Fe_o), alumínio (Al_o) e SiO_2 também foi utilizado oxalato ácido de amônio a pH 3, no escuro em uma única extração (McKeague; Day, 1966). O conteúdo de Fe, Al e Si extraído pelas dissoluções foi determinado por espectroscopia de absorção atômica, e os resultados expressos na forma de óxidos.

Os valores dos elementos ferro e alumínio extraídos com DCD e oxalato foram expressos em g.kg^{-1} , em seguida foi realizada a subtração dos valores de Fe_d por Fe_o para obtenção das formas de ferro bem cristalizadas, após isto foram realizadas algumas relações.

A partir das análises químicas realizadas anteriormente, foram calculados o Índice Químico de Alteração ($\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}^2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$), sugerido por

Nesbitt e Young (1982), o Índice Químico de Intemperismo ($CIW = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)] \times 100$) (Harnois, 1988) e Índice de Alteração de Plagioclásio ($PIA = [Al_2O_3 - K_2O / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O)] \times 100$), proposto por Fedo *et al.* (1995).

5.5 Análises mineralógicas do solo

Foi realizada uma separação da fração argila seguindo as coordenadas do Manual de Métodos de Análises de Solo (EMBRAPA, 2017). As frações separadas foram colocadas em microtubos tipo eppendorf, em seguida as amostras foram previamente maceradas em almofariz, e secas em estufa com ventilação de ar forçada a 55 °C por 24 horas, até a realização da leitura.

Após separação, a mineralogia foi determinada para fração argila dos horizontes A, Bt e Cr de três perfis de solo. A amostra foi adicionada de água e, em estado pastoso, foi depositada em uma lâmina de vidro de superfície plana, formando uma fina película e submetida à irradiação por raios-X em uma faixa ampla de ângulos de incidência. A variabilidade na intensidade de raios emitidos na amostra, determinada pelos diversos planos cristalinos dos minerais, é representada em um difratograma.

As análises foram realizadas usando radiação $CuK\alpha$ ($\lambda = 1,541838 \text{ \AA}$), filtro Ni e gerador de raios-X de 30 kV com 10 Ma. As amostras foram irradiadas de 4 a 50° 2 θ em um tamanho da etapa de 0,02° 2 θ e tempo de etapa de 0,5 s⁻¹. O software utilizado foi o MATCH, o qual gerou os padrões de raios-X.

5.6 Análise micromorfológica

5.6.1 Impregnação das amostras

A impregnação e a laminação das amostras foram realizadas seguindo as orientações do capítulo 5 do Manual de Métodos de Análises de Solo (EMBRAPA, 2017).

5.6.2 Descrição das lâminas

A descrição das lâminas e a estimativa da proporção dos componentes minerais, da porosidade e das feições pedológicas foram realizadas seguindo o esquema e a terminologia propostos por Bullock *et al.* (1985) e por Brewer (1976). Lâminas dos horizontes

A, Bt e Cr foram examinados usando um microscópio de luz polarizada NIKON ECLIPSE Ci-POL, do Laboratório de Geologia da Universidade Federal do Ceará.

5.7 Análise estatística dos dados

Os dados médios de cada análise foram submetidos ao teste de Tukey a 5% de probabilidade, em seguida agrupados por horizontes em uma análise multivariada utilizando o *Statistical Analysis Software* (SAS). Nos dados obtidos na análise de infravermelho foi realizada a análise de componentes principais (PCA) e a representação gráfica das curvas espectrais dos perfis de cada área.

6 RESULTADO E DISCUSSÃO

6.1 Atributos morfológicos

Os dados morfológicos dos Planossolos (Tabela 1) denotam que há influência do manejo em alguns atributos do solo, principalmente nos horizontes superficiais. E isto fica claro nos solos na área de mata e pousio que apresentam horizonte A com blocos angulares e subangulares enquanto o perfil de solo em sobrepastejo possui horizonte AE fraco com estruturas laminares. Tal comportamento acontece pelo fato da pressão causada por meio do pisoteio animal na área sobrepastejada, fato este que favorece a formação de uma camada paralela à superfície (Figura 3). Já a diferença no grau de agregação da porção superior dos perfis estudados é porque no Planossolo submetido ao sobrepastejo boa parte das partículas finas foi retirada pela erosão intensa, além do maior aporte de matéria orgânica nas áreas sob pousio e de mata. Pois, ressalta-se que aquele material fino perdido é composto praticamente de argila e matéria orgânica, que são agentes cimentantes e promovem a agregação nos solos.

A alteração na estrutura dos horizontes superficiais, decorrente do tipo de uso da terra observado neste trabalho, também foi evidenciada por Malobane *et al.* (2019), ao estudarem a influência do manejo nos agregados do solo no Sul da África. Os autores informam em seu estudo que cinco anos de pousio foram suficientes para promover melhoria na qualidade estrutural do solo, pois o cultivo convencional promove mudanças nos agentes de ligação (agentes cimentantes), como raízes, hifas de fungos e subprodutos da síntese e decomposição microbiana, sendo preservada na área sob pousio.

Outro atributo que diferiu nas três áreas estudadas foi a cor do solo, nos horizontes de superfície, os quais apresentam valores e cromas mais baixos e, conseqüentemente, mais escurecidos na área de referência (mata) em relação às outras áreas, sendo mais claro no horizonte superficial da área sobrepastejada. Isto é explicado pelo provável maior aporte de matéria orgânica nas áreas de mata e pousio, já que são excluídas de animais e permitem a preservação de uma vegetação mais exuberante, refletindo nos valores de carbono orgânico encontrados no trabalho (Tabela 3), apesar do aporte de resíduo orgânico na região semiárida ser pequeno em qualquer tipo de uso do solo. O horizonte Bt do solo de mata possui matiz mais amarelada (matiz 2,5Y), ressaltando cores mais acinzentadas em comparação aos mesmos horizontes dos outros perfis, esse comportamento deve-se, provavelmente, a maior concentração de argila que existe nesse horizonte e, conseqüentemente, maior adsorção de água e maior potencial redutor. A camada Cr de todas as áreas apresenta matiz amarelada

(2,5Y) e croma baixo (acinzentadas), inferindo a influência do material de origem neste atributo.

Tabela 1 – Atributos morfológicos de Planossolos em áreas sob processo de desertificação no município de Irauçuba-CE

Hor.	Prof. (cm)	Cor úmida	Estrutura ¹			Consistência ²		
			Grau	Tam.	Forma	Seca	Úmida	Molhada
PLANOSSOLO NÁTRICO Órtico típico (Mata)								
Ap	0-6	10YR 2/2	Mod	Peq	Ba	Ma	Mtf	Npl, Lpe
E1	6-20	10YR 4/6	Fr	Peq	Bsa	Ld	Fr	Lpl, Lpe
E2	20-40	10YR 6/6	Fr	Peq	Bsa	Ld	Fr	Lpl, Lpe
Bt1	40-70	2,5Y 7/4	Ft	Med a Gr	Bsa e Ba	Ed	Fir	Pl, Pe
Bt2	70-90	2,5Y 7/3	Ft	Med a Gr	Bsa e Ba	Ed	Fir	Pl, Pe
Cr	90-98+	2,5Y 6/1	Ft	Peq e Md	Grl	Sol	Sol	Lpl, Lpe
PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico solódico (Pousio)								
Ap	0-4	10YR 3/3	Mod	Peq e Md	Ba e Bsa	Ma	Mtf	Npl, Lpe
E	4-12	10YR 4/6	Fr	Peq e Md	Ba e Bsa	Ld	Fr	Lpl, Lpe
Bt1	12-25	10YR 5/2	Ft	Gr e Mgr	Ba e Bsa	Ed	Fir	Pl, Pe
Bt2	25-76	10YR 7/3	Ft	Gr e Mgr	Ba e Bsa	Ed	Fir	Pl, Pe
Cr	76-85+	2,5Y 5/1	Ft	Peq a Md	Grl	Ma	Sol	Lpl, Lpe
PLANOSSOLO NÁTRICO Órtico salino (Sobrepastejo)								
AE	0-8	10YR 3/6	Fr	Md	Lam	Ld	Fr	Npl, Npe
Bt1	8-16	10YR 5/4	Ft	Gr e Mgr	Bsa e Ba	Ed	Fir	Pl, Pe
Bt2	16-68	10YR 7/3	Ft	Gr e Mgr	Bsa e Ba	Ed	Fir	Pl, Pe
Cr	68-78+	2,5Y 5/1	Ft	Peq e Md	Grl	Sol	Sol	Lpl, Lpe

1 - Mod – moderado, Fr – fraca, Ft – forte, Gr – grande, Mgr – muito grande, Md – média, Peq – pequena, Lam – laminar, Bsa – bloco subangular, Ba – bloco angular, Grl – granular.

2 - Ma – macia, Ed – extremamente dura, Sol – solta, Ld – ligeiramente dura, Fr – friável, Fir – firme, Mtf – muito firme, Lpl – ligeiramente plástico, Pl – plástico, Npl – não plástico, Npe – não pegajosa, Lpe – ligeiramente pegajosa.

Figura 4 – Fotografia mostrando estrutura laminar de uma camada compactada na superfície do solo



Fonte: Autor

A cor acinzentada encontrada no horizonte Bt da área de mata deste trabalho foi observada também por Sousa *et al.* (2023) ao estudar a gênese de Planossolos no semiárido da região Nordeste do Brasil. Os autores interpretam que a abundância de argila nos horizontes subsuperficiais Bt acarreta o adensamento, e isso reduz o a condutividade hidráulica, promovendo a estagnação parcial da água, um ambiente pobre em oxigênio e favorecendo a redução do ferro, atribuindo a esses horizontes cores acinentadas. Já Câmara *et al.* (2023) relatam, ao estudarem Planossolos e Luvisolos na região Nordeste do Brasil, que a cor do solo apresenta forte influência da rocha mãe, que, no caso é rocha de gnaisse.

O horizonte A foi parcialmente truncado na área em sobrepastejo, e isso aconteceu provavelmente devido a eventos isolados de chuvas intensas, típicas dessa região, pois, a ausência de vegetação nestas áreas maximiza o escoamento superficial. E este fato influencia diretamente na cor, agregação e consistência do horizonte superficial do solo desta área, pois a porção superior do perfil de solo refletiu características e propriedades do horizonte subsequente ao que foi decapitado que no caso foi o E. Contudo, é sabido que o horizonte E, devido sua fração predominantemente arenosa, é muito suscetível à erosão e também pode ter sido removido do perfil, porém, será chamado de horizonte AE esta camada constituída de

material grosseiro na superfície do perfil, com cor mais escura que os horizontes subsequentes.

Estudando os efeitos do sobrepastejo nos atributos do solo, Julich *et al.* (2022) relataram que, em uma região semiárida no sul da África, o sobrepastoreio ocasionou um aumento na compactação do solo, redução na cobertura vegetal e, conseqüentemente, intensificação no escoamento superficial, prejudicando a qualidade do solo e o desempenho de suas funções. Diante das conclusões expostas pelos autores fica claro que, semelhante ao trabalho em questão, o tipo de manejo interfere diretamente nos atributos do solo.

A consistência seca e úmida apresenta distinção considerável apenas nos horizontes superficiais das três áreas, devido, principalmente ao teor de carbono orgânico superiores nos solos de mata e pousio em relação a área sobrepastejada. Outros atributos morfológicos não sofreram marcantes modificações em função do manejo, havendo similaridade quanto à consistência molhada dos agregados em todos os horizontes e consistência seca e úmida dos horizontes de subsuperfície de todas as áreas estudadas.

6.2 Atributos físicos

Os valores médios de porcentagem de areia, silte e argila variaram entre tipos de uso do solo (Tabela 2), porém, esta alteração é notada principalmente nos horizontes superficiais dos perfis. Neste sentido é possível inferir que o maior teor médio de areia foi encontrado na área sobrepastejada em relação às outras áreas, pois, possivelmente, a compactação e a ausência de vegetação nesta área promoveu erosão de forma mais acentuada, aflorando o material do horizonte E (mais arenoso). Ressaltando-se também que todos estes solos apresentam acúmulo de sódio em seu perfil, causando a dispersão da argila, deixando-a suscetível a erosão e elutriação. Os demais horizontes apresentaram comportamento semelhante em todas as áreas, com aumento significativo de argila nos horizontes Bt e diminuição nos valores de areia, com aumento substancial nos teores de silte nos horizontes Cr das áreas estudadas.

Tabela 2 – Atributos físicos de Planossolos em áreas sob processo de desertificação no município de Irauçuba-CE

Horizontes		Granulometria					silte/argila	Densidade		Pt ¹⁰
Simb ¹	Prof ²	Areia ⁴	Silte ⁵	Arg ³	ADA ⁶	GF ⁷	Dp ⁸	Ds ⁹		
PLANOSSOLOS NÁTRICOS Órticos típicos (Mata)										
	cm	-----g kg⁻¹-----				%	-----mg m⁻³-----		%	
A	0-6	865,83	98,50	35,67	12	66,36	2,76	2,35	1,27	45,84
E1	6-20	869,50	106,63	23,87	13	45,54	4,47	2,78	1,67	39,85
E2	20-40	865,33	101,40	33,27	16	51,91	3,05	2,74	1,56	42,92
Bt1	40-70	641,33	46,20	312,47	160	48,80	0,15	2,53	1,78	29,71
Bt2	70-90	658,33	59,07	282,60	182	35,60	0,21	2,67	1,77	33,45
Cr	90+	594,50	373,43	32,07	23	28,28	11,65	2,67	1,26	52,63
PLANOSSOLOS HÁPLICOS Eutróficos solódicos (Pousio)										
Ap	0-4	882,83	73,37	43,80	15	65,75	1,68	2,67	1,54	42,42
E	4-17	925,83	45,17	29,00	12	58,62	1,56	2,86	1,54	45,93
Bt1	17-25	529,83	264,57	205,60	114	44,55	1,29	2,56	1,76	31,37
Bt2	25-76	574,33	224,20	201,47	118	41,43	1,11	2,56	1,79	30,27
Cr	76+	461,83	514,03	24,13	13	46,13	21,30	2,60	1,29	50,37
PLANOSSOLOS NÁTRICOS Órticos salinos (Sobrepastejo)										
AE	0-8	933,83	53,30	12,87	7	45,61	4,14	2,94	1,74	40,94
Bt1	8-16	485,00	311,47	203,53	121	40,55	1,53	2,67	1,79	32,78
Bt2	16-68	553,50	264,50	182,00	142	21,98	1,45	2,70	1,76	34,84
Cr	68+	566,00	411,07	22,93	18	21,50	17,92	2,53	1,26	50,09

Nota: 1 Símbolo; 2 Profundidade; 3 Teor de argila; 4 Teor de areia; 5 Teor de silte; 6 Argila dispersa em água; 7 Grau de flocculação; 8 Densidade de partícula; 9 Densidade do solo; 10 Porosidade total.

Para Masha *et al.* (2023), a variação dos valores médios de argilas e areia nos horizontes está diretamente relacionada com o tipo de uso do solo, pois pode interferir diretamente nos processos pedogênicos atuantes no local, como erosão, deposição, eluviação e intemperismo que podem alterar a textura do solo ao longo do tempo.

A granulometria no horizonte Cr apresenta comportamento particular, pois há valores da fração silte altos em relação aos demais horizontes e, conseqüentemente, altos valores da relação silte/argila. Isto é explicado porque este horizonte é composto pela rocha em desintegração, com presença maciça de partículas grosseiras advindas do material de origem, e as amostras deste horizonte ao passarem por tratamento para obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA) apresentam resultados de granulometria “mascarados”, pois ocorre uma pulverização da estrutura do saprólito conferindo elevados valores de silte no Cr. Recomendaria a obtenção de TFSA desses horizontes apenas para fins de análises mas não de classificação granulométrica, para que os resultados obtidos nas análises retratem fielmente o que o solo representa.

Os resultados dos teores de silte e a relação silte/argila nos horizontes Bt da área de mata (Tabela 2), são muito menores em relação as áreas de pousio e sobrepastejo. Isto indica que o horizonte de máxima expressão pedogenética (Bt) da área de mata possui maior taxa de intemperismo, pois a relação silte/argila é utilizada para avaliar o grau de evolução do solo, e valores abaixo de 0,7 em solos de textura média indicam alto grau de intemperismo. Portanto, mudanças nas taxas de intemperismo são devidas, possivelmente, ao maior aporte de matéria orgânica e melhor agregação no solo da área de mata, o que permite maior infiltração de água no perfil, favorecendo maiores taxas de processos envolvidos na decomposição de rochas, como a hidrólise. Apesar de trabalhos aplicarem modelos de predição para as taxas de intemperismo (Welivitiya; Hancock, 2024), reconhecendo que este é um processo que leva centenas ou milhares de anos para acontecer.

Um trabalho realizado na região semiárida dos Estados Unidos mostra a importante relação das partículas de silte e argila na adsorção e agregação de compostos orgânicos e aumento na quantidade de água no sistema. Para os autores, em um ambiente semiárido os solos de textura mais fina apresentaram maior disponibilidade de água no solo e maior área habitável disponível para microrganismos. Eles concluem que as relações entre silte, argila e carbono do solo podem melhorar a disponibilidade de nutrientes nos ecossistemas de terras áridas, mitigando potencialmente a perda de carbono sob as alterações climáticas e aumentando a resiliência dos ecossistemas à seca. (Mao; Cotrufo; Hart; Sullivan; Zhu; Zhang; Liang; Zhu, 2024). E a conclusão dos autores reforça que há uma maior

quantidade de água no sistema quando se tem partículas mais finas, como é o caso da textura do horizonte Bt da área de mata, propiciando maior taxa de intemperismo, apesar de entender que 20 anos podem ser pouco tempo para variações intempéricas associadas ao tipo de manejo.

Analisando os teores de argila nos três perfis estudados, percebe-se que há um incremento alto de argila nos horizontes B e o comportamento dos valores de areia são inversamente proporcionais nos solos de todas as áreas. Isto é típico de Planossolos, já que esta classe de solo apresenta como pré-requisito a presença do horizonte B textural, podendo ser decorrente de diversos processos pedogenéticos. E também, estudando Planossolos no semiárido brasileiro, Sousa *et al.* (2023) constataram que a formação de horizontes subsuperficiais densos e ricos em fração argila pode ser proveniente da alteração de minerais, chamado de processo de argilação. Os Planossolos estudados por Câmara *et al.* (2023) também apresentaram uma mudança textural abrupta subjacente ao E horizontes.

Os resultados evidenciaram que o manejo do solo exerceu influência direta sobre a densidade e porosidade dos horizontes superficiais (Tabela 2). A área sobrepastejada apresentou a maior densidade, seguida pelo pousio e pela mata. A porosidade, por sua vez, mostrou comportamento inverso, sendo máxima na mata, intermediária no pousio e menor no sobrepastejo. O pisoteio intenso dos animais na área sobrepastejada provocou a compactação do solo, elevando sua densidade. Em contrapartida, a ausência de pressão e o acúmulo de matéria orgânica nas áreas de mata e pousio resultaram em menor densidade e maior porosidade. Além disso, os horizontes B dos perfis apresentaram densidade naturalmente elevada, característica típica de Planossolos. É importante ressaltar que o adensamento natural difere da compactação causada pelo manejo, embora ambos resultem em alta densidade.

Estudos recentes têm demonstrado a influência do pastoreio nos atributos físicos do solo. Paneru *et al.* (2023) observaram uma redução significativa na densidade do solo após dois anos de exclusão do pastoreio. Os resultados de argila dispersa em água e grau de floculação (Tabela 2) permitem inferir que nas áreas de mata e pousio há uma maior estabilidade de agregados nos horizontes superficiais, já que o comportamento deste atributo é inversamente proporcional ao grau de floculação. Este fato deve-se principalmente ao maior aporte de COT nestas áreas, além de exsudatos liberados pelas plantas e ação de microrganismos, os quais favorecem uma maior cimentação dos agregados aumentando sua estabilidade. Por outro lado, um solo com baixo grau de floculação permite que a água provoque o desprendimento de partículas da camada superficial do solo, e posteriormente transportar e depositar estas partículas em um local mais baixo (Li *et al.*, 2023).

Os valores de grau de floculação são maiores nos horizontes superficiais dos perfis de mata e pousio em relação ao solo sobrepastejado. E todas as áreas apresentaram grau de floculação decrescente com a profundidade até o horizonte Bt (Tabela 2). Os baixos valores de grau de floculação ou a grande quantidade de argila dispersa em água nos horizontes Bt é devido a porcentagem alta de saturação por sódio nestes horizontes (Tabela 3), visto que, este elemento possui alto poder dispersivo. Este comportamento também foi analisado por Câmara *et al.* (2021), que constataram baixos valores de grau de floculação em horizontes Bt derivados de gnaiss, e isto deve-se, principalmente ao alto teor de sódio presentes nesses solos.

6.3 Atributos químicos

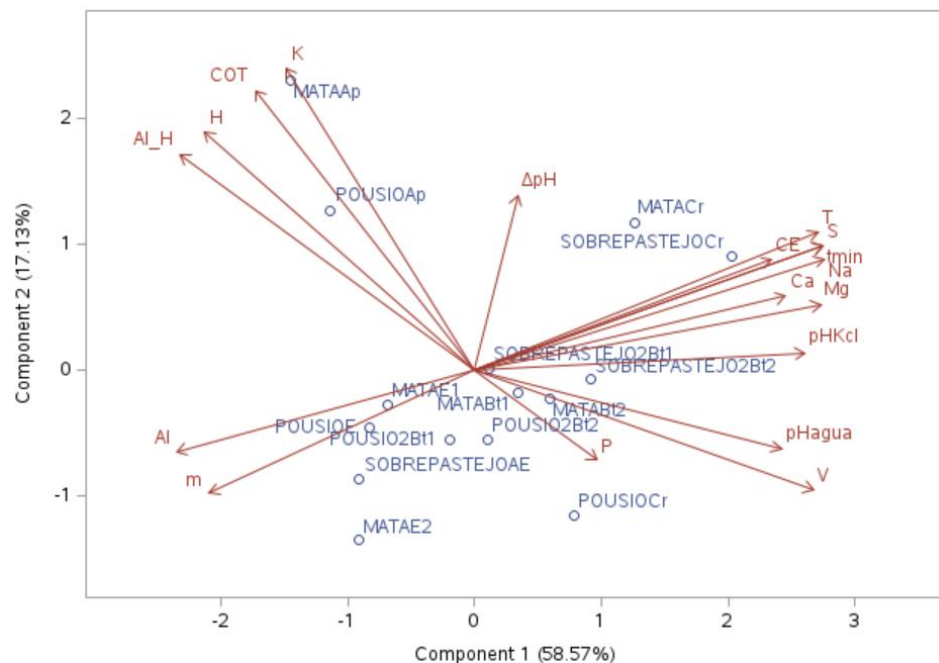
A acidez ativa (pH em água) é classificada como ácida para todos os horizontes superficiais dos perfis (Tabela 3), e vai aumentando com a profundidade, tendendo a neutralidade e se tornando básicas nos horizontes Cr das áreas de pousio e sobrepastejo. A maior acidez nos horizontes superficiais de mata e pousio pode ser explicada pelo maior aporte de matéria orgânica (expresso pela maior quantidade de COT), a qual promove uma acidificação do sistema, mas também pela maior lixiviação das bases nestes horizontes promovendo menores valores de pH. Já a neutralidade e basicidade dos demais horizontes é devido ao baixo teor de matéria orgânica, à menor lixiviação e, principalmente, grande teor de cátions básicos presentes na solução do solo. E em especial no horizonte Cr há uma presença massiva de cátions básicos devido à baixa atuação do processo de intemperismo, promovendo a alcalinidade do meio.

Tabela 3 – Atributos químicos de Planossolos em áreas sob processo de desertificação no município de Irauçuba-CE

Simb ¹	Prof ²	pH			-----Complexo Sortivo-----															
		Água	KCl	ΔpH	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺	Al+H	S	T	t	P	V	m	PST ⁴	COT ⁵	CE
PLANOSSOLOS NÁTRICOS Órticos típicos (Mata)																				
----- cmol _c /Kg -----												-----%-----			g/Kg	mS/cm				
Ap	0-6	4,71	3,86	-0,85	0,15	0,15	1,64	1,04	0,23	4,03	4,27	2,99	7,26	3,22	0,09	41,21	7,23	2,10	15,26	0,76
E1	6-20	4,80	4,15	-0,65	0,20	0,06	0,55	0,79	0,17	0,96	1,13	1,60	2,74	1,77	0,07	58,58	9,54	7,23	7,10	1,09
E2	20-40	5,32	4,02	-1,30	0,14	0,05	0,49	0,86	0,46	0,44	0,90	1,54	2,44	2,00	0,03	63,09	23,06	5,90	3,59	0,29
Bt1	40-70	6,40	4,56	-1,83	1,26	0,07	2,19	5,52	0,05	0,69	0,73	9,04	9,78	9,09	0,04	92,5	0,51	12,91	3,72	0,73
Bt2	70-90	7,09	5,39	-1,70	1,45	0,06	2,28	5,67	0,00	0,53	0,53	9,45	9,99	9,45	0,08	94,66	0,00	14,55	3,31	1,00
Cr	90+	5,66	7,16	1,50	2,60	0,08	7,09	7,09	0,00	0,23	0,23	16,86	17,10	16,86	0,54	98,64	0,00	15,20	4,00	2,52
PLANOSSOLOS HÁPLICOS Eutróficos solódicos (Pousio)																				
Ap	0-3	4,94	4,00	-0,93	0,12	0,14	1,26	1,54	0,20	2,83	3,03	3,07	6,10	3,27	0,08	50,29	6,12	1,97	9,63	0,37
E	4-17	5,30	4,08	-1,22	0,15	0,08	0,82	1,39	0,28	1,22	1,50	2,43	3,93	2,71	0,02	61,83	10,20	3,73	5,11	0,31
Bt1	17-25	5,91	4,29	-1,62	0,63	0,05	2,10	4,43	0,32	0,91	1,23	7,20	8,44	7,53	0,01	85,39	4,29	7,47	4,70	0,88
Bt2	25-60	6,40	4,56	-1,84	0,71	0,04	2,41	4,63	0,05	0,95	1,00	7,79	8,79	7,84	0,01	88,62	0,59	8,03	3,62	0,74
Cr	60+	9,36	8,00	-1,36	0,59	0,03	5,21	3,31	0,00	0,27	0,27	9,14	9,41	9,14	3,48	97,16	0,00	6,29	3,47	0,97
PLANOSSOLOS NÁTRICOS Órticos salinos (Sobrepastejo)																				
AE	0-8	5,16	4,00	-1,17	0,10	0,05	0,41	0,60	0,25	0,95	1,20	1,15	2,35	1,40	0,24	49,02	17,57	4,26	5,03	0,28
Bt1	1-20	5,63	4,19	-1,44	0,98	0,04	1,96	4,70	0,08	1,15	1,23	7,67	8,91	7,75	0,02	86,16	1,03	10,96	6,04	2,25
Bt2	20-52	7,80	6,37	-1,43	1,73	0,04	2,09	4,79	0,00	0,43	0,43	8,64	9,07	8,64	0,02	95,23	0,00	19,05	4,10	4,20
Cr	52+	8,92	7,65	-1,27	3,16	0,06	8,10	7,85	0,00	0,03	0,03	19,17	19,20	19,17	0,49	99,83	0,00	16,47	4,83	4,78

Nota: 1 Símbolo do horizonte; 2 Profundidade do horizonte; 3 Condutividade Elétrica; 4 Porcentagem de Sódio Trocável; 5 Carbono Orgânico Total. S: Soma de bases; T: CTC total; t: CTC efetiva; V: Saturação por bases; m: Saturação por alumínio; P: Fósforo disponível.

Figura 5– Análise de componentes principais (PCA) dos atributos químicos, com a combinação contendo maiores interações, sendo a cor vermelha representando as variáveis observadas e em azul os tratamentos.



Os autores Fujii e Hayakawa (2023), estudando o efeito da matéria orgânica na acidificação de solos no noroeste do Canadá, relatam que, semelhante ao que foi observado no presente estudo, os horizontes superficiais apresentaram valores de pH baixos, aumentando com a profundidade do perfil de solo. Este comportamento, segundo os autores, é pode ser justificado pelo que foi apresentado acima no presente trabalho. Outra explicação fornecida pelos autores, é que a vegetação na área pode aumentar a acidificação do solo por meio do aumento na demanda das plantas por cátions, principalmente em horizontes superficiais, e na área sobrepastejada no presente estudo, a vegetação é mínima mesmo no período chuvoso, não demandando cátions e favorecendo a basicidade da camada ativa. De acordo com Fujii *et al.* (2022), o uso de fogo na área e as cinzas também contribuem para a neutralização da acidez ao longo tempo, explicando parcialmente os valores de pH mais elevado na área sobrepastejada, pois, no município como um todo, o uso do fogo é uma prática comum que foi implantada ao longo do tempo.

Os valores negativos de ΔpH em praticamente todos os horizontes das três áreas estudadas (Tabela 3), com exceção do horizonte Cr do perfil de mata, indicam predominância de cargas negativas. Sendo este comportamento refletido também nos altos valores de CTC dos horizontes de subsuperfície. Câmara *et al.* (2021) também encontraram valores negativos de ΔPh em Planossolos estudados, e isto foi explicado pela grande quantidade de minerais de

argila do tipo 2:1, os quais possuem superfície específica carregados negativamente e, conseqüentemente, alta CTC.

Os Planossolos analisados em todas as áreas são eutróficos, possuem saturação por base em seu horizonte diagnóstico acima de 50%, com destaque para os elevados teores de Na, Ca^{2+} e Mg^{2+} , nos quais representam valores acima de 90% da soma de bases (valor S). Esta alta saturação por bases é devida, principalmente, as condições geoambientais que favorecem pouca evolução desses solos, preservando as quantidades de cátions na solução, advindos do material de origem que foi pouco alterado ao longo do tempo. Segundo Câmara *et al.* (2021), os valores de Na, Ca^{+2} e Mg^{2+} estão associados à predominância de minerais primários como plagioclásio e biotita. E a textura arenosa nos horizontes superficiais indica a ocorrência de percolação da água, o que pode ter contribuído para a perda de cátions na superfície e posterior concentração em subsuperfície de Planossolos.

Ao contrário do que foi encontrado neste trabalho, Abbaslou *et al.* (2020) apresentaram em seu estudo valores baixos de Mg e Ca no solo, e concluíram que solos com baixas concentrações desses íons geralmente são mais dispersos e possuem valores baixos de permeabilidade, e um menor grau de taxa de hidratação. E acrescentam que outro íon importante na alteração das condições físicas e químicas do solo é o sódio (Na), pois resulta em um aumento no potencial de osmose e uma diminuição na força de atração de Van der Waals entre partículas do solo. Estas informações corroboram para o alto grau de floculação (Tabela 1) em alguns horizontes encontrados neste trabalho associados aos baixos teores de sódio.

Os valores de condutividade elétrica (CE) (Tabela 2) obtidos neste trabalho são baixos em praticamente todos os horizontes dos perfis, porém, os horizontes Bt2 e Cr do solo da área sobrepastejada apresentam dados mais altos de CE, caracterizando caráter salino ($4 \text{ mS cm}^{-1} < \text{CE} > 7 \text{ mS cm}^{-1}$) (EMBRAPA, 2017). E isto é devido ao alto de compostos salinos advindos, provavelmente, o material de origem, principalmente com sódio, já que a composição química de horizonte Cr é praticamente a mesma da rocha.

As condições edafoclimáticas das áreas e a deficiência na drenagem favorecem a manutenção de elevados teores de sódio (Tabela 3) nos Planossolos estudados. No presente trabalho, o efeito do sódio é mais pronunciado no perfil da área sobrepastejada, provavelmente devido a menor taxa de intemperismo neste perfil. O Na^+ é um cátion de alta solubilidade que pode ser facilmente lixiviado em ambientes com elevadas precipitações e, apesar da região apresentar baixa precipitação, este pode ser o motivo de menores valores de

Na⁺ nos perfis da área de pousio e de mata, visto que nestas áreas a percolação de água é mais facilitada pela melhor agregação em relação a área sobrepastejada.

Os teores de potássio (Tabela 3) obtidos neste trabalho são baixos em todos os horizontes dos perfis estudados. Isto é explicado parcialmente, pois, toda a região apresenta gnaisse como material de origem, e minerais associados a K nesta rocha são biotita, feldspatos alcalinos como ortoclásio e microclina, assim como a muscovita. Porém os dois últimos são mais resistentes ao intemperismo e, provavelmente, os demais minerais contendo K estão em pequena quantidade. Os horizontes Cr de todas as áreas apresentarem constantemente plagioclásio em sua constituição (Figura 8), minerais estes ricos em Ca e Na.

Os níveis de fósforo (Tabela 3) são baixos em praticamente todos os perfis das áreas estudadas, apresentando aumento expressivo no horizonte Cr, com maior destaque na área em pousio. Os valores baixos de fósforo nos horizontes superficiais são explicados pelo fato de não haver incremento suficiente de matéria orgânica nesta região, principalmente devido suas condições climáticas e sua vegetação que não favorecem que isto aconteça. No horizonte Cr da área de pousio o maior valor de fósforo é, provavelmente, advindo de um bandamento do material de origem rico neste elemento. Marcha *et al.* (2023) explicam que o menor valor de fósforo obtido na área de pastagem foi devido à compactação do solo causada pelo pastoreio intenso de gado e perda causada pela erosão superficial, e que o nível de fósforo disponível é diretamente influenciado pela matéria orgânica do solo (MO), a qual causa a liberação de fósforo orgânico, e é justamente o baixo teor de matéria orgânica que provoca baixos valores de P nas áreas da região estudada.

A figura 4 ilustra a correlação das variáveis com as áreas estudadas, resultando em três componentes principais, nas quais representam quase 90 % dos dados. É possível observar que a variação do pH (ΔpH) apresenta comportamento isolado com mínima variação e que o teor de fósforo (P) apresentou-se bem significativo no horizonte Cr da área em pousio, com as áreas de pousio e mata possuindo maiores valores de COT, H, K. Em geral as análises multivariadas dividiram as observações em três grandes grupos que foram os dados do horizonte Cr da área de pousio, Cr das áreas de mata e sobrepastejo e o último com o restante dos dados.

Algumas divergências de dados nos solos estudados, principalmente nos atributos químicos (Tabela 3), provavelmente ocorreram devido a diferenças estruturais na rocha (Sousa *et al.*, 2020), que alterou a dinâmica de drenagem e a formação de solos gnáissicos no Nordeste do Brasil (Neves, 2023). Os dados indicam que houve interferência direta do tipo de

manejo nos atributos químicos nos horizontes superficiais, porém, não ficou claro alterações significativas no restante dos horizontes.

6.3.1 Índices de intemperismo

As relações moleculares conhecidas como K_i e K_r consideram os teores de sílica no solo, e neste estudo os valores destes índices (Tabela 4) são extremamente altos, indicando elevado teor de sílica, e conseqüentemente baixa taxa de intemperismo, pois solos muito intemperizados possuem $K_i \leq 2$ e os pouco intemperizados $K_i > 2$, já os valores de índice $K_r < 0,75$ indicam solos altamente intemperizados, e $K_r > 0,75$ são solos pouco intemperizados (Pires, 2022). Contudo, estes índices retratam a realidade, pois os solos estudados, independente do manejo, apresentam baixa taxa de intemperismo, principalmente pelas condições edafoclimáticas adversas. Apesar dos índices K_i e K_r refletirem as condições de intemperismo nestes solos, a relação K_i é mais indicada para solos bem intemperizados, visto isso, Oliveira (2001) relata que alguns problemas, como a dificuldade de determinação de Si e Al, variação nas metodologias de extração e possíveis discrepâncias causadas pela presença de minerais com $K_i < 2$ na fração argila, motiva um desuso acentuado do índice K_i como critério.

A relação Al_2O_3/Fe_2O_3 remete a composição mineralógica da fração argila e grau de intemperismo, e no caso deste trabalho há uma predominância de minerais alumínicos, apesar de uma grande variação dos valores no perfil. Esta relação molecular pode sofrer mutações no próprio perfil como resultado de processos pedogenéticos, e isto pode explicar a oscilação dos valores obtidos. Corroborando a descontinuidade nos valores desta relação dentro do perfil, Miura (1988) relata que os valores obtidos em seu trabalho denotam uma ruptura litológica entre a rocha mãe e os demais horizontes, concluindo que tais alterações nas relações Al_2O_3/Fe_2O_3 não puderam ser explicadas adequadamente com base nos conhecimentos e dados atuais.

Tabela 4 – Teores dos elementos das extrações seletivas e Índices geoquímicos das áreas de mata, pousio e sobrepastejo

HOR	Prof	Ki	Kr	Relação Al_2O_3/Fe_2O_3	-----Extrações seletivas-----						Fe_o/Fe_d	CIA	PIA	CIW
					Al_o	Fe_o	Si_o	Al_d	Fe_d	Mn_d				
PLANOSSOLOS NÁTRICOS Órticos típicos (Mata)														
----- g Kg ⁻¹ -----														
Ap	0-6	2,67	1,09	2,31	2,29	3,29	0,84	1,13	1,81	0,41	0,55	73,24	81,88	84,72
Bt1	70-90	2,50	1,45	3,06	2,43	4,53	2,42	0,39	1,76	0,40	0,39	68,31	69,22	69,96
Cr	90+	6,20	1,89	2,00	1,86	1,68	2,03	0,20	0,62	0,14	0,37	45,69	45,47	46,81
PLANOSSOLOS HÁPLICOS Eutróficos solódicos (Pousio)														
Ap	0-3	8,17	1,67	2,59	1,21	2,25	0,47	0,55	1,01	0,23	0,45	69,30	79,19	83,43
Bt1	25-60	6,47	1,71	3,59	2,72	5,71	2,37	0,64	2,41	0,54	0,42	85,51	86,47	86,65
Cr	60+	11,24	1,49	1,53	1,23	1,83	1,69	0,32	1,23	0,28	0,67	80,08	80,78	81,00
PLANOSSOLOS NÁTRICOS Órticos salinos (Sobrepastejo)														
AE	0-1	5,47	1,09	2,54	0,81	1,42	0,37	0,38	1,05	0,24	0,74	89,08	92,63	92,95
Bt1	20-52	5,27	1,45	3,80	2,01	3,71	1,49	0,87	3,08	0,69	0,83	84,53	85,18	85,31
Cr	52+	11,83	1,89	1,92	1,65	1,34	2,28	0,33	0,68	0,15	0,50	48,43	48,39	49,01

Hor.: horizonte; Prof.: profundidade; Fe_d : formas de Fe extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato (DCB); Fe_o : formas de Fe extraídos por oxalato ácido de amônio (OAA); Al_d : formas de Al extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato; Al_o : formas de Al extraídos por oxalato ácido de amônio; Al_d : Formas de Al extraídos por DCB; Mn_d : formas de Mn extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato; CIA: Índice de alteração química; PIA: Índice de alteração de plagioclásio; CIW: Índice químico de intemperismo.

As extrações seletivas das formas pedogênicas de Fe, Al, Si e Mn (Tabela 4) mostraram dominância de formas mal ordenadas sobre formas pedogenéticas, corroboradas por altos valores das relações Feo/Fed. Isto significa que os solos apresentam intenso grau de intemperismo refletidos na maior quantidade dos óxidos destruídos em relação aos cristalinos, provavelmente devido a processos de oxiredução, já que estes solos possuem como característica o acúmulo de água por um determinado período de tempo, o que promove a redução das formas oxidadas, principalmente de ferro (Fe^{3+}), constituinte da estrutura dos óxidos para a forma reduzida (Fe^{2+}), esta última, sendo solúvel, é facilmente retirada do perfil, por meio do processo chamado de desferrificação, também relatado por Ghidin *et al.* (2006), nos quais verificaram a menor concentração do ferro cristalino no terço inferior da topossequência, atribuindo isso a oscilação no regime de umidade do solo. Este comportamento do ferro no solo é explicado por Neves *et al.* (2023) quando argumentam que ciclos de encharcamento e secagem no solo causam alteração mineral e redistribuição de Fe desenvolvidos em locais com flutuações do nível da água, e processo de desferrificação.

Os valores da extração seletiva indicam o Fe está mais abundante nos solos estudados do que os outros elementos (Al, Mn e Si). Resultado inesperado visto que o gnaiss é uma rocha com relativos baixos valores de Fe em sua constituição. Contudo, observando o comportamento dos dados de extração seletiva é possível denotar que as concentrações do Fed e Feo são aleatórias entre os perfis, praticamente sem distribuição padrão, semelhante ao que foi observado por Sousa *et al.* (2023). Estes índices também não corroboram com os valores encontrados nos índices Ki e Kr (Tabela 4), estas contradições provavelmente é por que, segundo Santos *et al.* (2019), a exatidão da relação Fed/Feo depende do grau de intemperismo/pedogênese e da quantidade de Fe no material de origem.

É possível observar que o perfil de solo da área sobrepastejada apresenta maior quantidade de Fed no horizonte Bt, indicando menor grau de intemperismo neste solo em relação as outras áreas, apesar dos valores de Fo serem praticamente os mesmos neste horizonte. Tal comportamento é explicado devido ao menor valor de COT (Tabela 2) e maior densidade neste solo causado pelo sobrepastejo, isto dificulta a percolação da água e, conseqüentemente, a ação do processo de intemperismo, visto que a drenagem é um fator importante para diferenciar os argilominerais (Sousa *et al.*, 2020) em Planossolos do semiárido brasileiro. No horizonte Cr há um decréscimo nos valores de Fe extraível em todas as áreas, diferente ao observado por Neves *et al.* (2023), os quais mostram valores de Fed aumentando no horizonte C.

Os valores de CIA (Tabela 4) apresentam comportamento semelhante nas áreas de mata e sobrepastejo, os quais são altos no horizonte superficial e decresce com a profundidade, análogo ao observado por SOUSA *et al.* (2023) que verificaram aumento do índice CIA no terço superior do perfil diminuindo em direção aos horizontes Bn, com nova diminuição nos horizontes Cn. Este fato indica que os horizontes superficiais possuem maior grau de intemperismo, enquanto que os de subsuperfície são menos intemperizados. E como parâmetro foi utilizado que, no intemperismo, valores CIA <60 sugerem menor intemperismo, 60–80 moderado intemperismo e >80 intemperismo extremo (Nesbitt e Young, 1982). Na área de pousio o valor deste índice é maior no horizonte Bt e menor no horizonte Ap.

O índice de intemperismo CIA nos horizontes Cr da área de mata e sobrepastejo (Tabela 4) indicam menor intemperismo e, diferente do horizonte Cr da área sob pousio que apresentou intemperismo extremo. Este comportamento na área de pousio foi inesperado ao observar outros índices geoquímicos na própria Tabela 4. Outro fato inesperado foi que o horizonte B da área de mata apresentou intemperismo moderado, enquanto que nas áreas de pousio e sobrepastejo o intemperismo foi extremo. Portanto, Heidari, Osat e Konyushkova (2022) relatam que os índices de avaliação do grau intemperismo baseados em elementos móveis são mais recomendados no estudo de intemperismo incipiente a intermediários, enquanto são inadequados para estágios de intemperismo químico extremos, e o inverso acontece para elementos imóveis, e elementos móveis em questão usados no cálculo dos índices geoquímicos, são Ca, Na, K, Sr, Ba, Rb e Mg; e os elementos imóveis ou seus óxidos incluem principalmente Al, Si, Ti, Zr e Fe. Apesar de algumas variações no índice de intemperismo entre as áreas, não é esperado que o manejo influencie tais dados em apenas 20 anos de observação.

Os índices de intemperismo CIA, PIA e CIW apresentam faixas classificatórias de alteração iguais, pois valores menores que 60 indicam baixo intemperismo, entre 60 e 80 sugere intemperismo moderado, e um valor maior que 80 aponta alta intensidade de intemperismo, com transformação completa de feldspatos em argilominerais aluminosos (Fedo *et al.*, 1995). Neste trabalho os resultados dos índices PIA e CIW, semelhante ao CIA, indicam que estes minerais sofreram poucas transformações nos horizontes Cr da área de mata e sobrepastejo, moderada alteração no horizonte Bt da área de mata, com elevadas taxas de alterações no restante dos horizontes. Portanto, os valores destes índices de intemperismo apresentaram grande variação, indicando que o intemperismo nas três áreas estudadas foi predominantemente de intensidade forte, variação grande também observada por Bela *et al.* (2023), os quais relatam que os três índices de intemperismo (CIA, PIA e CIW) indicam que

as amostras estudadas teriam sofrido uma intensidade de intemperismo baixa a forte, porém, estes autores estudaram solos formados por sedimentos, diferente deste trabalho.

O uso do índice CIW é justificado porque este é menos influenciado pela mobilidade de K nos horizontes dos solos (Santos, 2022), diferente do CIA que é mais suscetível aos processos pedogenéticos. Portanto, como o feldspato também se apresenta de forma constante nas imagens micromorfológicas (Figura 9 – imagens de 5 a 13), é sugerido por Fedo *et al.* (1995) a utilização do PIA para representar o intemperismo de perfis de solo derivados de rochas cristalinas de composições ácidas e intermediárias. Porém, neste trabalho, os resultados dos três índices não apresentaram diferenças significativas nas áreas estudadas.

6.4 Atributos mineralógicos

Foram encontrados na fração argila destes solos praticamente os mesmos minerais, pois os Planossos da área de estudo apresentam o mesmo material de origem e não apresentam diferenças expressivas dos demais fatores de formação do solo. Com uma presença grande de aluminossilicatos esmectíticos e caulíníticos. Além disso, também foram encontrados picos que identificavam grupos de ferro na forma de goetita e até mesmo oxihidróxidos de alumínio. Foram encontrados também picos característicos de quartzo e microclina, e com presença de biotita.

A curva representada na cor azul é a fornecida diretamente do difratograma (Figura 7), já a curva na cor vermelha mostra o comportamento espectral processado pelo software, e isso permite inferir que a identificação dos minerais está sendo bem retradada pelo gráfico, pois os picos nas duas cores assemelham-se.

A composição da associação argilomineral sugere importantes vias de transformações minerais. Pois as amostras do perfil de solo da área de mata mostraram evidências de duas possíveis argilas presentes (Figuras 6 e 7), um mineral mica-vermiculita e um mineral 2:1 (mica ou esmectita), refletindo o incipiente processo de intemperismo na área. Porém, há também a presença de caulinita, indicando que, por mais que as condições do ambiente favoreçam o processo de bissialitização, em eventos isolados pode ocorrer monossialitização.

A presença desses minerais também foi observada por Sousa *et al.* (2023), pois a área de estudo dos autores também favoreceu pouco intemperismo do solo. Os autores também sugerem que houve uma transformação de um mineral argiloso em outro via interestratificado

minerais.

Figura 6 – Difratomogramas de raios X da fração argila, tratada com peróxido de hidrogênio e ditionito citrato bicarbonatado, do horizonte Bt da área de mata com picos aluminossilicatos sódio magnesianos

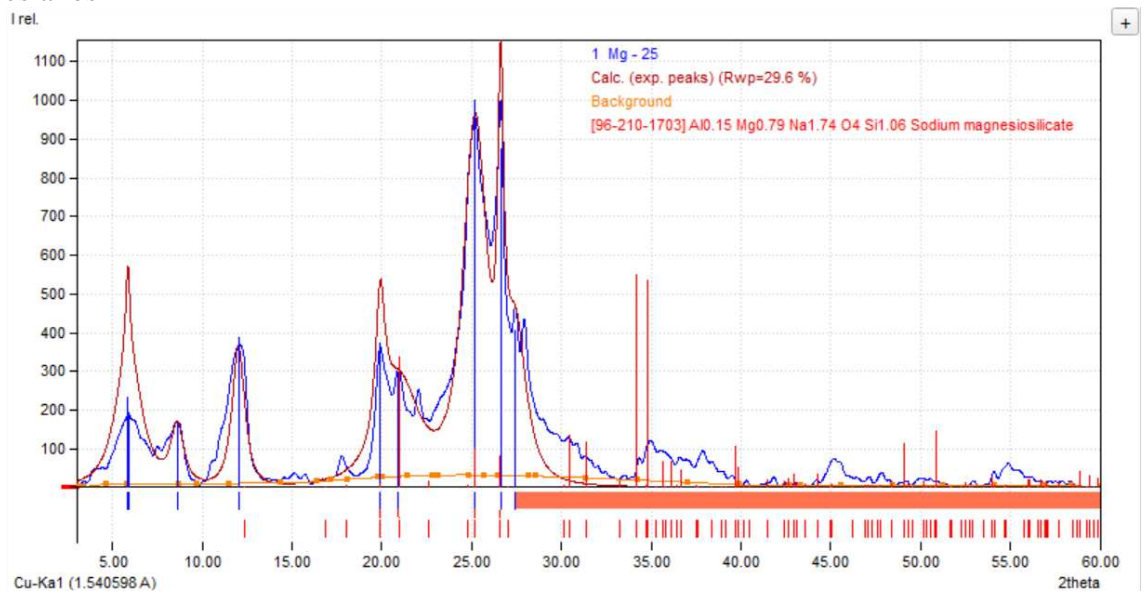
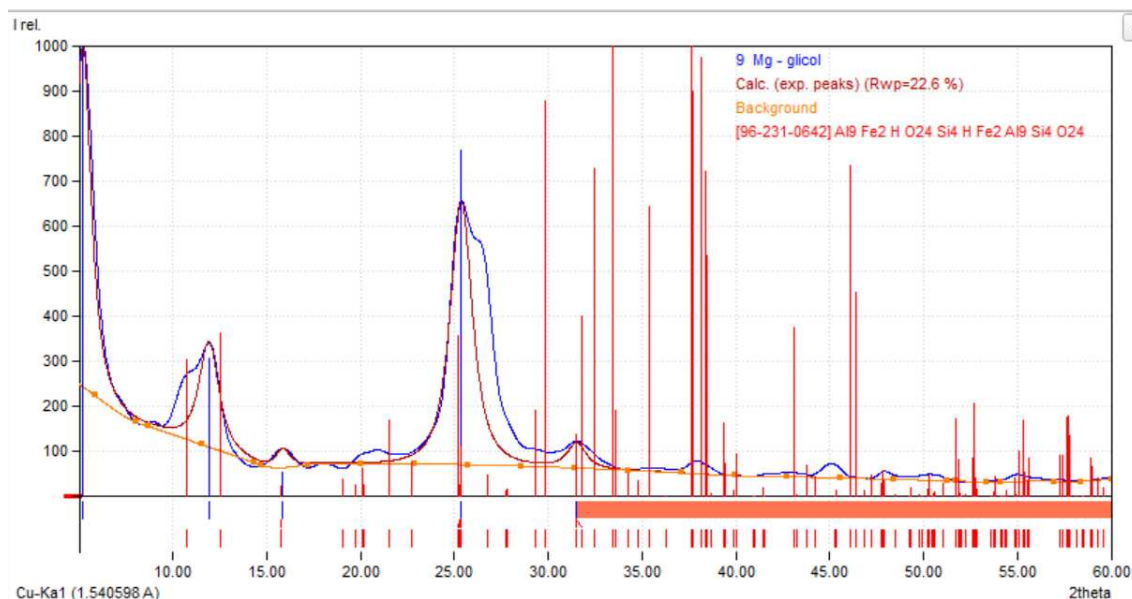


Figura 7 – Difratomogramas de raios X da fração argila, tratada com peróxido de hidrogênio e ditionito citrato bicarbonatado, do horizonte Bt da área de mata com picos aluminossilicatos de ferro



6.5 Atributos micromorfológicos

Os resultados apontam consideráveis diferenças em alguns atributos micromorfológicos nos Planossolos das áreas estudadas, porém, principalmente no que diz respeito às proporções de material fino, grosso e poros e feições pedológicas (Tabela 5). Tais diferenças denotam que houve ações pedogenéticas distintas, ou intensidade diferente de determinados processos pedogenéticos nestes perfis, indicando influência do tipo de manejo utilizado nos solos estudados.

Com as porcentagens dos constituintes principais dos perfis (Tabela 5) é possível observar que há uma porosidade menor nos horizontes superficiais da área sobrepastejada em relação a de pousio e mata, estas apresentando vários poros em canais formados por raízes, evidenciado na imagem micromorfológica (Figura 9- imagem 2). Este fato ocorre principalmente devido ao maior aporte de matéria orgânica nas áreas de mata e pousio refletidos nos valores de COT (Tabela 3), e pela compactação no solo causada pelo pisoteio excessivo na área sobrepastejada. As imagens micromorfológicas corroboram o que foi encontrado nas análises físicas no que diz respeito a densidade do solo e porosidade do solo (Tabela 2).

Tabela 5 – Atributos micromorfológicos das áreas de mata, pousio e sobrepastejo

HORIZONTES	CP(%)	DR	FB	FEIÇÕES PEDOLÓGICAS	TIPOS DE POROS	MICROESTRUTURA
PLANOSSOLOS NÁTRICOS Órticos típicos (Mata)						
Ap	MG=65; MF=10; P=25	Mônica	Ausente	Excrementos raros em formato esférico com cavidades biológicas abundantes formadas por raízes;	Empilhamento simples, canais abundantes	Grão simples, apédicas
Bt1	MG=45; MF=40; P=15	Porfiro-quitônica	Estriada paralela	Feições texturais de revestimento (capeamento) abundantes com ferriargilãs. Nódulos agregados abundantes.	Poros integrados como canais, com cavidades; com fissuras	Complexa sem agregados e com porosidade textural de grãos revestidos
Cr	MG=70; MF=20; P=10	Porfírica	Salpicada	Feições de revestimento raras; Abundante material em alteração linear cruzada e paralela.	Poros de empilhamento com cavidades e fissuras.	Complexa sem agregados e com eventual porosidade textural de grãos revestidos
PLANOSSOLOS HÁPLICOS Eutróficos solódicos (Pousio)						
Ap	MG=55; MF=15; P=30	Mônica	Indiferenciada	Excrementos raros em formato esférico com cavidades biológicas formadas por raízes;	Empilhamento simples, canais abundantes	Complexa com grão simples e material fino.
Bt1	MG=50; MF=30; P=20	Porfiro-quitônica	Estriada paralela	Feições texturais de revestimento (capeamento) abundantes com ferriargilãs; nódulos agregados abundantes.	Poros integrados como canais, com cavidades; com fissuras	Complexa sem agregados e com porosidade textural de grãos revestidos
Cr	MG=65; MF=15; P=20	Porfírica	Salpicada	Feições de revestimento raras; Abundante material em alteração linear cruzada e paralela.	Poros de empilhamento com cavidades e fissuras.	Complexa sem agregados e com eventual porosidade textural de grãos revestidos

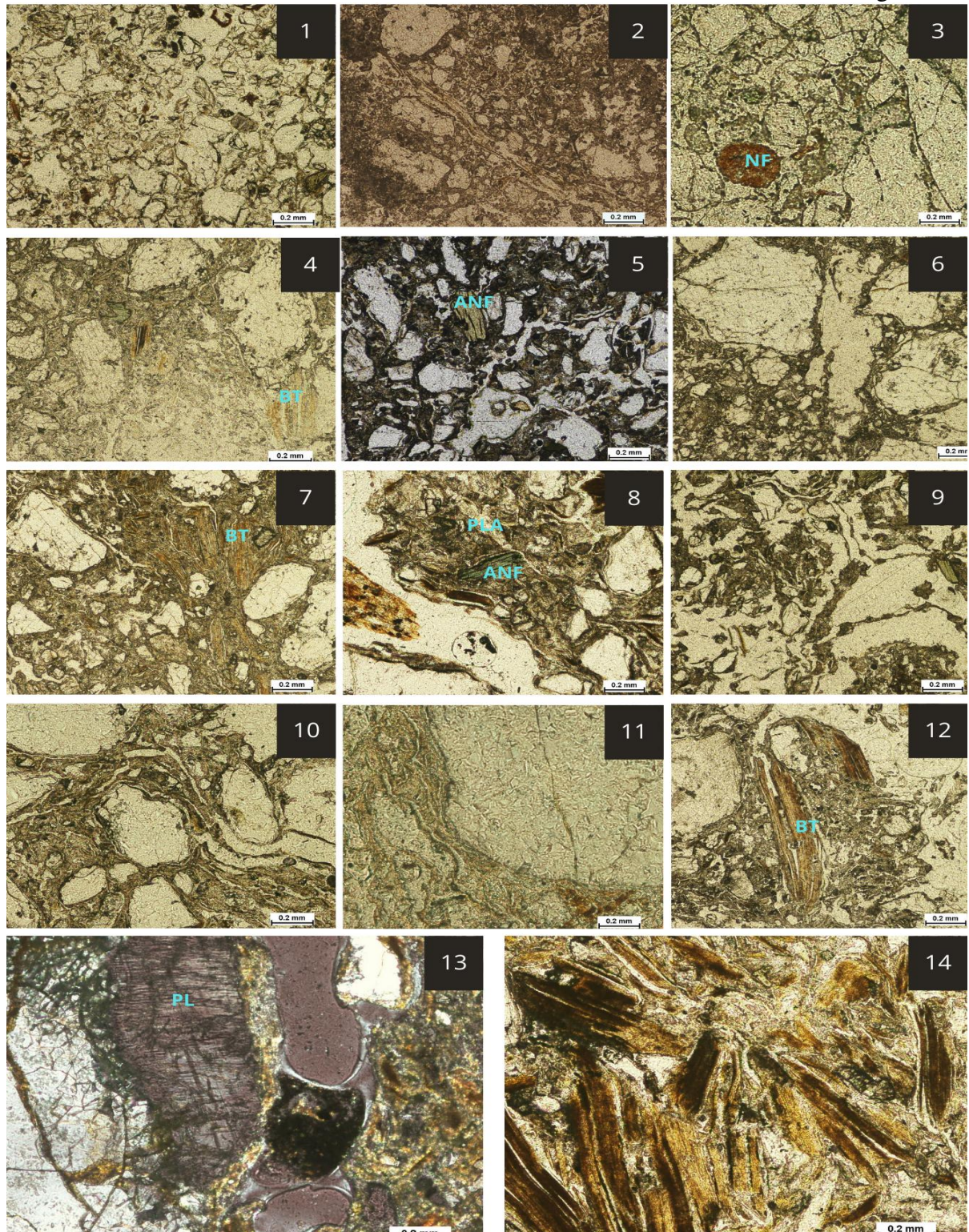
Continua

Tabela 5 – Atributos micromorfológicos das áreas de mata, pousio e sobrepastejo

HORIZONTES	CP(%)	DR	FB	FEIÇÕES PEDOLÓGICAS	TIPOS DE POROS	MICROESTRUTURA
PLANOSSOLOS NÁTRICOS Órticos salinos (Sobrepastejo)						
AE	MG=80; MF=5; P=15	Porfírica	Ausente	Cavidades biológicas raras, Enchimento contínuo de areia e silte, em cavidade biológica. Presença rara de nódulos de ferro agregado.	Empilhamento simples, canais raros	Grão simples
Bt1	MG=65; MF=25; P=10	Pórfiro-quitônica	Estriada paralela	Feições texturais de revestimento (capeamento) numerosa com ferriargilãs; nódulos agregados abundantes.	Poros integrados como canais, com cavidades; com fissuras	Complexa sem agregados e com porosidade textural de grãos revestidos
Cr	MG=70; MF=10; P=20	Porfírica	Salpicada	Ausente; com material em alteração linear cruzada e paralela.	Poros de empilhamento com cavidades e fissuras.	Complexa sem agregados e com eventual porosidade textural de grãos revestidos

Nota: CP: Componentes principais; DR: Distribuição relativa; FB; MG: Material grosso; MF: Material Fino; P: Porosidade.

Figura 8 – Fotomicrografias (10×) do horizonte Ap das áreas de mata (1) e pousio (2) e AE do sobrepastejo (3); os horizontes Bt das áreas de mata (4), pousio (5) e sobrepastejo (6); os horizontes Cr das áreas de mata (7), pousio (8) e sobrepastejo (9); deposição difusa de argila nas partículas no horizonte Bt da área de mata (10); grão de quartzo com deposição de argila no horizonte Bt do sobrepastejo (11); conjunto de biotita sendo intemperizada no horizonte Cr da área de mata (12); plagioclásio se desintegrando no horizonte Cr da área de pousio (13); biotita em formato de bastão se desintegrando. NF = Nódulo de alteração; ANF = Anfibólio; BT = Biotita; PL = Plagioclásio.



Fonte: Autor

Nas imagens dos horizontes superficiais (Figura 8- imagens 1 a 3) é notável a grande quantidade de material grosso em todos os perfis, porém, com maiores porcentagens na área em sobrepastejo, corroborando com os teores de areia encontrado (Tabela 2). A constituição deste material grosso é de partículas de quartzo, com raras presenças de nódulos de alteração no horizonte Ap da área sobrepastejada. O predomínio de material grosso acontece provavelmente devido ao processo de eluviação ou mesmo devido à erosão. Este processo é intensificado na área sobrepastejada devido à ausência de cobertura vegetal e, conseqüentemente maior exposição aos agentes do intemperismo.

Nos horizontes Bt de todos os perfis (Figura 9- imagens de 4 a 6) há uma diminuição no material grosso e aumento do material fino, como esperado pela relação textural (Tabela 2), com evidências do processo de argilação (formação de argila *in situ*), pois, apesar de haver deposição de argila nas partículas/ grãos de quartzo do horizonte Bt (Figura 8- imagem 9), esta argila não está orientada de forma nítida. Sousa *et al.* (2023) relatam comportamento semelhante do material grosso e fino do horizonte superficial para o Bt, e destacam que não houve evidências de argiluviação devido a ausência de filmes de argila sobre partículas de material grosso, semelhante ao obtido no trabalho em questão.

A porcentagem do constituinte fino diminui e do material grosso aumenta novamente na mudança do horizonte Bt para o Cr. Isto ocorre devido a grande presença de fragmentos de rocha e materiais inalterados neste horizonte. O quartzo é o principal mineral na fração grosseira, não só deste horizonte mas de todos, seguido por feldspatos, biotita, anfibólio. Um aumento no material grosso no horizonte Cr e predomínio de minerais de quartzo nesta fração também foi observado por Neves *et al.* (2023) e Sousa *et al.* (2023), e esta ligação nos fatos deve ser por que todos os solos derivam do mesmo material de origem que, no caso é gnaiss.

O padrão de distribuição relativa apresentou-se semelhante em todos os perfis estudados, sendo mênica nos horizontes superficiais, porfiro-quitônica nos horizontes Bt e porfírica no horizonte Cr (Tabela 5). Estes resultados corroboram a maior quantidade de areia nos horizontes superficiais encontrados nas análises físicas (Tabela 2), e a maior quantidade de argila no horizonte de subseqüente Bt. Já a distribuição do horizonte Cr é devido a grande quantidade de material grosseiro incrustados em uma massa de argila neoformada.

Nos horizontes Bt de todas as áreas estudadas foram encontradas feições pedológicas de texturais de revestimento difusa em diversas partículas (Figura 8- imagens 3 e 4). Este fenômeno indica que houve uma leve deposição de argila, porém, com evidências marcantes de vários minerais em alteração, se transformando em argila. Portanto, o acúmulo de

argila para formação do gradiente textural nos horizontes Bt é preferencialmente pelo processo de argilação, porém, é importante ressaltar que o processo de argiluviação também acontece em paralelo, mas com menor intensidade. Semelhante ao que foi observado por Sousa *et al.* (2020), Câmara *et al.* (2021) e Neves *et al.* (2023), os quais relatam que o acúmulo de argila em subsuperfície ocorreu principalmente através da formação de argila *in situ* (argilação) não apresentando feições de argiluviação.

É possível observar que os horizontes Cr da mata e do pousio apresentam maior quantidade de minerais em alteração em relação ao sobrepastejo (Figura 8 – imagem 7). Isto significa que, apesar do período de 20 anos ser relativamente insuficiente para influenciar no intemperismo, provavelmente, o manejo está interferindo de alguma forma na intensidade do intemperismo nestas áreas, pois, o pisoteio excessivo provoca a compactação do solo, promovendo um maior escoamento superficial e a diminuição na taxa de percolação da água. E a ausência de água no perfil minimiza a ação do principal processo químico de intemperismo que é a hidrólise. Neves *et al.* (2023) reforçam que a alteração preferencial da biotita no saprolito provoca a formação de microfissuras, nas quais há penetração de água e posterior alteração do plagioclásio. Egli *et al.* (2024) concluíram também que baixas taxas de intemperismo podem estar ligadas a perturbações, sejam elas naturais ou induzidas antropogenicamente, indicando alta dinâmica do solo como erosão.

Os minerais primários de quartzo, devido à sua natureza resistente aos agentes do intemperismo, não apresentaram alterações significativas e não ocasionam transformação em minerais secundários. A maioria dos feldspatos está sofrendo algum tipo de alteração com grau de alteração classe 1 a 3 (ligeira a moderada alteração), que significa médio grau, segundo Stoops *et al.* (1979) (Figura 3- imagem 13). Já a biotita apresentou grande variação no grau de alteração que ia de 0 a 4 (incipiente a moderada alteração), principalmente no horizonte Cr e Bt, (Figura 8- imagens 12 a 14). Foram encontradas também biotita alterada para um material secundário fino, com oxidação do ferro em hematita conferindo coloração avermelhada. A maior alteração observada na biotita é explicada por Santos *et al.* (2022), os quais relatam ser um mineral bem suscetível ao intemperismo e não foi preservado em nenhum dos perfis estudados.

As condições geomorfoclimáticas do local de estudo favoreceram preferencialmente o processo de bisialitização nos Planossolos, promovendo a formação principalmente de minerais esmectíticos e vermiculita. Com a argilação sendo o principal processo para a formação de gradiente textural nestes solos evidenciadas nas imagens micromorfológicas. Câmara *et al.* (2021) relatam que o Luvissole estudado por eles também

apresentaram o processo de bissialitização predominante, porém, o principal processo de formação de argila é argilação, mas que, a monossialização é um processo que tem sido associado ao processo de argilação em Luvisolos.

7 CONCLUSÃO

A gênese dos Planossolos derivados de rochas gnáissicas em áreas semiáridas em processo de desertificação, sob diferentes manejos, revelou a dominância do processo de argilação no desenvolvimento do horizonte B. A preservação de minerais primários intemperizáveis no horizonte B indica a influência da rocha de origem nos atributos desses solos. Os diferentes manejos induziram distintas taxas de desenvolvimento de horizontes superficiais, com maior desenvolvimento em áreas sob vegetação nativa e pousio. Por outro lado, os índices do grau de intemperismo não foram fortemente influenciados pelos tipos de manejo. Os resultados deste estudo contribuem para a compreensão dos processos de formação e evolução dos Planossolos em ambientes áridos e semiáridos sob processo de desertificação, destacando a importância da rocha de origem e do manejo do solo na pedogênese desses solos. No entanto, os resultados obtidos neste estudo não devem ser generalizados para outras regiões com diferentes condições climáticas e geológicas. Estudos futuros devem investigar a influência de diferentes tipos de cobertura vegetal e de práticas de manejo na dinâmica da matéria orgânica e na estabilidade dos agregados em Planossolos.

REFERÊNCIAS

- ADEKIYA, A. O.; AREMU, C.; AGBEDE, T. M.; OLAYANJU, A.; EJUE, W. S.; ADEGBITE, K. A.; OLAYIWOLA, I. E.; AJIBOYE, B.; ONI, A. T. Soil productivity improvement under different fallow types on Alfisol of a derived savanna ecology of Nigeria. *Heliyon*, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 06759, abr. 2021. **Elsevier BV**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06759>.
- AHR, S. W.; NORDT, L. C.; FORMAN, S. L. Soil genesis, optical dating, and geochronological evaluation of two upland Alfisol pedons within the Tertiary Gulf Coastal Plain. **Geoderma**. p. 211–226, 2013.
- ALEKSEEV, A.; ALEKSEEVA, T.; KALININ, P.; HAJNOS, M. Soils response to the land use and soil climatic gradients at ecosystem scale: Mineralogical and geochemical data. **Soil and Tillage Research**. Vol. 180, p. 38-47, 2018.
- AMEIJEIRAS-MARINO, Y.; OPFERGELT, S.; SCHOONEJANS, J.; VANACKER, V.; SONNET, P.; JONG, J.; DELMELLE, P. Impact of low denudation rates on soil chemical weathering intensity: a multiproxy approach. **Chemistry Geology**. p. 72–84, 2017.
- ARAÚJO FILHO, J. A.; SILVA, N. L. Impactos e mitigação do antropismo no núcleo de desertificação de Irauçuba-CE. *In*: OLIVEIRA, J. G. B.; SALES, M. C. L. (Organizadores). **Monitoramento da desertificação em Irauçuba**. Fortaleza: Imprensa Universitária, p.21-42, 2015.
- ARAÚJO, J. A.; SOUZA, R. F.; Abordagens sobre o processo de desertificação: uma revisão das evidências no rio grande do norte. **Geosul**, Florianópolis, v. 32, n. 65, p. 122-143, 2017.
- ASSEFA, E., HANS-RUDOLF, B. Farmers' perception of land degradation and traditional knowledge in Southern Ethiopia resilience and stability. **Land Degraded**. Dev. 27, p. 1552–1561, 2016.
- BADÍA, D., MARTÍ, C., AZNAR, J.M., LEÓN, J. Influence of slope and parent rock on soil genesis and classification in semi-arid mountainous environments. **Geoderma** 193, p. 13–21, 2013.
- BARDGETT, R. D.; BULLOCK, J. M.; LAVOREL, S.; MANNING, P.; SCHAFFNER, U.; OSTLE, N.; CHOMEL, M.; DURIGAN, Ç.; FRY, E. L.; JOHNSON, D.; LAVALLEE, J. M.; LE PROVOST, G.; LUO, S.; PNG, K.; SANKARAN, M.; HOU, X.; ZHOU, H.; MA, LI; REN, W.; LI, X.; DING, Y.; LI, Y.; SHI, H. Combatting global grassland degradation. **Nature Reviews Earth & Environment**, 2, p. 720-735, 2021. <http://dx.doi.org/10.1038/s43017-021-00207-2>
- BAUWHEDE, R. Y. D.; MUYS, B.; VANCAMPENHOUT, K.; SMOLDERS, E. Accelerated weathering of silicate rock dusts predicts the slow-release liming in soils depending on rock mineralogy, soil acidity, and test methodology. **Geoderma**, [s. l.], v. 441, p. 116734, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116734>

BELA, V. A.; BESSA, A. Z. E.; ARMSTRONG-ALTRIN, J. S.; KAMANI, F. A.; NYA, E. D. B.; NGUEUTCHOUA, G. Provenance of clastic sediments: a case study from cameroon, central africa. **Solid Earth Sciences**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 105-122, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sesci.2023.03.002>.

BELLISANO, H.; DEMATÊ, J. A. M.; ROMEIRO, S. A. Soil spectral library and its use in soil Classification. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** [s. l.], v. 34, p 861-870, 2010.

BESTELMEYER, B.T.; OKIN, G.S.; DUNIWAY, M.C.; ARCHER, S.R.; SAYRE, N.F.; WILLIAMSON, J.C.; HERRICK, J.E. Desertification, land use, and the transformation of global drylands. **Frontiers in Ecology and the Environment**. p. 28–36, 2015.

BÖHLERT, R., MIRABELLA, A., PLÖTZE, M., EGLI, M. Landscape evolution in Val Mulix, eastern Swiss Alps — soil chemical and mineralogical analyses as age proxies. **Catena**. p. 313–325, 2011.

BREWER, R. Fabric and mineral analysis of soils. New York: **Robert E. Krieger Publishing Company**, 1976. 482 p.

BULLOCK, P.; THOMPSON, M.L. Micromorphology of Alfisols. *In*: THOMPSON, M.L., org. **Soil micromorphology and soil classification**. Madson, Soil Science Society of America. p.17-47, 1985.

CÂMARA, E. R. G. **Caracterização e pedogênese de Luvisolos e Planossolos no núcleo de desertificação de Cabrobó, Pernambuco**. 115p. Recife-PE, 2016 (Dissertação).

CÂMARA, E. R. G.; DOS SANTOS, J. C. B.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SCHULZE, S. M. B. B.; CORRÊA, M. M.; TIAGO OSORIO FERREIRA, T. O.; SOUSA, J. E. S.; DE SOUZA JÚNIOR, V. S. Parent rock–pedogenesis relationship: How the weathering of metamorphic rocks influences the genesis of Planosols and Luvisols under a semiarid climate in NE Brazil. **Geoderma**. 385, p.114878, 2021.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil. Brasília, DF: 252p, 2016.

CHILLO, V., OJEDA, R. A., CAPMOURTERES, V., ANAND, M. Functional diversity loss with increasing livestock grazing intensity in drylands: the mechanisms and their consequences depend on the taxa. **Journal of Applied Ecology**. 54, p. 986–996, 2017.

CURI, N.; FRANZMEIER, D.P. Toposequence of Oxisols from the Central Plateau of Brazil. **Soil Science Sociedad. Am. J.**, 48: p. 341-346, 1984.

DAHMS, D., EGLI, M. Carbonate and elemental accumulation rates in arid soils of mid-to-late Pleistocene outwash terraces, southeastern Wind River Range, Wyoming, USA. **Chemistry Geological**. 446, 147–162, 2016.

DOROSHKIEVYCH, S.P., MATWIISHYNA, ZH.N. Natural conditions in Vitachev time (about 50 thousand years ago) in the Middle Pobuzhye based on the study of paleosoils (in Ukrainian). **Geopolitika i ekogeodinamika region**, v 10 (1), p. 521–528, 2014.

DOSSETO, A.; HANNAN-JOYNER, A.; RAINES, E.; GAYER, E.; MICHON, L. Geochemical evolution of soils on Reunion Island. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. 318, p. 263 – 278, 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. Rio de Janeiro, 577p., 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SIBCS)**. 5 ed. Ver. Ampl. – Brasília-DF, p. 85-105, 2018.

EGLI, M., FITZE, P., MIRABELLA, A. Weathering and evolution of soils formed on granitic, glacial deposits: results from chronosequences of Swiss alpine environments. **Catena** 45, p. 19–47, 2001.

FACHIN, P. A.; COSTA, Y. T.; THOMAZ, E. L. Evolution of the soil chemical properties in slash-and-burn agriculture along several years of fallow. **Science of The Total Environment**, 2020.

FEDO, C.M., YOUNG, G.M., NESBITT, H.W., HANCHAR, J.M., 1997. Potassic and sodic metasomatism in the southern province of the Canadian shield: evidence from the Paleoproterozoic serpent formation Huronian supergroup, Canada. **Precambrian Research**. 84, 17–36. [https://doi.org/10.1016/S03019268\(96\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S03019268(96)00058-7), 1997.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. Healthy soils for people and the planet: FAO calls for reversal of soil degradation. Roma/Berlim, 2022.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. Status of the World's Soil Resources. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy, 2015.

FERREIRA, M. P. S.; ARTUR, A. G; QUEIROZ, H. M; ROMERO, R. E.; COSTA, M. C. G. Changes in attributes of soils subjected to fallow in desertification hotspot. **Revista Ciência Agronômica**, vol.49, Fortaleza, 2018.

FILHO, J. F.; SOUZA, A. L. V. O manejo e a conservação do solo no Semiárido baiano: desafios para a sustentabilidade. Bahia, **Agrícola**. v.7, n.3, 2006.

FÖLLMI, K.B., ARN, K., HOSEIN, R., ADATTE, T., STEINMANN, P. Biogeochemical weathering in sedimentary chronosequences of the Rhône and Oberaar Glaciers (Swiss Alps): rates and mechanisms of biotite weathering. **Geoderma**, 151, p. 270–281, 2009.

FUJII, K.; HAYAKAWA, C. Fluxes of dissolved organic matter and nitrate and their contribution to soil acidification across changing permafrost landscapes in northwestern Canada. **Geoderma**, [s. l.], v. 430, p. 116306. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116306>. Fev. 2023.

GAITAN, J.J., BRAN, D.E., OLIVA, G.E., AGUIAR, M.R., BUONO, G.G., FERRANTE, D., NAKAMATSU, V., CIARI, G., SALOMONE, J.M., MASSARA, V., MARTINEZ, G.G.,

MAESTRE, F.T. Aridity and overgrazing have convergent effects on ecosystem structure and functioning in Patagonian rangelands. **Land Degradation e Development**. 29, p. 210–218, 2017.

GARCIA-ORENES, F., ROLDAN, A., MATAIX-SOLERA, J., CERDA, A., CAMPOY, M., ARCENEGUI, V., CARAVACA, F. Soil structural stability and erosion rates influenced by agricultural management practices in a semi-arid Mediterranean agro-ecosystem. **Soil use and Mang.** 28, p. 571–579, 2012.

GE, X., DONG, K., LULOFF, A.E., WANG, L., XIAO, J., WANG, S., WANG, Q. Correlation between landscape fragmentation and sandy desertification: a case study in Horqin Sandy Land, China. **Environmental Monitoring and Assessment**. V. 188, 62p, 2015.

GREENE-KELLY, R. The identification of montmorillonitoids in clays. **European Journal of Soil Science**. 4, p. 233-237, 1953.

GOLDBERG, H.; HUMAYUN, M. The applicability of the Chemical Index of Alteration as a paleoclimatic indicator: An example from the Permian of the Paraná Basin, Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**. Vol. 293, p. 175-183, 2010.

GUNAL, H.; RANSOM, M.D. Genesis and micromorphology of loess-derived soils from central Kansas. **Catena**. p. 222–236, 2006.

GUO, B.; WEI, C.; YU, Y.; LIU, Y.; LI, J.; MENG, C.; CAI, Y. The dominant influencing factors of desertification changes in the source region of Yellow River: climate change or human activity? **Science total Environment**. 813, p. 152512, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152512>.

HEIDARI, A.; OSAT, M.; KONYUSHKOVA, M. Geochemical indices as efficient tools for assessing the soil weathering status in relation to soil taxonomic classes. **Catena**. 208, 2022. 105716. [10.1016/j.catena.2021.105716](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105716).

HOLMGREN, G. G. S. A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure. **Soil Science Society**. Am. Pro. 31, p. 210–211, 1967.

HUANG, J.; ZHANG, G.; ZHANG, Y.; GUAN, X.; WEI, Y.; GUO, R. Global desertification vulnerability to climate change and human activities. **Land Degradation e Development**. 31, p. 1380–1391. 2020. <https://doi.org/10.1002/ldr.3556>.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ – IPECE. Perfil Básico Municipal de Irauçuba. Fortaleza-CE, 18p. 2014.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGICA ECONÔMICA DO CEARÁ - IPECE. Perfil municipal de Irauçuba. Disponível em http://www.ipece.ce.gov.br/perfil_basico_municipal/2017/Iraucuba.pdf Acesso em 05 de Dez., 2019.

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. p. 234, 2022.

IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources. World Soil Resources Reports 106. FAO, Rome, 2015.

JARBAS, T.; SÁ, I.B.; PETRERE, V.G.; TAURA, T.A. **Ageitec – Agência Embrapa de Informação Tecnológica.** Planossolos. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_caatinga/arvore/CONT000g5twggzh02wx5ok01edq5s189t6ux.html. Acesso em: 16 de abril de 2024.

JULLERET, J.; DONDEYNE, S.; VANCAMPENHOUT, K.; DECKERS, J.; HISSLER, C. Mind the gap: a classification system of integrating the *subsolum* into soil surveys. **Geoderma**, p. 332-339, 2016.

KAMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução do solo (pedogenese). In: KER, J.C.; CURI, N.; SCHAEFER, C.E.; VIDAL TORRADO, P. (Eds.), **Pedologia: fundamentos.** SBCS, Vicosa, p. 207–302, 2012.

KOOP, A. N.; HIRNASB, D. R.; SULLIVAN, P. L.; MOHAMMED, A. K. A. Generalizable index of soil development. **Geoderma**. p. 360, 2020.

LEINZ, V.; CAMPOS, J. E. S. **Guia de determinação de minerais.** São Paulo, Nacional. 149p., 1979.

LEPSCH, I. F. **19 Lições de pedologia.** São Paulo: Oficina de textos, p.408-436, 2011.

LI, J.; LUO, B.; WEI, X.; CI, En; NI, J.; WEI, C.; ZHONG, S. Transportation of fine particles controlled by particles flocculation is a key feature of soil erosion on gentle slope land. **Catena**, [s. l.], v. 232, p. 107382, nov. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2023.107382>.

LI, Z.; SCHNEIDER, R. L.; MORREALEC, S. J.; XIEA, M.; LIB, C. Woody organic amendments for retaining soil water, improving soil properties and enhancing plant growth in desertified soils of Ningxia, China. **Geoderma**, 310, p. 143–152, 2018.

LIMA A. Y. V.; CHERUBIN, M. R.; SILVA, D. F.; MOTA, J. C. A.; SILVA, F. G. M.; ARAUJO, A. S. F.; MELO, V. M. M.; VERMA, J. P.; DE ARAÚJO PEREIRA, A. P. Grazing exclusion restores soil health in Brazilian drylands under desertification process. **Applied Soil Ecology**. 2024 <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105107>.

LUSTOSA, J. P. G. SIGOLO, J. B.; NASCIMENTO, N. R. Caracterização morfológica, micromorfológica e mineralógica de três toposequências no município de Irauçuba-CE e suas relações com os processos de desertificação. In: OLIVEIRA, J. G. B.; SALES. M. C. L. (Organizadores). **Monitoramento da desertificação em Irauçuba.** Fortaleza: Imprensa Universitária, p.21-42, 2015.

MAO, Hai-Ruo; COTRUFO, M. F.; HART, S. C.; SULLIVAN, B. W.; ZHU, X.; ZHANG, J.; LIANG, C.; ZHU, M. Dual role of silt and clay in the formation and accrual of stabilized soil

organic carbon. **Soil Biology And Biochemistry**, [s. l.], v. 192, p. 109390, maio 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109390>.

MALOBANE, M.; NCIIZAH, A. D.; MUDAU, F. N.; WAKINDIKI, I. I. C. Discrimination of soil aggregates using micro-focus X-ray computed tomography in a five-year-old no-till natural fallow and conventional tillage in South Africa. **Heliyon**, [s. l.], v. 5, n. 5, p. 01819, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01819>.

MASHA, M.; BOJAGO, E. Evaluating soil erosion and determinants of farmers' adoption of soil and water conservation measures in the Offa district, southern Ethiopia. **Journal Of Agriculture And Food Research**, [s. l.], v. 14, p. 100866, dez. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100866>.

MATVIISHYNA, Z.; PARKHOMENKO, A.S. **Palaeopedological analysis**. In: MAKAROWICZ, P.; LYSENKO, S.D.; KOCHKIN, I.T. (Eds.), Bukivna. An Elite Necropolis of the Komarów Culture on the Dniester River Basin, Archaeologia Bimaris, Monographies. Institute of Archaeology AMU, Poznań (in press), 2019.

MAVRIS, C.; PLÖTZE, M.; MIRABELLA, A.; GIACCAI, D.; VALBOA, G.; EGLI, M. Clay mineral evolution along a soil chronosequence in an Alpine proglacial area. **Geoderma** 165, p. 106–117, 2011.

MCKEAGUE, J. A.; DAY, J. H. Dithionite- and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. **Canadian Journal of Soil Science**. p. 13–22, 1966.

MELO FILHO, J. F. de; SOUZA, A. L. V. O manejo e a conservação do solo no semi-árido baiano: desafios para a sustentabilidade. **Revista Bahia Agrícola**, v.7, n.3, 2006.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**. p. 317-327, 1960.

MIAO, R., SONG, Y., SUN, Z., GUO, M., ZHOU, Z., LIU, Y. Banco de sementes de solo e planta desenvolvimento comunitário na restauração passiva de pastagens arenosas degradadas. **Sustentabilidade** 8, p. 1-8, 2016.

MOAZALLAHI, M., FARPOOR, M.H. Soil genesis and clay mineralogy along the xericaridic climotoposequence in South Central Iran. **Journal of Agricultural Science and Technology**. p. 683–696, 2012.

MONTANARI, R.; JÚNIOR, J. M.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, Z. M.; CAMARGO, L. A. Caracterização mineralógica de Latossolos em diferentes feições do relevo na região de Jaboticabal, SP. **Revista Ciencia Agronomica**. p. 191-199, 2010.

MUSSO, A.; LAMORSKI, K.; SŁAWIŃSKI, C.; GEITNER, C.; HUNT, A.; GREINWALD, K.; EGLI, M. Evolution of soil pores and their characteristics in a siliceous and calcareous proglacial área. **Catena**, 2019.

NAZARPOUR, A.; OMRAN, N. R.; PAYDAR, G. R.; SADEGHI, B.; MATROUDD, F.; NEJAD, A. M. Application of classical statistics, logratio transformation and multifractal

approaches to delineate geochemical anomalies in the Zarshuran gold district, NW Iran. *Geochemistry*, V. 75, p. 117-132, 2015.

NESBITT, H.W., YOUNG, G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*. p. 715–717, 1982.

NEVES, L. V. de M. W.; SOUSA, J. E. S. de; SANTOS, J. C. B.; ARAÚJO FILHO, J. C.; CORRÊA, M. M.; SOUSA, M. G.; FRACETTO, F. J. C.; FRACETTO, Giselle Gomes Monteiro; ARAUJO, J. K. S.; FREIRE, G. A. P.; FERREIRA, T. O.; JUNIOR, W. S. S. Weathering of gneiss saprolites and formation of Planosols under semiarid climate (NE Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, [s. l.], v. 123, p. 104206, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104206>. Oliveira, João Bertoldo de. *Pedologia aplicada*. Jaboticabal - SP: FUNEP-UNESP; 2001. p. 414 .

OLIVEIRA, L.B. **Mineralogia, micromorfologia, gênese e classificação de Luvisolos e Planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas no semi-árido do Nordeste Brasileiro**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 169p, 2007. (Tese de Doutorado)

ONU News. Terras degradadas no mundo. Disponível em <https://news.un.org/pt/audio/2015/12/1156131> Acesso em 15 de Nov., 2019.

OZAYTEKIN, H.H.; MUTLU, H.H.; DEDEOGLU, M. Soil formation on a calcic chronosequence of Ancient Lake Konya in Central Anatolia, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*. p. 66–74, 2012.

PANERU, P.; MAHARJAN, S.; DEVKOTA, A.; SHRESTHA, B. B. Impacts of grazing exclusion on soil and vegetation of *Parthenium hysterophorus* invaded subtropical grassland in south-central Nepal. *Acta Ecologica Sinica*, [s. l.], v. 43, n. 6, p. 1029-1037. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chnaes.2023.02.008>. 2023.

PARAHYBA, R. B. V.; SANTOS, M. C.; ROLIM NETO, F. C. Evolução quantitativa de Planossolos do agreste do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*. p. 991-999, 2009.

PARAHYBA, R. B. V.; SANTOS, M. C.; ROLIM NETO, F. C.; JACOMINE, P. K. T. Pedogênese de Planossolos em topossequência do agreste Pernambucano. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*. p. 1991-2000, 2010.

PASQUINI, A.I., CAMPODONICO, V.A., ROUZAUT, S. AND GIAMPAOLI, V. Geochemistry of a soil catena developed from loess deposits in a semiarid environment, Sierra Chica de Córdoba, central Argentina. *Geoderma* 295, p. 53-68, 2017.

PELAK, N.; PORPORATO, A. Dynamic evolution of the soil pore size distribution and its connection to soil management and biogeochemical processes. *Advances in Water Resources* p.131, 2019.

PRAVALIE, R. Drylands extent and environmental issues. A global approach. *Journal of Earth Science*. 161, p. 259–278, 2016.

QUENARD, L., SAMOUELIAN, A., LAROCHE, B., CORNU, S. Lessivage as a major process of soil formation: a revisitation of existing data. *Geoderma*. p.135–147, 2011.

RAB, M.A., HALING, R.E., AARONS, S.R., HANNAH, M., YOUNG, I.M., GIBSON, D. Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils. **Geoderma** 213, p. 460–470, 2014.

RANST, E. V.; TOLOSSA, A. R.; DUMON, M.; CORNELIS, J. T.; DECKERS, J. **On the origino of Planosols** – the process of ferrollysis revisited. In: World Congress of Soil Science, Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. Brisbane, Austrália. 2010.

ROHDE, G; M . A geoquímica ambiental. In: **Geoquímica ambiental e estudos de Impacto**. 2 ed. São Paulo: Signus. p. 36-45, 2004.

ROSIN, N. A.; DEMATTÊ, J. A. M.; POPPIEL, R. R.; SILVERO, N. E. Q.; RODRIGUEZ-ALBARRACIN, H. S.; ROSAS, J. T. F.; GRESCHUK, L. T.; BELLINASO, H.; MINASNY, B.; GOMEZ, C.; MARQUES JÚNIOR, J. FERNANDES, K. Mapping Brazilian soil mineralogy using proximal and remote sensing data. **Geoderma**. v. 432, 116414, 2023.

SACRAMENTO, J. A. A. S.; SANTOS, J. A. G.; COSTA, O. V.; MOREIRA, L. J. S.; COVA, A. M. W.; BOMFIM, M. R. Chemical, physical and mineralogical attributes of the soils of the Sertanejo pediplain in the sisal-growing areas of the semiarid Bahia. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina. p. 17-32, 2019.

SALES, M. C. L.; OLIVEIRA, J. G. B. Análise da degradação ambiental no núcleo de desertificação de Irauçuba. In: **Litoral e sertão: natureza e sociedade no nordeste brasileiro**. Fortaleza: Expressão Gráfica, 408 p, 2006.

SANTOS, J.C.B.; LE PERA, E.; JUNIOR SOUZA, V.S.; CORREA, M.M.; AZEVEDO, A.C. Gneiss saprolite weathering and soil genesis along an east-west regolith sequence (NE Brazil). **Catena**. p. 279–290, 2017.

SANTOS, J.C.B.; LE PERA, E.; OLIVEIRA, C. S.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; PEDRON, F. DE A.; CORRÊA, M. M.; AZEVEDO, A. C. Impact of weathering on REE distribution in soil-saprolite profiles developed on orthogneisses in Borborema Province, NE Brazil. **Geoderma**, v. 347, p. 103-117, 2019.

SANTOS, J.C.B.; LE PERA, E.; SOUZA JUNIOR, V.S.; OLIVEIRA, C.S.; JUILLERET, J.; CORREA, M.M.; AZEVEDO, A.C. Porosity and genesis of clay in gneiss saprolites: the relevance of saprolithology to whole regolith pedology. **Geoderma**. p. 1–13, 2018.

SANTOS, J. C. B.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R.; ALMEIDA, M. C.; BORGES, L. E. P. Caracterização de Neossolos Regolíticos da região semiárida do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 3, p. 683-695, 2012.

SCHAETZL, R.J.; ANDERSON, S. Soils. Genesis and Geomorphology. **Cambridge University Press**, New York, 2005.

SCHAETZL, R.J.; THOMPSON, M.L. Soil genesis and profile differentiation. In: Schaetzl, R.J., Thompson, M.L. (Eds.), **Soils: Genesis and Geomorphology**, second ed. Cambridge University Press, Cambridge, p. 321–442, 2015.

SILVA, A. K. O.; SILVA, H. P. B. O processo de desertificação e seus impactos sobre os recursos naturais e sociais no município de Cabrobó – Pernambuco – Brasil. *Macapá*, v. 8, n. 1, p. 203-215, 2015.

SILVA, F. G. C. S., PACHECO, J. S. **Processo de desertificação: estudo de caso em Irauçuba-CE. Revista Eletrônica Teccen.** (s. l.) 09 (1): 47-51, 2016.

SILVA, F.M.; S.H.G., ACUNA-GUZMAN; SILVA, S.F.; RIBEIRO E.A.; B.T., FRUETT, B. T.; INDA, A.V., TEIXEIRA, A.F.S., MANCINI, M., GUILHERME, L.R.G., CURTI, N., Chemical and mineralogical changes in the textural fractions of quartzite-derived tropical soils, along weathering, assessed by portable X-ray fluorescence spectrometry and X-ray diffraction. **Journal of South American Earth Sciences**, 112 (2), 103634, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103634>. ISSN 0895-9811.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089598112100479X>.

SILVA, L. F.; FRUETTA, T.; ZINNB, Y. L.; INDA, A. V.; NASCIMENTO, P. C. Genesis, morphology and mineralogy of Planosols developed from different parent materials in southern Brazil. **Geoderma**. p. 46–58, 2019.

SOARES, A. M. L.; LEITE, F. R. B.; MARTINS, M. L. R. Áreas degradadas susceptíveis ao processo de desertificação no Ceará. In: GOMES, G. M.; SOUZA, H. R.; MAGALHÃES, A. R. **Desenvolvimento Sustentável no Nordeste, Brasília: IPEA**, 1995.

SOUZA, B. I. F.; ARTIGAS, R. C.; LIMA, E. R. V. **Caatinga e desertificação**. Mercator, Fortaleza, v. 14, n. 1, p. 131-150, 2015.

SOUSA, A. R. de; ALBUQUERQUE, S. F. de; SILVA, A. B. da; LOPES, G. M. B. L.; NUNES FILHO, J. Caracterização e interpretação para uso agrícola de um planossolo háplico eutrófico sódico do agreste pernambucano. Reunião nordestina de ciência do solo. **Anais [Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica, vol. 10, p.271-279]**, Areia, Pe, 2013.

SOUSA, J. E. S.; ANDRADE, G. R. P.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SANTOS, J. C. B.; CORRÊA, M. M.; FERREIRA, T. O.; CAMARGO, P. B.; ARAÚJO, J. K. S.; SILVA, A. H. N.; SOUSA, M. G. Weathering and mineral alteration of metamorphic rocks and genesis of Planosols along a rainfall gradient in Borborema Province, Northeast Brazil. **Geoderma Regional**, [s. l.], v. 33, p. 00642, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00642>.

SOUSA, J. E. S.; SANTOS, J. C. B.; CORREA, M. M.; NASCIMENTO, A. F.; SCHULZE, S. M. B. B.; FERREIRA, T. O. ARAUJO FILHO, J. C.; JUNIOR, V. S. S. Mineralogy and genesis of Planosols under a semi-arid climate, Borborema Plateau, NE Brazil. **Catena**. 184, 2020.

TARGULIAN, V.O.; KRASILNIKOV, P.V. Soil system and pedogenic processes: self-organization, time scales, and environmental significance. **Catena**. p. 373–381, 2007.

TAZIKEH, H.; KHORMALI, F.; AMINI, A.; MOTLAGH, M. B. Geochemistry of soils derived from selected sedimentary parent rocks in Kopet Dagh, North East Iran. **Journal of geochemical exploration**, 2018.

TIOMO, I. F.; TEMATIO, P.; MATHIEU NOUAZI MOMO, M. N.; HAPPI, F. D.; GUIMAPI, N. T.; TCHAPTCHET, W. C. T. Mineralogical and geochemical evolution of pre-lateritic soil profiles over schist basement of the Lom series (B'étar'é-Oya, East Cameroon): Implication to rock weathering and lithologic constraints on trace elements fractionation. **Journal of African Earth Sciences**, 176 p. 104133, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104133>

TÓTH, C.A.; PETHE, M.; HATHÁZI, Á. The application of earth science-based analyses on a twin-kurgan in Northern Hungary. **Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences**. p. 19–20, 2014.

VAN DER JAGT, H; FRIESE, C.; STUUT, J. B. W.; FISCHER, G.; IVERSEN, M. H. The ballasting effect of Saharan dust deposition on aggregate dynamics and carbon export: Aggregation, settling, and scavenging potential of marine snow. **Limnology and Oceanography**, 63 (3), p. 1386-1394, 2018.

VAN OORT, F., THIRY, M., FOY, E., FUJISAKI, K., DELARUE, G., DAIRON, R., JONGMANS, T. Impacts of one century of wastewater discharge on soil transformation through ferrollysis and related metal pollutant distributions. **Science Total Environment**. p. 590-591, 1–13, 2017.

VAN RANST, E., DE CONINCK, F. Evaluation of ferrollysis in soil formation. **European Journal of Soil Science**, p. 513–519, 2002.

VERECKEN, H.; WEYNANTS, M.; JAVAUX, M.; PACHEPSKY, Y.; SCHAAP, M.; GENUCHTEN, M.T. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: A review. **Vadose Zone Journal**. p. 795–820, 2010.

VICENTE-SERRANO, S.M.; VAN DER SCHRIER, G.; BEGUERÍA, S.; AZORIN-MOLINA, C.; LOPEZ-MORENO, J.I. Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates. **Journal of Hydrology**. p. 42–54, 2015.

WELIVITIYA, W.D. Dimuth P.; HANCOCK, G.R. Quantifying mine waste rock physical weathering rate and processes for improved geomorphic post-mining landforms. **Geomorphology**, [s. l.], v. 463, p. 109357, out. 2024. **Elsevier BV**.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109357>.

WHITTIG, L.D.; ALLARDICE, W.R. X-ray diffraction techniques. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy. p.331-362, 1986.

WU, Y.; ZHANG, X.; LI, C.; XU, Y.; HAO, F.; YIN, G. Ecosystem service trade-offs and synergies under influence of climate and land cover change in an afforested semi-arid basin, China. **Ecological Engineering**, v. 159, p. 106083, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106083>

YUAN, G. L.; SUN, T.; HAN, P.; LI, J.; LANG, X. Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: typical urban renewal area in Beijing, China. **Journal of Geochemical Exploration**. 136, p. 40–47, 2014.2,

ZHANG, C.L., LI, Q., SHEN, Y.P., ZHOU, N., WANG, X.S., LI, J., JIA, W.R. Monitoring of aeolian desertification on the Qinghai-Tibet Plateau from the 1970s to 2015 using Landsat images. **Science total Environmente**. 619–620, 2018.

ZHANG, Y.L., CHEN, L.J., CHEN, X.H., TAN, M.L., DUAN, Z.H., WU, Z.J., LI, X.J., FAN, X.H. Response of soil enzyme activity to long-term restoration of desertified land. **Catena** 133, 64–70, 2015.

ZHOU, X., LI, A., JIANG, F., LU, J. Effects of grain size distribution on mineralogical and chemical compositions: a case study from size-fractional sediments of the Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River). **Geological Journal**, p. 414–433, 2015.

APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DO PERFIL 1

PERFIL 1 – Área de mata

DATA: 05/12/2021

CLASSIFICAÇÃO: PLANOSSOLO NÁTRICO Órtico típico

País/Estado/Município: Brasil/Ceará/Irauçuba

LOCALIZAÇÃO: Fazenda Aroeira, Irauçuba – CE, coordenadas geográficas 3°47'16, 8"S 39°47'57.2"W (Datum WGS 84)

ALTITUDE: 164 m

FORMA DO TERRENO CIRCUNDANTE: Plano a suave ondulado

DECLIVE: 0 a 3%

MATERIAL ORIGINAL: Pré-cambriano indiviso. Gnaisse

DRENAGEM: Imperfeitamente drenado

PEDREGOSIDADE: Não pedregoso.

AFLORAMENTOS ROCHOSOS: Ausente

EROSÃO: Laminar moderada

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Caatinga Hipoxerófila

USO ATUAL: Pousio

PROFUNDIDADE DO LENÇOL FREÁTICO: não definida

DESCRITO E COLETADO POR: Ricardo Espíndola Romero e Francisco Gilcivan Moreira Silva.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap	0-6 cm; bruno-muito escuro (10YR 2/2, úmido); arenosa; moderada pequena e média blocos angulares; porosidade comum; ligeiramente duro, friável, não plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e clara.
E1	6-20 cm; bruno-escuro-amarelado (10YR 4/6 úmido); arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares; ligeiramente duro, friável, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso; transição plana e clara.
E2	20-40 cm; bruno-amarelado (10YR 6/6 úmido); arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares; ligeiramente duro, friável, ligeiramente

plástico, ligeiramente pegajoso; transição plana e abrupta.

- Bt1 40-70 cm; bruno-avermelhado claro (2,5YR 7/4, úmido); franco argiloarenosa; forte média e grande blocos subangulares e angulares; extremamente duro, firme, plástico e pegajoso; transição plana e clara.
- Bt2 70-90 cm; bruno-avermelhado claro (2,5YR 7/3, úmido); franco argiloarenosa; forte média e grande blocos subangulares e angulares; extremamente duro, firme, plástico e pegajoso; transição plana e abrupta.
- Cr 90-98 cm+; cinza (2,5Y 6/1, úmido); franco arenosa; forte pequena e média granular; solta, solta, ligeiramente plástico ligeiramente pegajoso.

Observações: presença abundante de seixos rolados no E2.

APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DO PERFIL 2

PERFIL 2 – Área de pousio

DATA: 07/10/2021

CLASSIFICAÇÃO: PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico solódico (Pousio)

País/Estado/Município: Brasil/Ceará/Irauçuba

LOCALIZAÇÃO: Fazenda Aroeira, Irauçuba – CE, coordenadas geográficas 3°47' 23,62"S
39°47' 51,86"W (Datum WGS 84)

ALTITUDE: 164 m

FORMA DO TERRENO CIRCUNDANTE: Plano a suave ondulado

DECLIVE: 0 a 3%

MATERIAL ORIGINAL: Pré-cambriano indiviso. Gnaisse

DRENAGEM: Imperfeitamente drenado

PEDREGOSIDADE: Não pedregoso.

AFLORAMENTOS ROCHOSOS: Ausente

EROSÃO: Laminar moderada

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Caatinga Hipoxerófila

USO ATUAL: Pousio

PROFUNDIDADE DO LENÇOL FREÁTICO: não definida

DESCRITO E COLETADO POR: Ricardo Espíndola Romero e Francisco Gilcivan Moreira Silva.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap	0-4 cm; bruno-escuro (10YR 3/3, úmido); areia franca; moderada em blocos subangulares e angulares médios; porosidade comum; ligeiramente duro; friável; não plástico e não pegajoso; transição plana e clara.
E	4-12 cm; bruno-escuro-amarelado (10YR 4/6 úmido); franco arenosa; fraca, pequena, média, blocos subangulares e angulares; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajosa; transição plana e abrupta.
Bt1	12-25 bruno-acinzentado (10YR 5/2, úmido); franco arenosa; forte,

pequena, média, blocos subangulares e angulares; ligeiramente dura, firme, plástico, pegajosa; transição plana e clara.

Bt2 25-76 bruno-muito-claro (10YR 7/3, úmido); franco arenosa; forte, grande, muito grande, blocos subangulares e angulares; extremamente dura, firme, plástico, pegajosa; transição plana e abrupta.

Cr 76-85+ cinza (2,5Y 5/1, úmido); franco arenosa; fraca, pequena, média, blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, não plástico, não pegajosa.

APÊNDICE C – DESCRIÇÃO DO PERFIL 3

PERFIL 3 – Área de sobrepastejo

DATA: 07/10/2021

CLASSIFICAÇÃO: PLANOSSOLOS NÁTRICOS Órticos salinos

País/Estado/Município: Brasil/Ceará/Irauçuba

LOCALIZAÇÃO: Fazenda Aroeira, Irauçuba – CE, coordenadas geográficas 3°47'22,2"S 39°47'54,6"W (Datum WGS 84)

ALTITUDE: 164 m

FORMA DO TERRENO CIRCUNDANTE: Plano a suave ondulado

DECLIVE: 0 a 3%

MATERIAL ORIGINAL: Pré cambriano indiviso. Gnaisse

DRENAGEM: Imperfeitamente drenado

PEDREGOSIDADE: Não pedregoso.

AFLORAMENTOS ROCHOSOS: Ausente

EROSÃO: Laminar moderada

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Caatinga Hipoxerófila

USO ATUAL: Criação de animais bovinos, ovinos e caprinos.

PROFUNDIDADE DO LENÇOL FREÁTICO: não definida

DESCRITO E COLETADO POR: Ricardo Espíndola Romero e Francisco Gilcivan Moreira Silva.

DESCRIÇÃO MACROMORFOLÓGICA

AE	0-8 cm; bruno-escuro-amarelado (10YR 3/6, úmido); areia franca; fraca em blocos subangulares médios; porosidade comum; ligeiramente duro; friável; não plástico e não pegajoso; transição plana e abrupta.
Bt1	8-16 cm; bruno-amarelado (10YR 5/4 úmido); franco arenosa; fraca, pequena, média, blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, não plástico, não pegajosa; transição plana e clara.
Bt2	16-68 cm; bruno-muito-claro (10YR 7/3 úmido); franco arenosa; fraca, pequena, média, blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, não plástico, não pegajosa; transição plana e clara.

Cr 68-78+ cinza (2,5Y 5/1, úmido); franco arenosa; fraca, pequena, média, blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, não plástico, não pegajosa.