

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

ROBSON HORTENCIO DE LIMA

**CARACTERIZAÇÃO DE PERFIS DE REGOLITO E FORMAÇÃO DE
CARBONATOS EM SAPROLITOS DERIVADOS DE GNAISSE NO
SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO**

RECIFE

2022

Robson Hortencio de Lima
Engenheiro Agrônomo

Caracterização de perfis de regolito e formação de carbonatos em saprolitos derivados de gnaiss no semiárido de Pernambuco

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jean Cheyson Barros dos Santos

Coorientadores: Prof. Dr. Lucas Resmini Sartor
Prof. Dr. Marcelo Metri Corrêa

**Recife
2022**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L732c Lima, Robson Hortencio de
CARACTERIZAÇÃO DE PERFIS DE REGOLITO E FORMAÇÃO DE CARBONATOS EM SAPROLITOS
DERIVADOS DE GNAISSE NO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO / Robson Hortencio de Lima. - 2022.
81 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Jean Cheyson Barros dos Santos.
Coorientador: Prof. Dr. Lucas Resmini Sartor.
Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, 2022.

1. Intemperismo. 2. Zona crítica. 3. Geoquímica do regolito. 4. Alteração de minerais. I. Santos, Prof. Dr. Jean Cheyson Barros dos, orient. II. Sartor, Prof. Dr. Lucas Resmini, coorient. III. Título

CDD 631.4

ROBSON HORTENCIO DE LIMA

Caracterização de perfis de regolito e formação de carbonatos em saprolitos derivados de gnaiss no semiárido de Pernambuco

Dissertação/Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 25 de fevereiro de 2022

Prof. Dr. Jean Cheyson Barros da Silva
Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lucas Resmini Sartor
Universidade Federal de Sergipe

Prof. Dr. Antonio Carlos de Azevedo
Universidade de São Paulo

A Deus e meus pais,

DEDICO

"Quase todos os homens são capazes de suportar adversidade, mas se quiser pôr à prova o caráter de um homem, dê-lhe poder".

- Abraham Lincoln

AGRADECIMENTOS

A Deus, o autor da minha fé;

Aos meus pais Almir Hortencio de Lima e Luiza Gomes de Lima, amor incondicional na minha mudança de profissão;

A minha amada Clara Mariana Ribeiro, carinhosa, companheira e paciente quanto a minha ausência para a realização acadêmica de ser mestre;

Aos meus orientadores e coorientadores Prof. Dr. Jean Cheyson e Prof. Dr. Lucas Resmini Sartor, pela paciência e dedicação, e ter confiado em mim na execução desse trabalho;

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Ciências do Solo da UFRPE, e os da Graduação que contribuíram para a minha formação;

Aos meus amigos da graduação em agronomia da turma SA1 de 2019.2 que através da união nos estudos superamos barreiras. Ao amigo Artur Henrique que me auxiliou na jornada de pós-graduando.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos, e suporte a pesquisa;

A Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE) em especial ao Prof. Dr. Marcelo Metri pela contribuição em análises.

Caracterização de perfis de regolito e formação de carbonatos em saprolitos derivados de gnaiss no semiárido de Pernambuco

RESUMO

O regolito, que engloba o solo e o saprolito, tem papel ecológico na relação entre espécies vegetais, ciclo da água subterrânea e processos geoquímicos relevantes para o ecossistema, um componente importante para o estudo da zona crítica. As emissões de CO₂ na atmosfera é fator de preocupação da sociedade, e o regolito é um reconhecido sumidouro. A formação de carbonatos, conhecida como “*Mineral carbonation*”, ocorre naturalmente em regolitos por meio da reação do CO₂ com produtos da dissolução de minerais, atuando potencialmente no sequestro de carbono. Na literatura é bem difundido a formação de carbonatos pelo intemperismo de rochas basálticas, no entanto, formulou-se nesse estudo a hipótese que perfis de regolito derivados de rochas metamórficas ácidas, os ortognaisses, localizadas sob clima semiárido do estado de Pernambuco apresentam características geoquímicas, mineralógicas e estruturais que favorecem o processo de formação de carbonato no saprolito. O estudo se concentrou em três perfis de regolito equidistantes ao longo de 900 metros no município de Jataúba, inserido no domínio geomorfológico do Complexo da Borborema, estado de Pernambuco. Os solos e os saprolitos foram classificados, descritos morfológicamente, avaliados estruturalmente e coletados. Nas amostras deformadas e indeformadas coletadas de horizontes autóctones, foram feitas análises químicas e físicas de rotina, mineralógicas por difratometria de raios-X (DRX), geoquímicas por fluorescência de raios-X (FRX) e micromorfológicas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) associada à espectroscopia por energia dispersiva de raios-X (EDS). Testes de campo demonstraram forte reação do saprolito ao HCl e a micromorfologia eletrônica mostrou precipitados cálcicos em volta de feldspatos em alteração. As estruturas compactas do horizonte sobrejacente ao saprolito e da rocha virtualmente preservada subjacente ao saprolito deve ter favorecido a formação de carbonatos pela manutenção da solução com H₂CO₃ em contato com os minerais em alteração. Em adição, os melanossomas ricos em biotita e plagioclásios herdados do gnaiss pelo saprolito, apresentam características mineralógicas e geoquímicas semelhantes as observadas em saprolitos de rochas básicas, favorecendo o processo de formação de calcita por meio dos produtos de intemperismo. Infere-se que a elevação dos teores de Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺ e H₂CO₃ na solução é favorecida pelo regime de chuvas + evapotranspiração e que a origem do CO₂ necessário para a formação dos carbonatos em saprolitos seja atmosférico e pela respiração de microorganismos. O presente trabalho serve de base para futuros estudos estimarem a contribuição da formação de carbonatos em saprolitos do semiárido nordestino para o sequestro de CO₂.

Palavras-chave: Intemperismo. Zona crítica. Geoquímica do regolito. Alteração de minerais.

Characterization of regolith profiles and carbonate formation in saprolites derived from gneiss in the semiarid region of Pernambuco

ABSTRACT

The regolith, which encompasses soil and saprolite, plays an ecological role in the relationship between plant species, groundwater cycle and geochemical processes relevant to the ecosystem, an important component for the study of the critical zone. CO₂ emissions into the atmosphere are a matter of concern for society, and regolith is a recognized sink. The formation of carbonates “*mineral carbonation*” occurs naturally in regoliths through reaction of CO₂ with mineral dissolution products, potentially acting on carbon sequestration. In the literature, the formation of carbonates by the weathering of basaltic rocks is well known. However, in this study, our hypothesis is: Regolith profiles derived from acidic metamorphic rocks located under a semiarid climate in the state of Pernambuco have geochemical, mineralogical and structural characteristics that favor the process of carbonate formation in the saprolite. The study focused on three equidistant regolith profiles along 900 meters in the municipality of Jataúba, inserted in the geomorphological domain of the Borborema Complex, state of Pernambuco. Soils and saprolites were classified, morphologically described, structurally evaluated and collected. In the deformed and undisturbed samples collected from autochthonous horizons, chemical and physical analyzes, mineralogical analyzes by X-ray diffractometry (XRD), geochemical analyzes by X-ray fluorescence (FRX) and micromorphological analyzes by scanning electron microscopy (SEM) associated with energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) were performed. Field tests showed a strong reaction of saprolite to HCl and electron micromorphology showed calcium precipitates around altered feldspars. The compact structures of the horizon overlying the saprolite and the virtually preserved rock underlying the saprolite must have favored the formation of carbonates by keeping the H₂CO₃ solution in contact with the altered minerals. In addition, the biotite and plagioclase-rich melanosomes inherited from the gneiss by the saprolite have mineralogical and geochemical characteristics similar to those observed in basic rock saprolites. We infer that the increase in the levels of Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺ and H₂CO₃ in the solution is favored by the regime of rainfall + evapotranspiration and that the origin of the CO₂ necessary for the formation of carbonates in saprolites is atmospheric and by respiration of microorganisms. The present work serves as a reference for future studies to estimate the contribution of carbonate formation in saprolites from the northeastern semi-arid region to CO₂ sequestration.

Keywords: Weathering. Critical zone. Regolith geochemistry. Mineral alteration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Domínios Geomorfológicos do Estado de Pernambuco	29
Figura 2 - Localização de Jataúba no Estado de Pernambuco Nordeste do Brasil.....	300
Figura 3 - Classes de solo de Jataúba em escala 1:100.000 do SiBCS.....	31
Figura 4 - Fotos da área em estudo e sua vegetação nativa.....	31
Figura 5 - Representação da localização dos perfis estudados em relação a Jataúba e região.....	32
Figura 6 - Níveis categóricos de Buol (1994) com modificações de Santos (2015)	36
Figura 7 - Nomenclatura de rochas ígneas a ser utilizada no quarto nível categórico do SRT para classificar os saprolitos (STRECKEISEN, 1976, 1978)	37
Figura 8 - Morfologia de Perfis de originados de gnaisses em Jataúba/PE.....	45
Figura 9 - Fotos do perfil 1 (P1) formado por sistema solo-saprolito derivado de gnaisse.....	55
Figura 10 - Fotos do perfil 2 (P2) formado por sistema solo-saprolito derivado de gnaisse.....	56
Figura 11 - Fotos do perfil 3 (P3) formado por sistema solo-saprolito derivado de gnaisse...	57
Figura 12 - Índices geoquímicos de intemperização dos 3 perfis estudados.....	61
Figura 13 – Representação estrutural do sistema solo-saprolito ao longo de um corte de aproximadamente 900 m.....	62

Figura 14 - Imagens por MEV da dissolução do feldspato e formação de carbonato de cálcio no horizonte Crn do Perfil 2.....64

Figura 15 - Análise por EDS do feldspato e do carbonato de cálcio presentes nas imagens por MEV no horizonte Crn do Perfil 2.....65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de intemperismo para gnaisses ou rochas metamórficas semelhantes. Baseado no proposto por Gullà e Matano (1997), Pedron (2007) e Borrelli et al. (2014), e retirado de Santos (2005)	34
Tabela 2 - Classes de intemperismo para granitos, sienitos ou rochas ígneas semelhantes. Baseado no proposto por Gullà e Matano (1997), Pedron (2007) e Borrelli et al. (2014) e retirado de Santos (2005)	35
Tabela 3 - Descrição morfológica e classificação de 3 sistemas solo-saprolito de origem gnaiss em clima semiárido no município de Jataúba/PE.....	46
Tabela 4 - Avaliação da potencialidade dos sistemas solo-saprolitos.....	49
Tabela 5 - Caracterização física de perfis saprolíticos de Planossolos sobre gnaiss em Jataúba/PE.....	52
Tabela 6 - Caracterização química de perfis saprolíticos de Planossolos sobre gnaiss em Jataúba/PE.....	55
Tabela 7 - Elementos maiores medidos por FRX, LOI e índices geoquímicos CIA, PIA E CIW em sistema solo-saprolito sobre gnaiss.....	61
Tabela 8 - Constituintes minerais das frações cascalho, areia, silte e argila representativa dos três perfis estudos.....	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Hipóteses	15
1.2 Objetivos	16
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	16
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Saproilitologia: Histórico e fundamentos.....	16
2.2 Mineralogia e química de saprolitos derivados de rochas cristalinas	20
2.3 Relevância agrícola e ambiental de saprolitos derivados de rochas cristalinas	22
2.4 Processo de formação de carbonato em saprolitos derivados de rochas cristalinas.....	24
3 MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1 Descrição da área de estudo	28
3.2 Classificação do solo e saprolito e descrição morfológica do solo e saprolito	32
3.3 Coleta e preparo das amostras.....	37
3.4 Análises químicas	37
3.4.1 <i>Determinação de fósforo, potássio e sódio</i>	38
3.4.2 <i>Determinação de Cátions trocáveis</i>	38
3.4.3 <i>Determinação da acidez ativa e potencial</i>	39
3.4.4 <i>Determinação de matéria orgânica</i>	40
3.5 Análises físicas.....	41
3.6 Análise mineralógica.....	42
3.6 Análise geoquímica e descrição por MEV-EDS	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 Classificação, morfologia e potencialidade estrutural dos sistemas solo-saprolitos.....	43
4.2 Influência da estrutura para os atributos físicos e químicos dos perfis.....	49

<i>4.2.1 Atributos físicos</i>	49
<i>4.2.2 Atributos químicos</i>	52
4.3 Geoquímica de alteração	58
4.4 Processo de formação de carbonatos em saprolitos derivados de gnaiss	62
6 CONCLUSÕES	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1 INTRODUÇÃO

O regolito é formado pelo solo e saprolito e atua como regulador do clima por seus processos de intemperismo e consumo de CO₂, com o saprolito interligando todas as esferas terrestres, hidrosfera, pedosfera (solo), litosfera e biosfera. Estudos sobre o sequestro de carbono (FAO, 2020; SMITH et al., 2020; TUBIELLO et al., 2021) são cada vez mais requisitados pela comunidade científica ou por agências governamentais envolvidas com as mudanças climática, aumentando o interesse de estudo da influência do regolito na imobilização de CO₂ na pedosfera. O saprolito do semiárido tem suas características mais ligadas à sua litologia do que sua posição relativa na topossequência, e suas propriedades físicas de porosidade e densidade são determinantes no desenvolvimento e diferenciação do Solo, o que corrobora com a definição de saprolito, como o produto isovolumétrico não transportado da intemperização das rochas (BECKER, 1985)

Em grande parte do Nordeste brasileiro, há um saldo negativo de balanço hídrico, diferença entre pluviosidade e evapotranspiração potencial. Nesta circunstância, os saprolitos oriundos de gnaisse em perfis de regolito são potenciais sumidouro de CO₂, principalmente por possibilitarem um acúmulo de cátions básicos e pH alcalino, favorecendo a formação de precipitados carbonáticos cálcicos, magnesianos e ferrosos.

A solubilização e a concentração de elementos na solução do solo é o principal mecanismo de deposição de carbonatos. Neste contexto, os mecanismos naturais de formação de carbonato em saprolitos desenvolvidos em clima semiárido podem ser bastante promissoras, pois, nesta condição climática, a formação e permanência dos carbonatos podem ser favorecidas, potencializando o sequestro de carbono pela pedosfera.

As variáveis que influenciam o estoque e fluxo de carbono, a nível de processo, é ainda incompleto (BISPO et al., 2017). O sequestro de carbono pela regolitosfera é primordial na qualidade do solo, produção de alimentos, segurança alimentar, desenvolvimento sustentável, (CHABBI et al., 2017; FUSS et al., 2018; HASEGAWA et al., 2021; SMITH, 2016) inclusive recuperação de biomas e ecossistemas apontados por organismos internacionais (IPBES, 2018). Um levantamento estimou em 352,7 Tg o estoque total de C em solos de Pernambuco, em diferentes usos e coberturas da terra. Sendo assim o regolito um agente ativo no sequestro de carbono, e potencial ocorrência “*mineral carbonation*”. (JESUS, 2019).

É reconhecida na literatura a verossimilhança de propriedades do saprolito e os horizontes pedogênicos na liberação de nutrientes para plantas. A porosidade e consequente

condutividade hidráulica é chave para um saprolito com função de manutenção de culturas e atividade microbiana. A bibliografia sobre saprolito é multidisciplinar com centros de estudos concentrados no Brasil, França, Estados Unidos e Austrália. Esses centros procuram compreender o regolito por completo, não o saprolito como parte do todo, e isso é de extrema importância para entender os processos biogeoquímicos e mineralógicos que ocorrem e que favorecem a imobilização de CO₂. Há propostas de sistemas de classificação do saprolito, com entraves para a consolidação de um sistema que uma forma prática e visual ao alcance de uma coleta de campo.

O saprolito tem sua contribuição na formação do solo, nutrição vegetal, ciclagem de elementos químicos, além de papel ecológico na relação entre espécies vegetais, ciclo da água subterrânea e sua qualidade quanto a poluentes e contaminações.

A consolidação da saprolitologia como um campo de estudo desmembrado da pedologia é intrínseco nos trabalhos de centros de estudos pelo mundo e carece de mais trabalhos voltados a formação do saprolito e sua influência na formação de carbonatos. Na carbonatação em nível industrial com uso de reagentes, pressão e rochas básicas é avançado o número de estudos. No entanto, não temos encontrado trabalhos na literatura científica com a formação de carbonato em saprolitos derivados de rochas metamórficas ácidas como o gnaisse. Globalmente os sistemas terrestres são sumidouros de carbono, contudo, as camadas saprolíticas carecem de estudos sobre formação de carbonato em condições normais de temperatura e pressão. Saprolitos de rochas máficas e ultramáficas, como os basaltos, são os mais eficientes na carbonatação por rápida dissolução dos minerais silicatados, alta concentração de cátions metálicos básicos, e estudos são amplos em saprolitos de rochas básicas. No entanto, os trabalhos na literatura científica com a formação de carbonato em saprolitos derivados de rochas metamórficas ácidas, como o gnaisse, são escassos ou até inexistentes.

A realidade de substituição total de matriz energética não renovável ainda não é viável a curto prazo, então é preciso meios de mitigação do impacto da atividade humana. Este trabalho visa como os processos de formação de carbonato em saprolitos derivados de gnaisse no clima semiárido, ocorrem e são favorecidos. Pode-se inferir a contribuição de formação de carbonato em saprolitos semelhantes no Brasil e no mundo com base nos dados aqui encontrados.

1.1 Hipóteses

Saprolitos derivados do intemperismo de gnaisse, em clima semiárido, favorecem o processo de formação de carbonato.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Caracterizar perfis de regolito e investigar os mecanismos biogeoquímicos e mineralógicos relacionados ao processo de formação de carbonato em saprolitos derivados de gnaiss sob o clima semiárido da região agreste de Pernambuco.

1.2.2 Objetivos Específicos

Caracterizar a mineralogia, a química, a física, a morfologia e potencialidade estrutural de perfis de regolito derivados de gnaiss com formação de carbonatos no saprolito;

Descrever os mecanismos biogeoquímicos e mineralógicos que implicam no processo de formação de carbonato nesses saprolitos;

Dar suporte a futuras estimativas sobre o tamanho da região abrangida por saprolitos com presença de processo de formação de carbonato no semiárido brasileiro;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Saprolitologia: Histórico e fundamentos

A ciência do solo tem seus fundamentos iniciados a milênios. Contudo, foi no século XIX, com o geólogo russo Dokuchayev, na obra "Russian Chernozem", que surge a Pedologia, com a tese de que os solos são formados pela interação de textura, composição química, umidade, fauna, e fatores antropogênicos, culminando em processos internos. Essa tese original fora aperfeiçoada por Jenny (1941), que idealizou os fatores de formação do solo: material de origem, clima, relevo, organismos e tempo. Antes da Pedologia, era designado um termo genérico "estudo do solo" (JOHNSON; SCHAETZL, 2015; VYSLOUŽILOVÁ, 2016). Uma área da ciência do solo muito importante nos dias atuais no estudo da zona crítica, é a saprolitologia, uma linha de pesquisa derivada da pedologia que foca no saprolito. Ela busca explicar em escala macro o papel da camada saprolítica para a formação do solo subjacente, neoformação de argila, nutrição mineral de plantas, seu papel ambiental na formação de biofilmes e interação com microrganismos, entrada e saída de elementos químicos e sua biodisponibilidade, sumidouro de CO₂ e biorremediação de contaminantes (SANTOS et al., 2018; CUADROS, 2017; TAKAZI, 2006; THENG; ORCHARD, 1995).

No Brasil, o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) foi pioneiro em pesquisa e análise de solo e planta. Contudo, a ciência do solo começou a progredir com vigor a partir dos primeiros levantamentos pedológicos na segunda metade do século XX, e no surgimento de instituições de fomento e pesquisas como a Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), do Banco do Nordeste do Brasil na década de 60, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), na década de 70, e nas décadas de 90 pela Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco (CODEVASF) (DE CARVALHO; NUNES; ANTUNES, 2013). Atualmente, o pujante conhecimento agrônomo da ciência do solo, nutrição e melhoramento vegetal é o que destaca o Brasil como produtor de alimentos. Isso contrasta com o desconhecimento ou pouco saber do regolito por completo, em parte pelo uso de solo mais profundos onde não há interceptação radicular (MACHADO, 1997).

A saprolitologia, assim, tende a ser um desmembramento do campo de estudo da pedologia e da sedimentologia que já estão consolidados, por serem distintos em especificidades. Há centros de estudos saprolíticos concentrados no Brasil, nas escolas francesa, estadunidense, e australiana, focando em características únicas do saprolito para as diversas áreas de conhecimento e em compreender o regolito por inteiro e sua multidisciplinaridade (SANTOS, 2015). Uma motivação para o aumento dos estudos em zona saprolítica nas décadas de 1990 e 2000 é o discernimento que o saprolito faz parte da “Zona Crítica”, formando um ponto de interseção com as esferas terrestres da hidrosfera, pedosfera, litosfera, e biosfera, corroborando para manutenção de recursos naturais, sendo primordial para fins ambientais e comerciais do agronegócio. Outra motivação são as consideráveis diferenças de propriedade do solo e saprolito para áreas como engenharia, os colocando em classes distintas (BERNASCONI, 2008; CREMEENS; BROWN; HUDDLESTON, 1994; LE PERA; CRITELLI; SORISSO, 2001).

Saprolito é o produto isovolumétrico, não transportado, proveniente da intemperização das rochas (BECKER, 1985). O saprolito se diferencia do sedimento e solo por ser *in situ*, sem transporte. O solo pode ser autóctone ou alóctone, e o sedimento transportado por erosão, sistema fluvial. A origem da palavra saprolito vem do grego: *saprós* = podre; *litos* = rocha, o que denota que é uma rocha já modificada (“podre”). Um conceito mais extenso e autoexplicativo de saprolito é o do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Nele saprolito é rocha decomposta por intemperismo químico, que preserva estruturas da rocha sã abaixo, contendo minerais resistentes ao intemperismo, mantendo relação de cores com a rocha originária, sendo de friabilidade variável (WINGE et al., 2001).

O saprolito forma-se pela alteração dos diferentes minerais contidos na rocha em função do tempo, clima, atividade biológica e relevo. Este processo de alteração do material de origem tende a formar poros e minerais secundários na rocha intemperizada, mas preservando o seu volume original, dando origem ao saprolito. Estima-se de 20 a 60 por cento do material possa ser perdido da rocha originária para o saprolito. Os minerais mais resistentes ao intemperismo permanecem como um “esqueleto” dessa estrutura, a qual pode colapsar e, conseqüentemente, formar solo por meio da atuação dos processos pedogenéticos (SANTOS et al., 2018; 2022). O saprolito e o solo/sedimentos formam o regolito. No início da intemperização da rocha, o solo pode se formar em uma taxa maior que o saprolito e, em determinado momento, sua taxa de formação diminui e o saprolito continua a desenvolver. Resumidamente, há duas etapas na formação do saprolito, primeiro há alteração dos minerais facilmente intemperizáveis, como plagioclásios e piroxênios, e depois a lixiviação de bases, seguida por oxidação de ferro e dessilicatização com alterações de pH (CREMEENS; BROWN; HUDDLESTON, 1994; SANTOS, 2015; STOLT; BAKER; SIMPSON, 1992).

A litologia da rocha influencia como a rocha é intemperizada. Os poros, dureza, textura e composição química determinam como as microporosidades se tornarão fraturas ou canais, e como a água fluirá pela tortuosidade do espaço poroso, o qual pode ser preenchido por raízes e solutos da rizosfera, formando pontos de acúmulo de carbono. Os ácidos orgânicos podem ter origem de coloides sobrejacentes. Com a absorção de K pelas raízes, juntada ao incremento da porosidade, umidade, constante dissolução de minerais, então ocorre neoformação de argilas em duas camadas de pedoplasmação na interface rocha-raiz-poro, sempre nas bordas e facetas mais frágeis dos minerais do saprolito (SANTOS et al.; 2022). Ocorre também perda de K, e dessilicatização. A expansão das argilas progressivamente vai aumentando o fraturamento e a formações de canais e fissuras, juntamente com a lixiviação e extração de minerais por vegetais e microrganismos. (CREMEENS; BROWN; HUDDLESTON, 1994; RUIZ et al., 2022; SANTOS et al.; 2018). Hasenmueller et al. (2017) estudou como as raízes influenciam nas alterações químicas na frente do intemperismo, formando saprolito. Houve similaridade entre os elementos Al, Fe, K, Mg e Si no comparativo de alteração que ocorreu no solo e nos revestimentos de fraturas com raízes, e que até 180 cm de profundidade encontravam-se raízes, desde que as fraturas tivessem no mínimo 50 μm de abertura. Neste estudo, as raízes promoveram a intemperização in situ rocha-saprolito.

A contribuição dada pelos estadunidenses Cremeens, Brown e Huddleston (1994) para a saprolitologia é considerada um marco. Neste livro, os autores concatenam os conhecimentos: (1) como ocorre a gênese, incluindo o papel da matéria orgânica e raízes na formação de

saprolito, neoformação de argilas, e pedogênese; (2) técnicas práticas para estudar o saprolito, dada a limitação de escavação; (3) delimitação da zona de transição solo-saprolito pela análise das propriedades químicas e físicas para determinar essa zona, por Fe, areia e argila; (4) eles ainda apontam a necessidade de um sistema de classificação para cada zona; (5) e formas de estimar a idade de uma paisagem pela taxa de formação e espessura do saprolito.

No estudo do saprolito, embora seja uma área crescente em artigos científicos, ainda prevalecem polêmicas, conflitos de interpretação limítrofe entre o Saprolito e o Solo, e entre termos como subsolo, como sinônimo de regolítico em algumas publicações, rocha alterada, isalterita, isoalterita. O sistema de classificação de Santos (2005) traça requisitos para diferenciar o saprolito da rocha sã, que é o aceito e consolidado teste da pá. Porém um teste objetivo do contato de camada saprolítica não é acolhido no sistema brasileiro, lotado de subjetividade interpretativa. Nessa classificação, os diagnósticos são característicos do solo, deixando o saprolito em segundo plano, embora os primeiros sistemas de classificação foram baseados na Geologia (BREVIK et al., 2016). Santos et al. (2019a) correlacionou matematicamente atributos químicos e físicos com os limites solo-saprolito estipulados por pedólogos.

Santos (2015) elencou uma vasta lista de estudos saprolíticos em diversas áreas da ciência, a citar algumas: ciências geológicas e biológicas, engenharia de edificação, ambiental como sumidouro de CO₂, conservação de monumentos, e até expedições aeroespaciais em Marte. Ele propôs uma nova linha de pesquisa, disciplina especializada, a saprolitologia, que descreve uma ligação íntima entre a pedologia e a geologia, porém tem seus próprios entraves, propósitos e muito a ser descoberto e compreendido.

Autores propõem um novo sistema de classificação do saprolito, dada a importância da integração solo-saprolito, e a limitação de dois metros no World Reference Base for Soil Resources (WRC). O problema é que em solos profundos, o saprolito não é contemplado por essa limitação. Juilleret, Dondeyne e Hissler (2014) apontam características físicas de estratificação, clivagem, fraturas e características litológicas como critérios para uma nova forma de classificar o saprolito em solos rasos e pouco desenvolvidos. Simon et al. (2021) propõem um sistema físico-geoquímico que através de dados do saprolito explique a formação do solo, usando modelagem para estimar o solo subjacente e suas propriedades, unindo Geologia e Ciência do Solo. Buol (1994), no artigo intitulado Saprolite-Regolith Taxonomy, elaborou um sistema de chaves, sem sobrepujar as definições de saprolito qualitativas. Juilleret et al. (2016) reforçou a visão de que apenas classificar os horizontes mais superficiais limitado a dois metros, tanto no World Reference Base for soil resources (WRB) quanto no Soil

Taxonomy (ST), não é adequada, e sim um conhecimento integrado. Este sistema primeiramente divide quatro estágios de intemperização como referência: Regolite, Saprolite, Saprock e Bedrock. A integração deles funciona como um qualificador principal, e características morfológicas e litológicas são qualificadores suplementares.

A importância da saprolitologia para a pedoformação é descrita por Santos et al. (2018), onde nos perfis estudados no bioma da Mata Atlântica de características fluviais com boa drenagem, o feldspato e biotita são precursores de argilas ricas em ferro e alumínio, e por análise de lâminas fixadas em resinas de poliéster, foram encontrados pontos calcíticos (Doughnut-shaped holdfast) oriundos da intemperização do saprolito por microrganismos e formação de biofilme. Fora explicitada a semelhança do saprolito ao solo sobrejacente nos conteúdos de cátions de cálcio, magnésio, sódio, potássio e alumínio, o que corrobora para a relevância agrônômica e ambiental. No revestimento dos poros do saprolito, as argilas se formaram em duas camadas, a primeira rica em ferro e a segunda rica em alumínio.

O estudo de Câmara et al. (2021), associando a distribuição de Planossolos e Luvisolos em clima semiárido com a rocha de origem, os solos rasos apresentaram mais relação com a rocha do que com a posição na topossequência. Os saprolitos desses solos tem uma variação de bandamentos leucocráticos e melanocráticos que limitam a pedogênese, com isso a presença desses bandamentos no saprolito podem explicar a variação de profundidade do solo de 48 a 68cm.

2.2 Mineralogia e química de saprolitos derivados de rochas cristalinas

Saprolitos em região semiárida, com regime de chuvas escassas e concentradas em uma janela curta de tempo anualmente, desfavorecem a saída de ácido silícico, favorecendo a gênese de minerais 2:1 no revestimento das porosidades, que de início são revestidas com argila proveniente de minerais mais facilmente intemperizáveis, como piroxênios e biotita, mas que gradualmente podem formar uma assembleia mineralógica diversa. Esta formação de argila se dá por camadas no espaço poroso do saprolito e o processo de bissialitização no perfil como um todo, assim como a evolução intempérica do saprolito. É importante destacar que o minerais primários dissolvidos fornecem um aporte de elementos químicos, incluindo nutrientes vegetais (DONG et al., 1998; KAMPF et al., 2009; MURPHY et al., 1998; SANTOS, 2019b).

Moore, Buss e Dosseto (2019) estudaram a zona crítica e formação de saprolitos, procurando medir e mapear o fluxo do intemperismo de silicatos em solo tropical. Os autores observaram que na formação inicial de saprolitos, há dissolução oxidativa, indicada pela presença de sulfato nos poros, primeiramente na pirita, criando um microambiente ácido e

auxiliando a intemperização da clorita e dos piroxênios. Foi demonstrado, então, que o fator limitante para formação de saprolito no leito rochoso da área é a dissolução da pirlita, embora pouco abundante, com apenas 0,50 % do volume.

Gnaiss é um exemplo de rocha cristalina por haver arranjo consolidado, dado pela velocidade de resfriamento da rocha predecessora. Ela pode ser oriunda do metamorfismo do granito, após recristalização sob temperaturas e pressões intermediárias entre rochas ígneas e sedimentares, ou pode ser derivada da metamorfização do xisto. Ela apresenta foliação em leitos de cor clara (leucossomas), contendo feldspatos e quartzos, intercalados com leitos escuros (melanossomas) de biotita e anfibólio. Esses bandamentos tem deformação incipiente em áreas de intemperismo ameno, descontinuados e de espessura variável. A assembleia mineralógica é majoritariamente constituída por mica, quartzo, feldspatos e plagioclásio, podendo ocorrer a hornblenda. Saprolitos de Gnaiss são comuns na região seca pré-cambriana de Pernambuco, acompanhados de solos de <1 m até o saprolito (BRANCO, 2014; KLEIN, 2012).

Na zona saprolítica sobre gnaiss granítico em encostas de forma convexa da Carolina do Norte, Buol e Weed (1991) constataram a diminuição do intemperismo pela lenta percolação da água entre o solum e saprolito. A região tinha excedente hídrico, ou seja, maior precipitação que evapotranspiração. Na região saprolítica próxima ao contato lítico, à 5 metros de profundidade, os minerais secundários formados de início são haloisita, gibbsita, e argila aluminossilicatada amorfa. A ressilificação da gibbsita e dos aluminossilicatos amorfos é a causa da haloisita ser maior quanto mais próximo da frente da pedogênese, e na porção superior do saprolito há recristalização em caulinita, mineral de argila de maior ocorrência. Em outros estudos de saprolitos, os minerais encontrados na fração silte foram quartzo, feldspato e micas, enquanto os minerais da fração argila foram illita, caulinita, óxidos de ferro, feldspato e quartzo. A mineralogia foi similar em todos os perfis.

Ao descrever perfil laterítico em depósito de ferro em Carajás/PA, Silva (2020) encontrou uma distribuição de óxidos característicos de perfis lateríticos bem desenvolvidos da Amazônia. Os óxidos de silício diminuem substancialmente da base do perfil até a superfície, com óxidos de ferro, na maioria hematita, concentrados no saprolito e em crostas ferroaluminosas. No topo do saprolito há mais concentração de alumínio, titânio, fósforo, elementos traços como Nb, V, Cr, Ta, W, Zr, ETR, Ga além de gibbsita, goethita e anatásio. Essa distribuição mineral e de óxidos evidencia que um ambiente modificado se assemelha a um natural, pela verossimilhança do embasamento ou escudo cristalino da área e conseqüentemente do saprolito.

2.3 Relevância agrícola e ambiental de saprolitos derivados de rochas cristalinas

O estudo do saprolito é uma necessidade atual para as geociências e as ciências ambientais. O estudo do regolito atualmente transcende a sua região superficial. Os sistemas solos-saprolitos, anteriormente considerados apenas como bases para suporte e nutrição vegetal, agora despertam o interesse da comunidade científica pela notável influência sobre processos essenciais para os ecossistemas (GAILLARDET et al., 2018).

O saprolito vai além de influenciar na formação do solo, na parte nutricional e ciclagem de minerais para cultivos e florestas. Também tem seu papel na ecologia vegetal e sinecologia, que é o estudo das relações entre espécies vegetais pela formação, seu meio e geografia, recarga de água subterrânea, qualidade da água, controle de poluentes e contaminações da água percolada, mineração artesanal ou de pequena escala, disposição de resíduos vegetais, e sumidouro de CO₂ (JUILLERET; DONDEYNE; HISSLER, 2014; XAVIER; VIANA; SOUZA, 2018; LEWIS et al., 2020). Os rejeitos saprolíticos de minas, processadas em grão reduzido aumentam a reatividade e poderiam em potencial mineralizar CO₂ atmosférico, compensando as emissões da atividade (SANNA, 2014; BODÉNAN, 2014).

O fluxo de água subterrânea e sua qualidade depende do grau de intemperização do saprolito e sua espessura, o que pode delimitar o uso de lençol freático por causa de alcalinidade, contaminantes, e condutividade elétrica. O fluxo mais lento de contaminantes em microporos é preferível principalmente havendo argila, do que a percolação nos macroporos preferenciais (FOPPEN et al, 2020; NIMMO, 2021; SURBRUGG, 1993). Taylor et al. (2010) avaliou com um traçador viral para avaliar a contaminação de aquífero sob saprolito de gnaiss, e grande parte não foi recuperado, indicando adsorção. Outro aspecto no saprolito é a biodiversidade de bactéria, e Arquea especializadas. Fungos e associações com bactérias intemperizam minerais disponibilizando-os às plantas em um ciclo biogeoquímico, que em escala de tempo geológica influi sobre o ciclo de CO₂ (OESER et al., 2018).

Saprolitos suprem critérios de fertilidade análogos aos solos, como a CTC gerada pelo caráter iluvial da argila, ou in situ que reveste seus poros e fraturas, aeração, e condutividade hidráulica. Quanto mais intemperizado e poroso, maior também é o alcance de raízes no saprolito. Raízes liberam exsudatos que com o tempo pode gerar um acúmulo de matéria orgânica, que, por sua vez, reduz os sinais de degradação pela estabilização das partículas e manutenção da umidade. O saprolito é essencial para manutenção de culturas pela verossimilhança das propriedades do saprolito com o solo, inclusive como habitat faunístico e de microrganismos. Em solos rasos o saprolito assume maior relevância no fornecimento nutricional vegetal e no risco de salinização. As limitações podem ser contornadas com medidas

conservacionistas para uso agrícola, ou para uso conservacionista. A limitação é maior em solos afetados por sais e raasos (CASTRO; HERNANI 2015; FONTANA et al., 2017; STONE; COMERFORD, 1994; MAGALHÃES; BORTOLUZZI; MANTOVANI, 2013; SANTOS et al., 2017; WALD; GRAHAM; SCHOENEBERGER, 2013).

As propriedades geotécnicas de solos são importantes para construções de diques, aterros, regulação de construções. Obras realizadas sem um estudo geotécnico prévio são por vezes custosos ou irremediável seu reparo ou reconstrução, até a custo de vidas. Um estudo em solos saprolíticos de granito, um com histórico de deslizamento, que era solo saprolítico rico em biotita, e outro sem histórico de deslizamento era saprolítico vermelho, ambos de matrizes de feldspato. Para avaliação fizeram-se caracterizações químicas, físicas e mineralógicas, além de valores de condutividade hidráulica, compressibilidade unidimensional e resistência ao cisalhamento. revelou que o terreno que teve boa drenagem desenvolveu quantidade de caulinita que ocasionou o deslizamento (HEIDEMANN; BRESSANI; FLORES,2021).

Escobar (2019) utilizou métodos espectroscópicos para avaliar cepas comerciais de *Acidithiobacillus thiooxidans* na biolixiviação de níquel de amostras saprolíticas de minas. Os microrganismos baixaram o pH para acelerar a dissolução de níquel do saprolito, sendo seu resíduo ambientalmente seguro. A contaminação por metais pesados como urânio tem alta resiliência no ambiente. Para mitigar isso, Jung, Xu e Roden (2019) testou a sorção de urânio, e os saprolitos com maior quantidade de goetita formam mais eficientes, resistindo a dessorção. e que o longo prazo, testado por 3 meses. para sorção é mais eficiente. O experimento ocorreu com amostras de subsolo na presença de Ca^{2+} e HCO_3^- . Nos primeiros dois dias houve uma rápida sorção e depois foi mais lenta e gradual pelos 3 meses. Concluiu-se que as superfícies internas dos saprolitos continuaram a tornar o processo irreversível, prendendo o urânio. Confirmando o trabalho de Philips, Watson e Roh (2007) que diz que o urânio se associa a fosfatos, óxidos de ferro, manganês, alumínio e sulfatos.

A interação no intemperismo biogeoquímico de superfícies expostas de saprolitos com microrganismos e plantas inferiores foi estudado por Trindade et al. (2001) em taludes da Zona da Mata do estado de minas gerais. Estas interações visam a estabilidade de agregados. Cianobactérias foram isoladas para replicação, e os resultados de ciclagem biogeoquímica variaram de acordo com o caráter máfico ou félsico e o grau de intemperismo do saprolito. Os máficos mascaram os resultados pela abundância de bases trocáveis. Os resultados mostraram que o efeito de estabilização de agregados é dado por quelatos de Fe-MO das bactérias quimiolitotróficas. No MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) viu-se que a mucilagem de polissacarídeos uniu a matéria orgânica aos minerais liberados da camada saprolítica. Estudo

semelhante de Trindade et al. (2005) para controle erosivo e microestruturação biológica por fungos, líquenes, musgos e cianobactérias de saprolitos de gnaiss, diabase, itabirito, xisto, e resíduos de mina de ouro. As crostas contabilizaram maiores teores de Fe, Mn, Cu, Zn, com K, Mn e Zn se concentrando mais na crosta, e o Fe com teores concentrados na zona de alteração de subsuperfície do saprolito.

O sistema solo-saprolito funciona como um filtro, e para mensurar a eficiência do saprolito, e como se dá essa mitigação de contaminantes, Ferreira e Bacellar (2014) conduziu experimento no centro de tratamento de resíduos sólidos de Belo Horizonte/MG, que está sobre gnaiss de 10 a 20 metros de profundidade, de textura franco arenosa e horizonte CN franco argilosa. Há um aquífero na área e a preocupação de contaminação do mesmo. O experimento se deu em amostras em colunas e aplicada soluções, e contabilizada a lixiviação. Houve uma redução da condutividade elétrica, mesmo após 40 anos de operação do CTRS, e a pressão real no campo ser 150 menor que do experimento, é certo inferir que o poder de retenção do saprolito é bem maior na realidade. Os autores discutiram os dados e concluíram a ocorrência de precipitação química de Al, Ca, Co, Li, S, Sr, P, Mg, Mn, K, Na, Ti e Zn. Foram lixiviados Ba, Cu, Cr, Fe, Y e V. Os elementos Cu e Fe foram imobilizados na fração coloidal. Todavia não se tem uma segurança de constância de retenção de contaminantes. Teve momentos em que houve lixiviação na coluna de teste.

A condutividade hidráulica parece ser determinante para as alterações químicas, e a forma de se distribuir no saprolito é dada por canais (93 %), a menos que os planos de foliação e cisalhamento estejam saturados, daí o fluxo cessa em decorrência de obstruções por argilas ou óxidos de Fe e Mn. A condutividade K_{sat} é bem reduzido no limite da zona saprolítica para o solo, e melhor identifica a transição solum-saprolito que a textura. (VEPRASKAS et al., 1991; 1996). A porosidade do saprolito é induzida por deformação, raízes, intemperismo de biotita, rachaduras pela expansão por congelamento, fraturamento por instabilidades topográficas (HAYES et al., 2019).

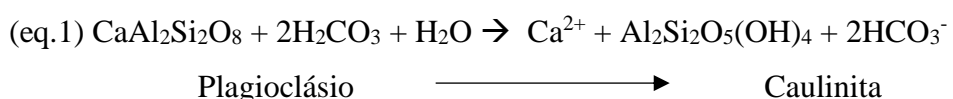
2.4 Processo de formação de carbonato em saprolitos derivados de rochas cristalinas

Formação de carbonato é o processo geoquímico que resulta na formação de carbonatos diante da reação de hidrogenocarbonato e ácido carbônico com cátions derivados da dissolução de minerais. Pesquisas relacionadas à formação de carbonato em saprolitos são raras no Brasil, raros também são os estudos dos saprolitos derivados de rochas ácidas em condições climáticas de baixa precipitação, propícias ao desenvolvimento do processo de formação de carbonato.

Em um estudo associado à caracterização de solos rasos e respectivos saprolitos no Estado de Pernambuco, Santos (2015) identificou indícios micromorfológicos em lâmina de microscopia ótica, dissolução cálcica de plagioclásios, indicando existência do processo de formação de carbonatos. O processo de formação de carbonatos provavelmente transcende o perfil estudado e pode se estender por milhares de quilômetros quadrados, abrangendo o domínio de saprolitos análogos presentes no semiárido brasileiro.

Um estudo mais aprofundado sobre a formação de carbonatos secundários no semiárido, região mais seca de Pernambuco torna-se, então, necessário. Não há referências da ocorrência de formação de carbonato em saprolitos derivados de rochas metamórficas ácidas na literatura científica em clima semiárido. No entanto, este processo pode somar-se aos processos análogos ocorrentes em outras regiões semelhantes do mundo para contribuir de forma expressiva sobre o controle dos teores de CO₂ atmosférico. O desenvolvimento do estudo sobre o processo de formação de carbonato em saprolitos derivados de rochas metamórficas ácidas pode, então, iniciar uma nova vertente para o tema, assim como deve demonstrar que condições litológicas ainda não relatadas na literatura científica também podem contribuir para o sequestro de CO₂ atmosférico em saprolitos, atenuando o processo do efeito estufa. A identificação de novas condições litológicas, gênicas e climáticas que resultam no processo de carbonatação podem expandir as estimativas sobre a contribuição deste processo para a captura de CO₂ atmosférico.

Saprolitos cuja geoquímica favorecem a formação de carbonato têm sido pouco estudados no Brasil. No entanto, em escala internacional, são relevantes os estudos que visam elucidar como a alteração de minerais e as reações dos seus produtos com íons carbonato atuam no sequestro de CO₂ atmosférico (GOLDBERG et al., 2008; GYSI; MA et al., 2020; STEFÁNSSON, 2008; HUIJGEN; WITKAMP; COMANS., 2005). Nos solo-saprolitos de áreas de chuvas sazonais e escassas, de alta evapotranspiração, os cátions básicos se acumulam (equação 1), e essa saturação junto ao ácido carbônico implica em precipitação de (Ca, Mg, Fe) CO₃ (SANTOS, 2015).



A formação de carbonato em saprolitos é um processo natural de captura de CO₂ por agentes da intemperização da rocha, na reação de óxidos de cálcio e magnésio com o HCO₃⁻ resultando em um produto estável pouco solúvel (SANNA et al., 2014). Em um estudo de eficiência de formação de carbonato, Carneiro et al. (2013) de forma indireta em laboratório,

constatou um predomínio de calcita ferrosa precipitada na superfície da amostra, ou seja, alta taxa de íons precipitados de diferentes carbonatos. Na Espectrometria de raios-x mostrou o aparecimento de picos de Na, Mg, Ca, Fe, e um pico bem pronunciado de oxigênio, o que indica lixiviação e carbonatação. A estabilidade do CO₂, após a formação de carbonato, é permanente, pois em quaisquer condições normais de valores de pH e precipitação, as perdas do CO₂ armazenado são insignificantes em uma escala de tempo humana (ALLEN; BRENT, 2010). Os íons bicarbonato resultantes da fixação de CO₂ aceleram a formação de carbonato, mesmo em temperaturas entre 25-90°C, e pressão parcial de CO₂ de 1 atm, fato este confirmado pelo experimento de aditivação com glicinato de sódio e potássio, meio alcalino, por Liu e Gadikota (2020). Em Planossolos, íons como Ca²⁺, e HCO₃⁻ ascendem no perfil e acumulam calcita na superfície do horizonte Btn. com pressão parcial de CO₂ baixa. As reações entre as fases gasosa, líquida e sólidas no regolito é dependente da porosidade, tortuosidade, permeabilidade, equilíbrio da pressão parcial de CO₂ e íons bicarbonato com a solução do solo e atividade metabolizada por organismos do regolito (KÄMPF et al., 2012; NAWAZ, 2010).

Em nível global, o ecossistema terrestre mitiga de 7 a 33 % das emissões de carbono para a atmosfera de fontes antropogênicas, que giram em torno de 645.1015 Pg de C (ZENG et al, 2019). Contudo, estudos de armazenamento de carbono em camadas mais profundas do regolito são escassos, principalmente os relacionados a formação de carbonato no saprolito. Os principais fatores que influenciam a formação de carbonato na zona saprolítica são a geoquímica e litologia com cátions básicos, o clima, precipitação, temperatura superficial, radiação solar e conteúdo de água (WALKER et al. 2021; FRIEDLINGSTEIN et al., 2019; GAILLARDET et al., 2018).

Os saprolitos oriundos de rochas máficas e ultramáficas, pela maior concentração de cátions metálicos, são os mais eficientes na formação de carbonatos. Nas condições normais de temperatura e pressão, a reação de transformação de silicatos em carbonatos, como calcita (CaCO₃), magnesita (MgCO₃), e siderita (FeCO₃), é baixa. Há uma forma industrial *in situ*, não aplicável a solos, mais eficiente em que se fornece energia, calor, pressão ou uso de ácidos e processos físico-químicos, otimizando o uso de rejeitos saprolíticos para capturar CO₂, porém de alto custo, e não se aplica a forma natural de carbonatação em saprolitos *in situ* (HAQUE; SANTOS; CHIANG, 2019; PARK; FAN, 2004; RAHMANI, 2020; SAUERBRONN et al., 2019; NAVARRO, 2021)

A formação de carbonato é mais ativa em basaltos. Os basaltos são ricos em Ca, Mg e Fe que são facilmente liberados na reação aquosa com CO₂. Minerais silicatados são rapidamente dissolvidos, isso tende a precipitar carbonatos ao invés de neoformação de óxidos,

argilas e zeólitos. Alguns basaltos não são adequados para o processo de formação de carbonato (DESSERT, 2003; GISLASON et al., 2014; MCGRAIL et al., 2006). O basalto de Sagamat data de atividade vulcânica na Península a 66 milhões de anos (TIJA, 2010). Sua capacidade de armazenar CO₂ permanentemente em saprolitos derivados dele foi investigada por Ayub et al. (2020). Analisado no EDX a composição foi C, O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti e Fe, mas os principais foram Ca, C e O. Com o alto percentual de óxidos como CaO (11.20 a 15.74%) e MgO (4.14 a 6.54 %), e em microscopia os microporos variaram de 0.1 a 1.5 µm de diâmetro. Com esses resultados há potencial para a formação de carbonato. Inicialmente formando calcita, magnesita na reação com bicarbonatos (equação 2). Fora atestado o potencial de formação de carbonato como sumidouro de CO₂ ou formação de carbonato ex situ.



A quantidade de massa geológica necessária para imobilizar uma massa de CO₂ correlacionando com outros dados como a saturação de água, porosidade, e projeção na escala de tempo, foi calculada por Brennan e Burruss (2003). O armazenamento geológico é viável economicamente e tem alta capacidade (SILVA, 2009). A dissolução de carbonatos é ótima em potencial hidrogeniônico de 2, e a precipitação em valores de 8 a 13. Em estudos de com intervalos de amostragem de 100, 500, 1000, e 2000 horas com basalto em solução aquosa, as concentrações de Ca, Mg, Fe na solução ainda aumentavam (O'CONNOR, 2004).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de estudo

O Estado de Pernambuco está dividido em três regiões climáticas segundo a classificação de Köppen l-Geiger (KÖPPEN, 1931). A região a leste, denominada zona da mata, apresenta um clima de monção com curta estação seca (Am). A região do agreste, no centro-oeste, possui um clima semiárido com inverno seco (Aw), e um clima semiárido mais seco e quente (Bsh) é observado no sertão ao oeste.

O estudo sobre o processo de formação de carbonato foi realizado em camadas saprolitogênicas de perfis sob clima semiárido do Estado. O Estado de Pernambuco é geologicamente constituído por um embasamento cristalino formado por ortognaisses no Leste e no Centro-Oeste e granitóides indiferenciados no Oeste.

O estudo se concentrou em horizontes autóctones de perfis de regolito, incluindo saprolitos derivados de Gnaisses no domínio geomorfológico do Planalto da Borborema, (Figura 1). Este complexo engloba parte da região Agreste do Estado de Pernambuco até a divisa com o Estado da Paraíba. A litologia em Jataúba é de ortognaisses e do Neoproterozóico / Cambriano (ARAÚJO FILHO; CARVALHO, 1996; CPRM, 2001).

Os perfis foram coletados no município de Jataúba (Figura 2), que, segundo o Serviço Geológico do Brasil, é localizado na mesorregião Agreste e Microrregião do Vale do Ipojuca em Pernambuco. Jataúba faz limite ao Norte com o Estado da Paraíba, e ao a sul com Belo Jardim, a Leste temos o município do Brejo da Madre de Deus, e a Oeste Poção, com altitude de 516 metros, inserido no Bioma Caatinga. e sua sede nas coordenadas geográficas de 07 Graus 59 min. 24 seg de latitude sul e 36 Graus 29 min. 47 seg de longitude oeste, com um território com 712,7 km² de área, representando 0.72 % do Estado de Pernambuco. A distância da capital Recife é de 225,5 km, e o acesso é feito pelas rodovias BR-232 e PE-145.

Jataúba e seu riacho de mesmo nome está na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe, cuja nascente encontra-se na divisa com Poção. É um município inserido no bioma Caatinga.

As classes de solo predominantes em Jataúba na escala 1:100.000 do SIBCS (2006) foram em uma maior representatividade Luvisolo Crômico, Planossolo Nátrico, Neossolo Litólico, e Neossolo Regolítico. Em menor representação temos Neossolo Flúvico, Argissolo Amarelo, e Argissolo Vermelho (Figura 3).

Os perfis coletados se localizavam em vegetação preservada (Figura 4) a 15 m da margem da rodovia estadual PB-214, os 3 perfis são equidistantes em aproximadamente 900m

(Figura 5). As localizações são: Perfil 1 (P1) na coordenada 7°58'14.3"S 36°31'13.7"W; Perfil 2 (P2) 7°58'07.3"S 36°31'21.0"W; Perfil 3 (P3) 7°58'02.4"S 36°31'25.8"W.

Em Jataúba no levantamento florístico de vegetação lenhosa de Moura e Sampaio (2001) foram identificadas até o nível de espécie foram 109, e 43 não foram identificadas até o epíteto específico. As famílias com maior número de espécies foram: Myrtaceae (12); Mimosaceae (8); Bignoniaceae, Caesalpiniaceae e Euphorbiaceae (6); Fabaceae, Rubiaceae, Sapindaceae e Verbenaceae (4). A vegetação é de caatinga hiperxerófila arbustiva pouco densa a aberta.

O município de Jataúba foi criado em 31/12/1958, atualmente segundo o IBGE tem aproximadamente 17 mil habitantes e densidade demográfica de 23 hab/km². Os setores econômicos são: comércio, serviços, administração pública, e agropecuária de caprinos principalmente. O trabalhador formal tem um rendimento médio de 1,5 do salário-mínimo e PIB per capita de R\$ 7889,50.

Figura 1. Domínios Geomorfológicos do Estado de Pernambuco

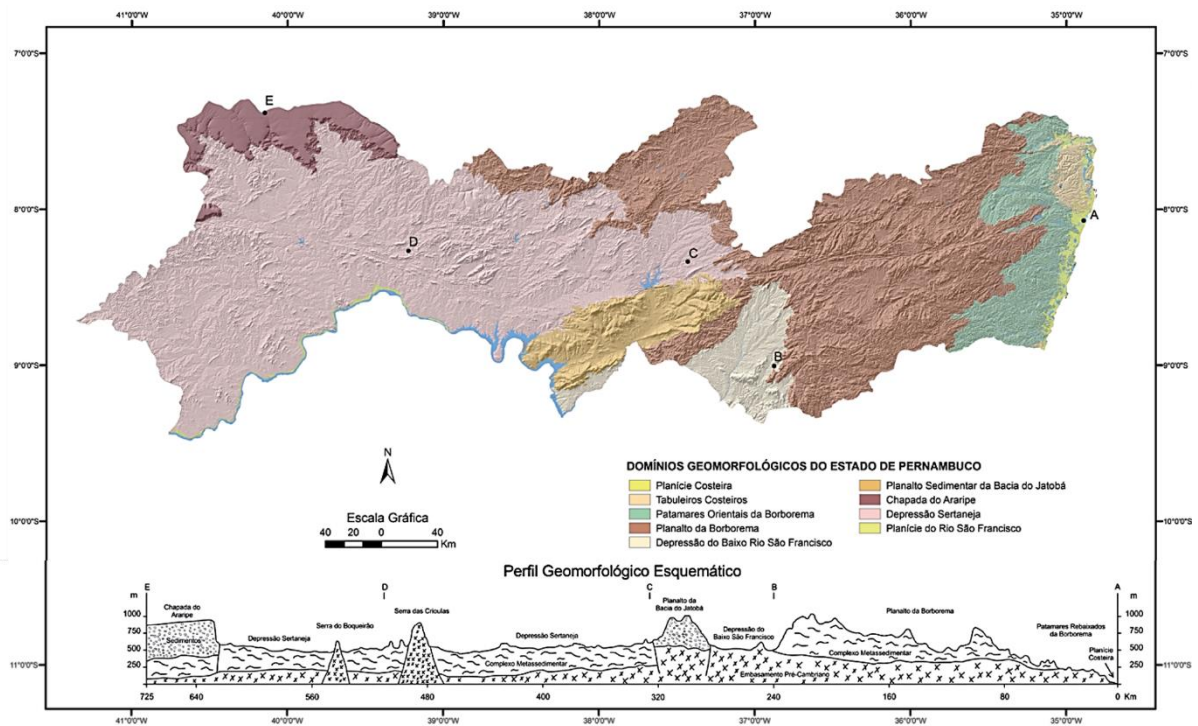


Figura 2. Localização de Jataúba no Estado de Pernambuco Nordeste do Brasil

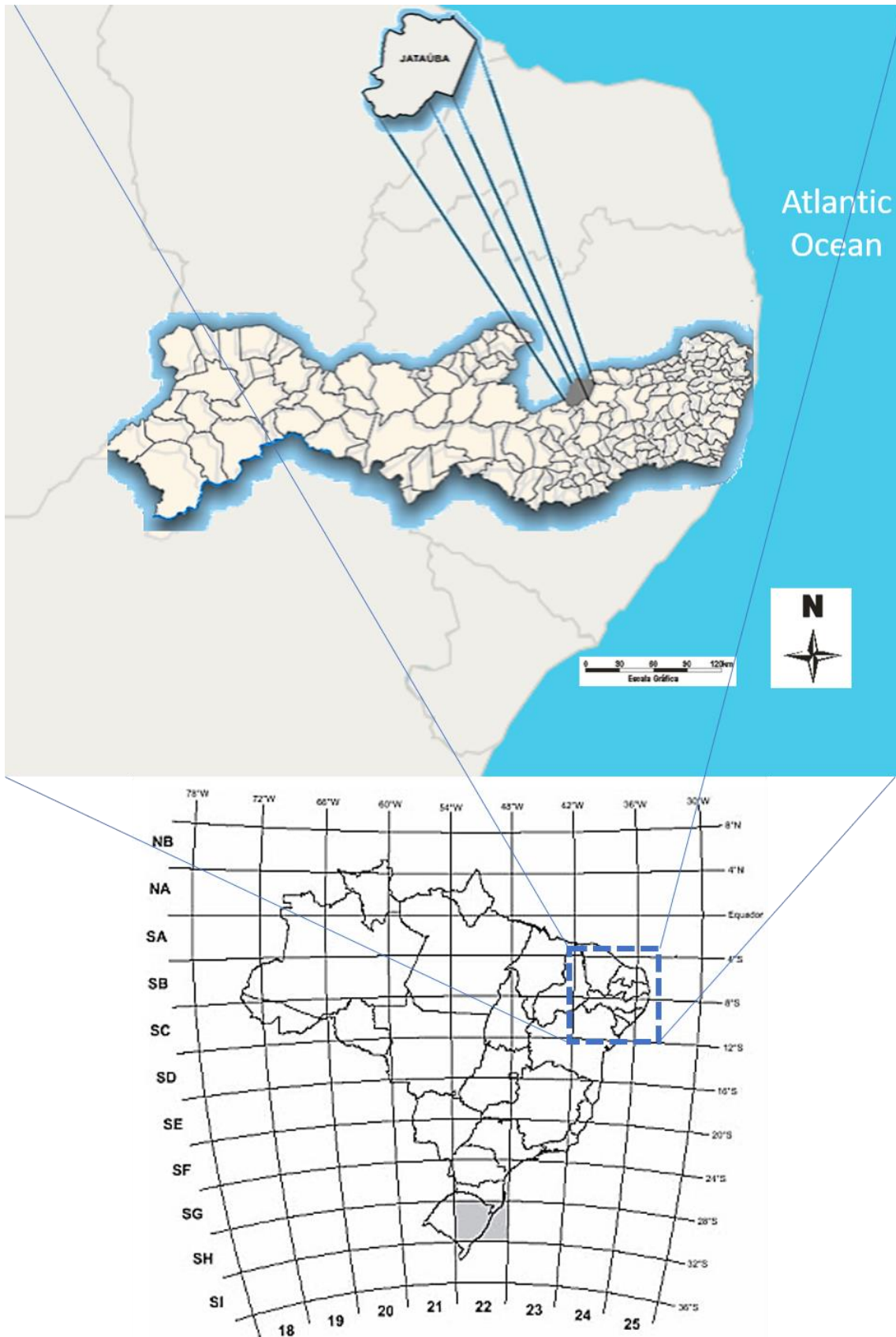


Figura 3. Mapa de solo de Jataúba em escala 1:100.000 da Embrapa e classes de solos do SiBCS

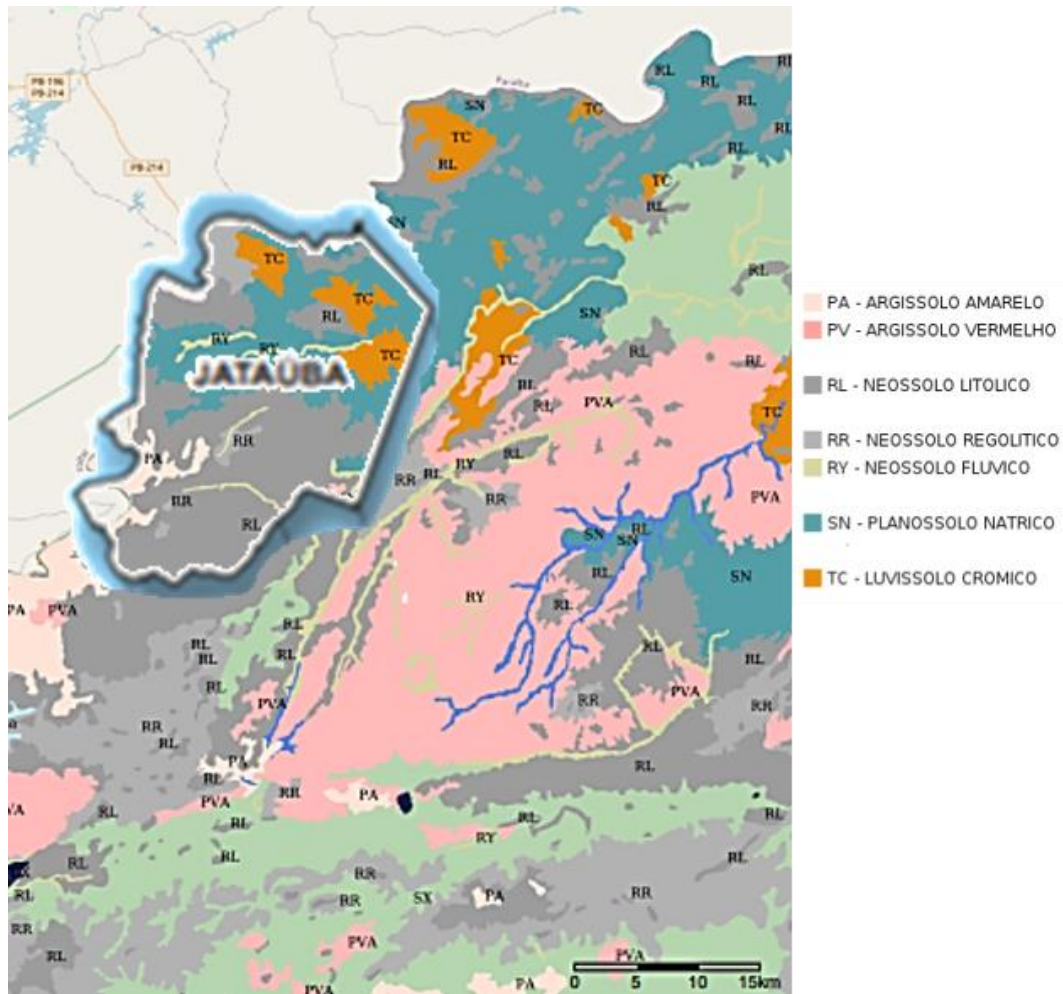
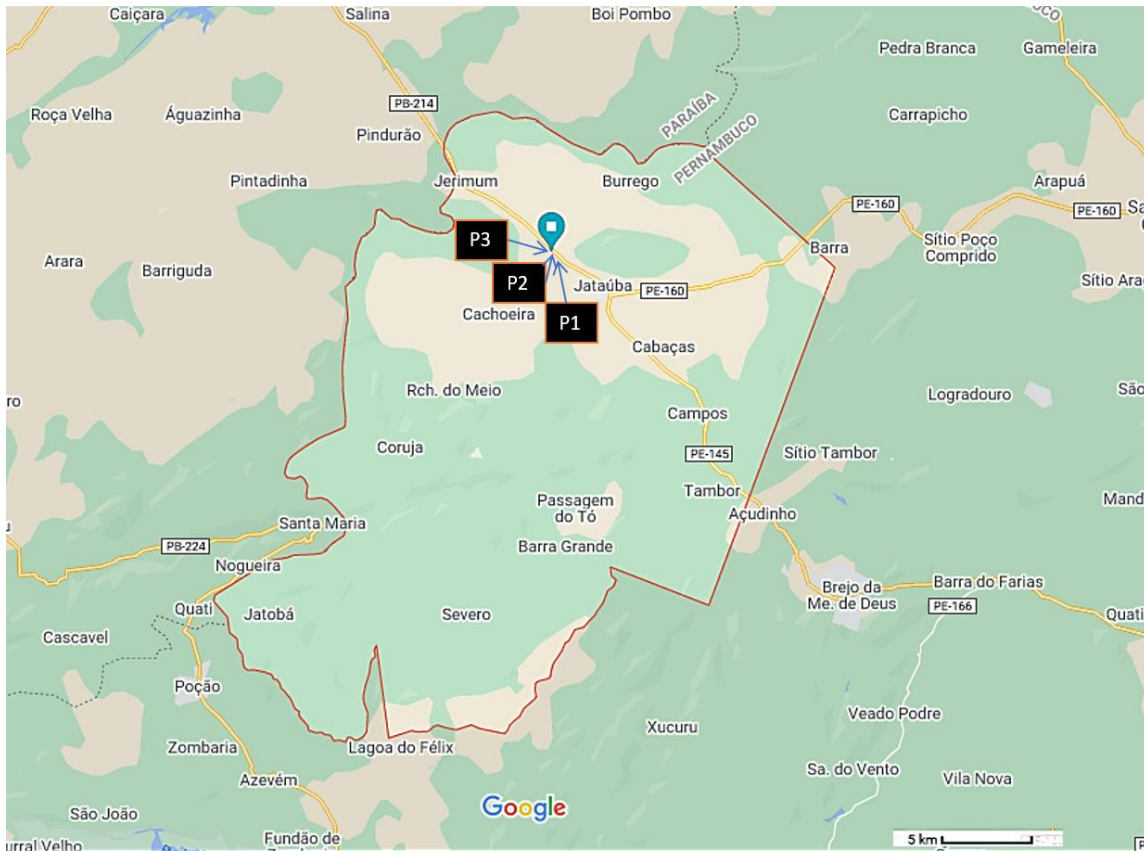


Figura 4. Fotos da área em estudo e sua vegetação nativa



Figura 5. Representação da localização dos perfis estudados em relação a Jataúba e região



3.2 Classificação do solo e saprolito e descrição morfológica do solo e saprolito

Os solos foram classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 2018). Os saprolitos foram classificados pelo Subsolum Reference Groups (SRG) proposto por Juilleret et al. (2016). No SRG, inicialmente, temos que classificar o material de referência a depender de quão visível é a estrutura do material de origem, em ordem decrescente de intemperização. Depois é definido o qualificador primário ou principal, que são Regolithic, Saprolithic, Paralithic, Lithic, Haplic. Temos ainda qualificadores suplementares de textura, morfologia e litologia.

A descrição morfológica e coleta de amostras dos solos foram realizadas conforme as recomendações do Manual de Descrição e Coleta de Solos no Campo (SANTOS et al., 2005). Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas dos pedológicos e saprolíticos.

NA descrição morfológica e a coleta de amostras dos saprolitos foram realizadas de acordo com o “Sistema Brasileiro de Descrição de Saprolitos no Campo”, sugerido por Santos (2015) (atualmente em construção). Nele, é sugerido o uso do SRT (BUOL, 1994) em complementação ao SiBCS (EMBRAPA, 2013), sem sobreposições, classificando separadamente o saprolito e a camada pedogenética. Na junta das nomenclaturas do solo e do

saprolito pelos dois sistemas, se recomenda o uso da preposição “sobre”. Conforme vá se avançando em número de camadas diferenciáveis, na classificação se emprega o uso da preposição “sobre” novamente. Por exemplo: “Chernossolo Argilúvico Órtico típico sobre Gneiss Schistidap sobre Gneiss Schistarap”.

No sistema em construção, é proposto inserções no SRT (Figura 6) para adequar os sienitos com maior especificidade. Outra proposta é voltada para rochas ígneas quanto ao percentual de sílica usando o proposto por Streckeisen (1976, 1978) (Figura 7). No atributo de contato lítico, difere-se do SiBCS em categorizar o contato, de fracamente alteradas (R) a rochas fraca e moderadamente alteradas (RCr) ou (CrR). Na falta de limitação do contato lítico a 2 m, não se sobrepõe e sim completa Santos (2005).

As secções isovolumétricas representadas pelos diferentes graus de intemperização são considerados horizontes saprolíticos. A resistência do saprolito, seguindo Gulla e Matano (1997), Pedron (2007) e Borrelli et al. (2014), é o critério para utilização de classes de grau de intemperização e seu simbolismo para os horizontes saprolíticos (Tabelas 1 e 2). Aqui exclui-se a necessidade de sufixo (r) por já serem horizontes saprolíticos. A ordem descritiva do Manual de Descrição e Coleta de Solos no Campo (SANTOS et al., 2005) é seguida para descrição morfológica dos horizontes saprolíticos desse novo sistema classificatório, em ordem: tipo; profundidade; cor; textura; estrutura; porosidade; consistência e transição. A descrição da estrutura e a textura dos saprolitos é feita segundo Best (2003), usando critérios petrológicos e não os pedológicos pela semelhança com a rocha original.

Além da descrição morfológica, também foi realizado testes para a avaliação da potencialidade efetiva dos sistemas solo-saprolitos. Os testes deram ênfase aos sistemas de fraturas dos saprolitos, os quais foram analisados pelas seguintes características: quantidade presente em uma área de 100 x 100 cm, espessura, comprimento, espaçamento, presença de raízes e presença de preenchimentos ou revestimentos, procurando traçar uma relação entre a estrutura do saprolito e a potencialidade do sistema solo-saprolito.

Para análise do ângulo de fraturamento do saprolito, foi aplicada a metodologia proposta por Pedron (2007). A tomada das imagens foi padronizada para o ângulo horizontal, com a montagem da câmera sobre tripé com nível de bolha. A padronização para o posicionamento da câmera a 1,5 m do perfil foi realizada com o auxílio de uma trena.

Para o teste de escavação, foi utilizada uma pá reta que foi introduzida na superfície dos horizontes e camadas do solo e saprolito. Os horizontes foram enquadrados nas classes de resistência segundo os critérios utilizados por Pedron (2007).

Tabela 1. Classes de intemperismo para gnaisses ou rochas metamórficas semelhantes. Baseado no proposto por Gullà e Matano (1997), Pedron (2007) e Borrelli et al. (2014), e retirado de Santos (2005)

Classe	Descrição	Símbolo
I	Produz som metálico à colisão do martelo pedológico; impenetrável ao golpe de qualquer ferramenta manual de campo.	R(1)
II	Produz som metálico à colisão do martelo pedológico; fragmenta-se em blocos compactos quando golpeada com picareta; não se fragmenta ao golpe do martelo pedológico ou faca.	RS
III	Produz som metálico à colisão do martelo pedológico; fragmenta-se em blocos compactos quando golpeada com picareta ou martelo pedológico; não se fragmenta ao golpe da faca; quando presente, xistosidade fraca (Figura 5C).	SR
IV	Produz som metálico à colisão do martelo pedológico apenas em resquícios de leucossomas ou fragmentos de rocha presentes em resquícios de melanossomas; fragmenta-se em blocos quebradiços quando golpeada com picareta, martelo pedológico ou faca. Não pode ser fragmentada com as mãos	S(2)
V	Produz som metálico à colisão do martelo pedológico apenas em resquícios de leucossomas ou em fragmentos de rocha presentes em resquícios de melanossomas; fragmenta-se em blocos quebradiços quando golpeada com picareta, martelo pedológico ou faca; somente com dificuldade pode ser fragmentada com as mãos; xistosidade, quando presente, é forte.	SC
VI	Produz som metálico apenas em fragmentos de rocha; fragmentos de rochas predominantemente na fração calhau ou maior; não apresenta resquícios de leucossomas ou melanossomas; fragmenta-se com as mãos com resistência moderada em massa texturável.	CS
VII	Produz som metálico apenas em fragmentos de rocha; fragmentos de rocha predominantemente nas frações areia e cascalho; fragmenta-se facilmente em uma massa texturável ou agregados. Pode apresentar evidências de processos de agregação.	Cr(3)

⁽¹⁾ Rocha visualmente inalterada; ⁽²⁾ Estado intermediário entre rocha e solo; ⁽³⁾ Camada formada por sedimentos, saprolito ou material de rocha não consolidado ou outros materiais de rocha não cimentados possíveis de fragmentar facilmente com as mãos.

Tabela 2. Classes de intemperismo para granitos, sienitos ou rochas ígneas semelhantes. Baseado no proposto por Gullà e Matano (1997), Pedron (2007) e Borrelli et al. (2014) e retirado de Santos (2005).

Classe	Denominação	Descrição	Símbolo
I	Rocha Inalterada	Produz som metálico à colisão do martelo pedológico; impenetrável ao golpe de qualquer ferramenta manual de campo.	R(1)
II	Rocha pouco alterada	Produz som metálico à colisão do martelo pedológico; fragmenta-se em blocos compactos quando golpeada com picareta; não se fragmenta ao golpe do martelo pedológico ou faca.	RS
III	Rocha moderadamente alterada	Produz som metálico à colisão do martelo pedológico; fragmenta-se em blocos compactos quando golpeada com picareta ou martelo pedológico; não se fragmenta ao golpe da faca; possível alteração esferoidal ou esfoliação.	SR
IV	Rocha intermediariamente alterada	Produz som metálico à colisão do martelo pedológico; fragmenta-se em blocos quebradiços quando golpeada com picareta, martelo pedológico. Não pode ser fragmentada com a faca ou com as mãos; possível alteração esferoidal ou esfoliação.	S(2)
V	Rocha muito alterada	Não produz som metálico à colisão do martelo pedológico; fragmenta-se em blocos quebradiços quando golpeada com picareta, martelo pedológico ou faca; somente com dificuldade pode ser fragmentada com as mãos; possível alteração esferoidal ou esfoliação.	SC
VI	Rocha extremamente alterada	Não produz som metálico à colisão do martelo pedológico; fragmenta-se com as mãos com moderada dificuldade em uma massa texturável. Não apresenta evidências de processos de agregação.	CS
VII	Rocha completamente alterada	Não produz som metálico à colisão do martelo pedológico; fragmenta-se em uma massa texturável ou agregados. Pode apresentar evidências de processos de agregação.	Cr(3)

(1) Rocha visualmente inalterada; (2) Estado intermediário entre rocha e solo; (3) Camada formada por sedimentos, saprolito ou material de rocha não consolidado ou outros materiais de rocha não cimentados possíveis de fragmentar facilmente com as mãos.

Figura 6. Níveis categóricos de Buol (1994) com modificações de Santos (2015)

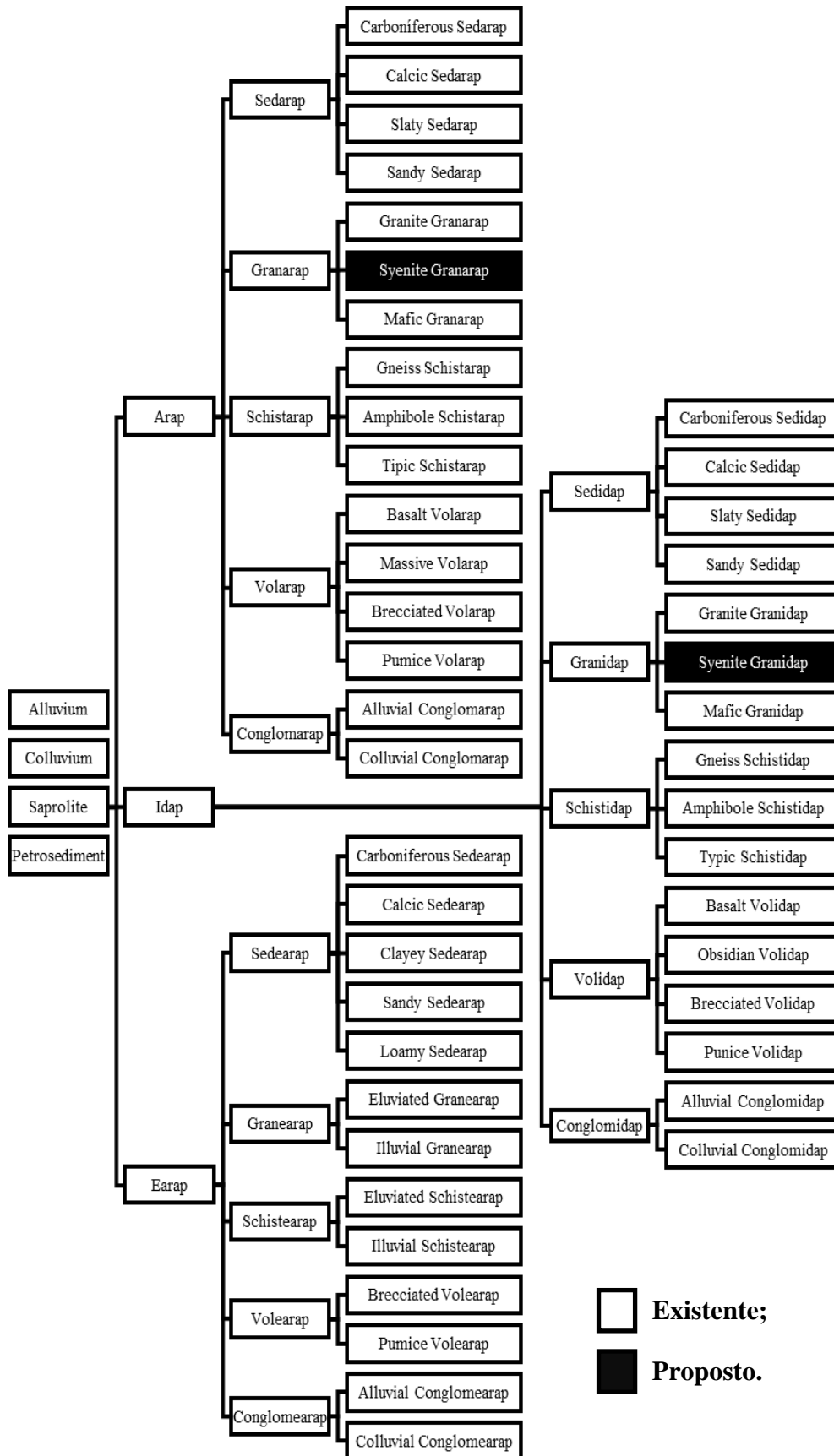
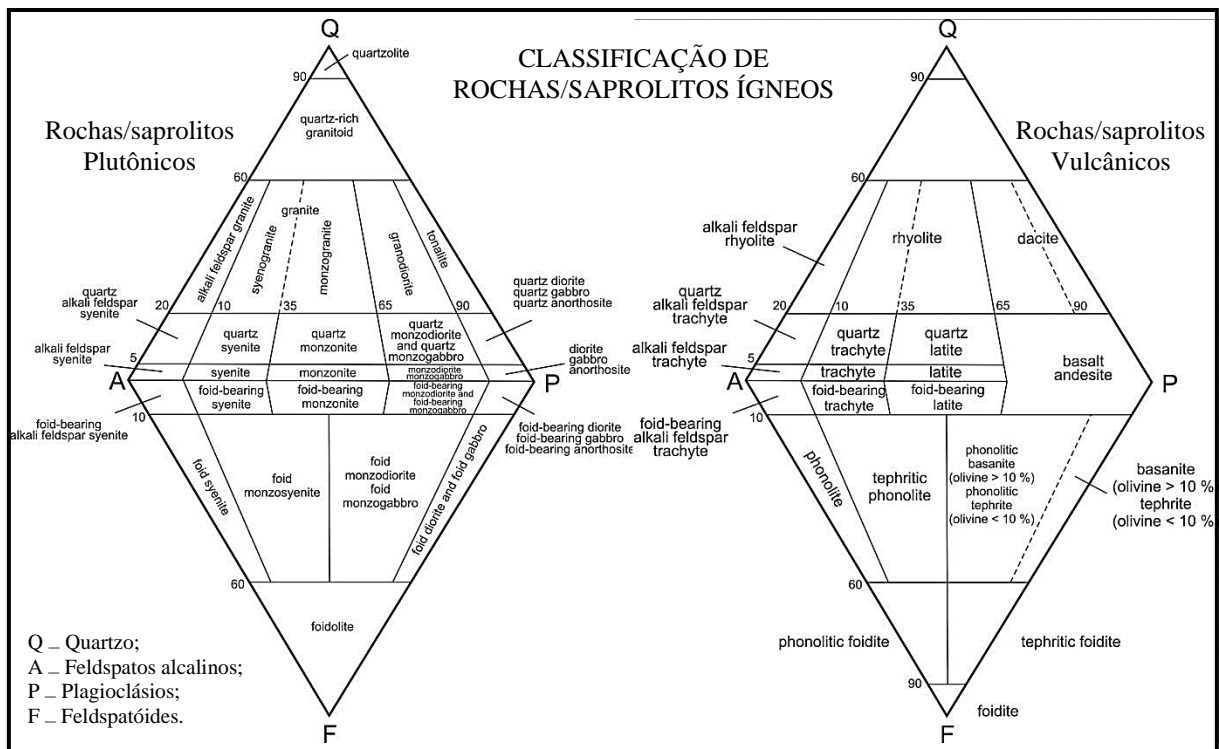


Figura 7. Nomenclatura de rochas ígneas a ser utilizada no quarto nível categórico do SRT para classificar os saprolitos (STRECKEISEN, 1976, 1978).



3.3 Coleta e preparo das amostras

Na coleta, abriu-se o perfil em área conservada com vegetação nativa e com auxílio de martelos pedológicos fora amostrado e coletado bandejas plásticas. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e identificadas. As amostras deformadas foram pesadas, secas ao ar no galpão de solos da UFRPE, destorroadas observando se há concreções ou restos vegetais.

Amostras indeformadas foram coletadas em forma de torrões dada a agregação e dureza do solo-saprolito.

3.4 Análises químicas

Para as análises químicas de rotina ou para fins de fertilidade, seguiu-se as metodologias da Embrapa (2009) para determinações de pH (água e KCl), carbono orgânico total (COT), fósforo disponível, cálcio, magnésio, potássio sódio e alumínio trocáveis, e acidez potencial (H+Al). A soma e saturação de bases, saturação por alumínio, CTC e saturação por sódio foram calculados.

3.4.1 Determinação de fósforo, potássio e sódio

O extrator para avaliar a disponibilidade de P, K e Na no solo é o extrator de Mehlich1 ou duplo ácido ou Carolina do Norte (0,0125 mol L⁻¹ de H₂SO₄ e 0,050 mol L⁻¹ de HCL), baseia-se no princípio da dissolução de minerais contendo P e/ou deslocamento de P retido nas superfícies sólidas do solo para a solução, por ânions capazes de competir com o P pelos sítios de retenção. É o extrator que apresenta vantagem na rotina pois os extratos são límpidos, decantam facilmente, e dispensam a filtragem das suspensões de solo, e eficiente em estimar fósforo nativo solúvel (MEHLICH, 1953).

Para determinação do potássio e sódio é feita uma curva padrão de 0 a 100 mg.L⁻¹ para calibrar o fotômetro de chamas, no excel inserir gráfico de dispersão dos valores da curva, é dada uma equação e valor R², esse valor deve ser próximo de 0,99. O fotômetro de chamas deve ser ajustado para a chama em forma de cone invertido, com pequenos picos definidos. Na leitura o aparelho succiona a amostra e nebuliza na chama, o elemento emite fóton característico, o resultado é em absorbância, esse valor é colocado na equação para se obter o teor de potássio e sódio.

Na determinação de fósforo a alíquota de 5ml do sobrenadante é acrescida 10ml de solução de molibdato de amônio e ácido ascórbico, é mexida com bastão de vidro e deixado a desenvolver a cor por 1 hora. É lido em espectrofotômetro a 660nm de comprimento de onda. O fator de calibração é obtido por padrão de molibdato de amônio.

Cálculo:

$$P = a \frac{(L - b)}{a} \times d \times 10$$

Em que:

P – Concentração de fósforo disponível no solo, em mg kg⁻¹.

L – Leitura da amostra, em absorbância.

a – Coeficiente angular da reta dos padrões (intercepto).

b – coeficiente linear da reta dos padrões.

d – Fator de diluição do extrato de Mehlich (se não for necessária a diluição, considerar d = 1).

Valor 10 – fator que leva em consideração a diluição solo: extrator.

3.4.2 Determinação de Cátions trocáveis

O extrator utilizado foi solução de KCl 1 mol L⁻¹ para os cátions trocáveis. Para a análise do alumínio trocável os 25 ml do extrato são adicionados de 5 gotas de solução alcoólica indicadora de azul de bromotimol. Com o indicador a amostra adquire cor amarelo cítrico, a

cor de viragem após titulação com NaOH 0,025 mol L⁻¹ é azul. O princípio é que ocorre essa reação: $\text{AlCl}_3 + 3\text{NaOH} \rightarrow \text{Al(OH)}_3 + 3\text{NaCl}$. O Cálculo é dado: Al^{3+} (cmolc dm⁻³ de TFSE) = ml de NaOH gasto na titulação x fator de correção (0,33) (OLIVEIRA,1979). O Cálcio e Magnésio é analisado em espectrofotometria por aparelho de absorção atômica. É usado o cloreto de estrôncio para eliminar interferências de íons refratários. Para determinar as concentrações são usadas curvas-padrão, e a leitura é feita com diluições, dada a sensibilidade do aparelho de absorção atômica.

Soma de bases:

$$\text{S.B} = (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+)$$

3.4.3 Determinação da acidez ativa e potencial

A acidez ativa são os íons H⁺ dissociados na solução do solo. Na sua análise o pHmetro de bancada é ligado com antecedência de 30 minutos para estabilizar com a rede 21 elétrica, depois é calibrado com soluções tampão, que devem estar em temperatura ambiente, de valores de pH 4, 7 e 10, o tampão pH 10 é necessário pela característica alcalina de alguns solos da região. Aos 10 cm³ de solo é adicionado 25ml de água destilada e procedida agitação. Após uma hora é realizada mais uma agitação antes da leitura no pHmetro de bancada mergulhando o eletrodo na solução (EMBRAPA 2009).

A acidez potencial é representada pelos íons H⁺ e Al³⁺ adsorvidos nos coloides e fazem parte do poder tamponante do solo, para se manter em equilíbrio com os íons da solução do solo. O extrator é o acetado de cálcio. O pH da solução 0,5M de acetato de cálcio é corrigido para 7 com ácido acético glacial. Na solução indicadora de fenolftaleína 10g.L⁻¹ é usado o álcool para diluir e gotas de NaOH 0,1M. São adicionadas 5 gotas da solução indicadora por amostra (25ml do sobrenadante). A amostra é titulada com NaOH 0,025mol L⁻¹ até passar de cor transparente para róseo.

Acidez potencial:

$$\text{H+Al/dm}^3 \text{ de TFSE} = (\text{ml gastos na titulação da amostra} - \text{ml da prova em branco}) \times 1,65.$$

Capacidade total de troca de cátions:

$$\text{T} = [\text{S.B} + (\text{H}^+ + \text{Al}^{3+})].$$

Percentual de Saturação por Base:

$$V(\%) = \frac{100 \times S.B}{T}$$

Saturação por Alumínio:

$$m(\%) = (100 \times Al^{3+}) S.B + Al^{3+}$$

Percentual de sódio trocável:

$$PST(\%) = (100 \times Na^+)/T$$

3.4.4 Determinação de matéria orgânica

A análise envolve a conversão de C em CO₂ de todas as substâncias orgânicas presentes no resíduo seja por oxidação, combustão seca e úmida ou digestão. Os reagentes utilizados para oxidação da matéria orgânica foram compostos pelo dicromato de sódio 0,0167 mol L⁻¹ (Na₂Cr₂O₇) a 20% (400g em 2l de solução), e ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄). $3C^0 + 2Cr_2O_7^{2-} + 16H^+ \Rightarrow 3CO_2 + 8H_2O + 4Cr^{3+}$, o íon Cr³⁺ absorve luz na região de $\lambda = 650$ nm, assim o C orgânico do solo pode ser estimado pela determinação espectrofotométrica do Cr³⁺. Uma alíquota é colocada na cubeta e lida no espectrofotômetro de feixe ótico com ajuste de 650nm de comprimento de onda (DONAGEMA et al., 2011).

Cálculo:

$$P \text{ (g/kg)} = L \times Fp \times 10$$

L = leitura da amostra

Determinação do fator Fp:

Colocar 10 mL de cada solução padrão diluída em erlenmeyers de 125 mL. Adicionar 20 mL da solução ácida de molibdato de amônio diluída e uma “pitada” de ácido ascórbico. Proceder da mesma forma indicada para a determinação do fósforo no extrato de solo; anotar as leituras (em absorvância) correspondentes a cada padrão.

O fator Fp é o coeficiente angular da reta que se obtém, cruzando-se os valores de concentração de fósforo (mg/kg) dos padrões no eixo das abcissas e as respectivas leituras no eixo das ordenadas. Para a obtenção direta da concentração de P (mg/kg) no solo, o fator Fp deve ser multiplicado por 10, considerando que a concentração de fósforo na amostra sofreu diluição de 1:10 na extração.

3.5 Análises físicas

O estudo granulométrico da fração areia foi por tamisação e pesagem com malha de 20 mm e depois 2 mm de abertura para areia total, malha de 0,212 mm para obter areia fina, e a areia grossa pela diferença do total. O cascalho foi contabilizado somente depois de tratamento com NaOH 0,1 mol L⁻¹ por 24 h e secagem. (EMBRAPA 2017).

Os cálculos seguem abaixo:

Cascalho

$$T_{\text{casc}} = 1000 \cdot (b/a)$$

Calhaus

$$T_{\text{calh}} = 1000 \cdot T_{\text{calh}} \cdot (c/a)$$

Terra fina

$$T_{\text{tf}} = [1000 - (T_{\text{calh}} - T_{\text{casc}})]$$

T_{casc} – concentração de cascalhos, em g kg⁻¹

T_{calh} – concentração de calhaus, em g kg⁻¹

T_{tf} – concentração de terra fina, em g kg⁻¹

a – massa total da amostra, em g

b – massa do cascalho, em g

c – massa dos calhaus, em g

A argila foi quantificada por sedimentação com base na lei de Stokes em proveta de 1 litro com densímetro. Antes da sedimentação, a amostra foi dispersa 16 h no agitador rotativo tipo Wagner a 150 ciclos por minuto, com solução de NaOH, seguindo metodologia Embrapa (2007). O silte foi calculado pela diferença da das outras frações granulométricas e a amostra inicial.

Para determinação da densidade do solo (D_s) para o saprolito foi usado o método do torrão parafinado, usando o princípio de que o volume do torrão é igual o volume deslocado por ele ao ser mergulhado (EMBRAPA, 2007).

Para a densidade de partículas (D_p), o método foi o do balão volumétrico. Uma massa conhecida da amostra foi posta dentro de um balão volumétrico e sua capacidade foi preenchida com álcool. A diferença do volume usado para preenchê-lo e sua capacidade, é o volume da amostra.

$$D_p = \text{massa/volume}$$

A porosidade total foi dada por: $P\% = (1 - D_s/D_p) * 100$

3.6 Análise mineralógica

Nas frações cascalho e areia, a mineralogia foi determinada observando as características macroscópicas sob lupa binocular, e percentuais da constituição mineral obtidos em escala (LEINZ; CAMPOS, 1979).

A fração argila foi separada por decantação da fração silte em proveta de 1 litro. É procedida a sifonação a cada 24 horas para retirada do sobrenadante seguindo a lei de Stokes. A sifonação foi realizada seguidamente e completando o conteúdo com água destilada até se tornar límpida, ocasião da total retirada da argila (EMBRAPA, 2007). Todas as alíquotas retiradas são deixadas em estufa a 60°C. Após secas são maceradas em almofariz e pistilo de ágata e homogeneizadas em peneira de abertura de 80 mesh.

O silte foi analisado unicamente no formato de pó. A argila foi analisada em pó e orientada com pré-tratamento com finalidade de eliminar óxidos de ferro, matéria orgânica e carbonatos. A argila foi saturada com KCl e analisada em temperatura ambiente e aquecidos a 550°C para detalhar os filossilicatos. Foi analisado após saturação em MgCl₂ e solvatado com glicerol. As análises foram por DRX. A interpretação e identificação de minerais no difratograma seguiu o preconizado por Jackson (1979); Brown e Brindley (1980); Moore e Reynolds (1997).

3.6 Análise geoquímica e descrição por MEV-EDS

As amostras foram maceradas e tamisadas em malha de 0,075mm (200 mesh). A perda por ignição (LOI) foi determinada após as amostras pulverizadas serem secas em estufas a 1000°C.

Os elementos maiores (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅) foram determinados em pastilha prensada por fluorescência de raios X (FRX). A amostra seca em mufla foi para a análise de perda por evaporação, outra parte da amostra foi colocada em cápsula de alumínio e prensada em prensa hidráulica, nessas pastilhas prensadas se deram as análises químicas semiquantitativas. O resultado foi acrescido do valor de perda por ignição, sendo e os valores recalculados para 100%. Para medir a evolução do intemperismo foi usado em cada horizonte o índice de alteração química (NESBITT; YOUNG, 1989) “Chemical Index of Alteration” (CIA), calculado pela equação 1:

eq (1)

$$\text{CIA} = 100 \cdot \left(\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}} \right)$$

Adicionalmente, para mensurar o intemperismo no regolito usou-se o índice de intemperização química (chemical index of weathering, CIW) (HARNOIS, 1988), e o índice de alteração de plagioclásios (plagioclase index of alteration, PIA) (Fedó et al., 1995), ambos calculados por meio das equações 2 e 3.

eq (2)

$$\text{CIW} = 100 \cdot \left(\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}} \right)$$

eq (3)

$$\text{PIA} = 100 \cdot \left(\frac{\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}} \right)$$

Lâminas delgadas foram confeccionadas com resina de poliéster, monômero de estireno para diminuir sua viscosidade, e catalizadores para acelerar a polimerização. A solução impregnante é vertida em recipiente contendo as amostras indeformadas, as quais devem estar em dessecador. Depois o dessecador é fechado e aplicado vácuo para a solução impregnante subir por capilaridade na amostra. A solução é repostada após ser visível a frente da capilaridade, e o procedimento é repetido até que o recipiente e a amostra ter completamente seus poros preenchidos (EMBRAPA, 2017). Após endurecida são colocadas em estufa a 40°C por 72h. Os blocos impregnados foram cortados em fatias de aproximadamente 15 mm de espessura, utilizando-se para tal uma serra com disco adiamantado. Pontos de interesse foram analisados com EDS acoplado a detector de energia dispersiva de raios x (MEV-EDS). As amostras foram revestidas com carbono e examinadas por um MEV, Stereoscan 360 scanning electron microscope, atuando a 20 kV. Posteriormente, os pontos de interesse descritivo foram analisados quanto à constituição elementar com auxílio do EDS, acoplado no equipamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Classificação, morfologia e potencialidade estrutural dos sistemas solo-saprolitos

A inexistência de Sistema de classificação que integre solo-saprolito de forma padronizada, gerou a necessidade de uma combinação de SiBCS (2018), Juilleret et al. (2016)

em um novo sistema proposto por Santos (2015) para este trabalho (Tabela 1). Nos perfis P1, P2, P3 (Figura 7) não houve diferença no grau de intemperização no saprolito, com grau intermediário, ou seja, ainda há distinção dos minerais em escala macro.

As cores foram semelhantes entre os 3 perfis (Tabela 3), indo de bruno escuro no horizonte A, a verde acinzentado no saprolito. O P3 teve uma mudança no matiz no saprolito, e conforme aprofunda-se no perfil, a cor verde é evidenciada, sendo um sinal da presença de formação de filossilicatos secundários do tipo 2:1 (MOTA et al., 2002; OLIVEIRA, 2007). A variação brunada também se assemelha a outros Planossolos (CABRAL et al., 2015). A pouca pigmentação ao longo de todos os perfis é acentuada em profundidade, sendo característico de solos com pouco óxido de ferro. Nos 3 regolitos não houve presença de horizonte de eluviação E (ALVES, 2021; SCHWERTMANN, 1993; SCHENOIST; SCHWERTMANN, 1999).

Com relação à textura (Tabela 3), o horizonte superficial dos 3 perfis tem textura franco arenosa, variando a profundidade 0 a 11 cm. Nos horizontes plânicos, tem-se a textura franco-argilo-arenosa, e no saprolito uma textura fanerítica, evidenciada por grânulos visíveis. Isso ocorre dada a resistência ao intemperismo da rocha precursora. (CORRÊA et al., 2003; SARAIVA et al., 2021).

A estrutura (Tabela 3) é típica de Planossolos (SANTOS et al., 2018), com colunas e moderada no horizonte diagnóstico em P1, P2, P3. Em profundidade, continua formando blocos, mas menores e de estrutura fraca em todos os perfis. No horizonte superficial a estrutura é moderadamente coesa e maciça. As estruturas são efeitos da expansão e contração em ciclos de secagem e umedecimento de argilas de atividade alta (CAPECHE, 2008).

A consistência (Tabela 3) em todos os perfis é friável e ligeiramente plástica e pegajosa no horizonte A, extremamente firme, plástica e pegajosa no horizonte plânico, e extremamente dura, muito firme e pegajosa na transição para o saprolito, condizente com a evolução de Planossolos, que comumente temos eluviação de argilas do horizonte superficial e acúmulo por argilização de feldspatos no horizonte plânico (PARAHYBA et al., 2010).

Figura 8 – Morfologia de Perfis de originados de gnaisses em Jataúba/PE



Tabela 3. Descrição morfológica e classificação de 3 sistemas solo-saprolite de origem gnaïsse em clima semiárido no município de Jataúba/PE

Horizonte	Profundidade (cm)	Cor	Textura	Estrutura	Consistência	Grau de intemperização	Transição
Perfil 1 - Planossolo Nátrico Sálco típico (EMBRAPA, 2018) sobre Haplic saprolite (Clayic, Isolithic) [Gneissic] (JUILLERET et al., 2016).							
A	0 a 11	Bruno-escuro (10YR 4/3, úmido)	franco-arenosa	maciça moderadamente coesa	friável ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa	Não se aplica	Abrupta e ondulada
Btn	11 a 32	Bruno-escuro (10YR 4/3, úmido)	franco-argilo-arenosa	moderada muito grande blocos angulares	extremamente firme plástica e pegajosa	Não se aplica	gradual e plana
Cn	32 a 40	Bruno-amarelado (2,5 YR 6/4, úmido) mosquedo comum, pequeno e distinto bruno forte (7,5YR 5/8)	franco-argilo-arenosa	fraca média a grande blocos angulares	extremamente dura muito firme plástica e pegajosa	Não se aplica	abrupta e ondulada
Crn*	40 a 66+	Verde-acinzentado-escuro (5Y 6/3, úmido)	textura fanerítica	estrutura gnáïssica	Não se aplica	intermediariamente alterada	Não se aplica
PERFIL 2: Planossolo Nátrico Sálco típico (EMBRAPA, 2018) sobre Gneiss Schistarap (Clayic, Isolithic) [Gneissic] (JUILLERET et al., 2016).							
A	0 a 6	Bruno-escuro (10YR 4/3, úmido)	franco-arenosa	maciça moderadamente coesa	friável ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa	Não se aplica	abrupta e ondulada
Btn	6 a 30	Bruno-escuro (10YR 4/3, úmido)	franco-argilo-arenosa	moderada muito grande blocos angulares	extremamente firme plástica e pegajosa	Não se aplica	gradual e plana
Cn	30 a 57	Bruno-amarelado (2,5 YR 6/4, úmido) mosquedo comum, pequeno e distinto bruno forte (7,5YR 5/8)	franco-argilo-arenosa	fraca média a grande blocos angulares	extremamente dura muito firme plástica e pegajosa	Não se aplica	abrupta e ondulada
Crn*	57 a 80+	Oliva-claro-acinzentado (5Y 6/3, úmido)	textura fanerítica	estrutura gnáïssica	Não se aplica	intermediariamente alterada	Não se aplica

Horizonte	Profundidade (cm)	Cor	Textura	Estrutura	Consistência	Grau de intemperização	Transição
PERFIL 3: Planossolo Nátrico Sálico típico (EMBRAPA, 2018) sobre Gneiss Schistarap (Clayic, Isolitic) [Gneissic] (JUILLERET et al., 2016).							
A	0 a 5	Bruno-escuro (10YR 4/3, úmido);	franco-arenosa	maciça moderadamente coesa	friável ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa	Não se aplica	abrupta e ondulada
Btn	5 a 34	Bruno-escuro (10YR 4/3, úmido)	franco-argilo-arenosa	moderada muito grande blocos angulares	extremamente firme plástica e pegajosa	Não se aplica	gradual e plana
Cn	34 a 55	Bruno-amarelado (2,5 YR 6/4, úmido) mosquedo comum pequeno e distinto bruno forte (7,5YR 5/8)	franco-argilo-arenosa	fraca média a grande blocos angulares	extremamente dura muito firme plástica e pegajosa	Não se aplica	abrupta e ondulada
Crn*	55 a 77+	Verde-acinzentado-escuro (5GY 4/2, úmido)	textura fanerítica	estrutura gnáissica	Não se aplica	intermediariamente alterada	Não se aplica

* Classificação segundo proposto por Santos (2015)

Com relação à densidade radicular por massa (DRM) presente no sistema solo-saprolito (Tabela 4), observou-se que a vegetação nativa é adaptada a buscar nutrientes no saprolito, contribuindo também com o revestimento e preenchimento de poros. Apenas em P2 não temos revestimento e preenchimento, junto a ausência de fraturas, o que podemos inferir que as fraturas são feitas pela exploração radicular, e a expansão das argilas formada próxima a elas. O teste da pá reta teve alta resistência no saprolito em todos os perfis, e apenas em P2 o horizonte Cn ofereceu resistência moderada, e ausência de fraturas, o que pode indicar baixo fluxo de água. O sentido das fraturas em P1 indica uma lateralização do fluxo de solução, por maior presença de bandamentos leucocráticos e melanocráticos nos horizontes Cn e Crn, o que pode ser indício do menor desenvolvimento desses e menor profundidade em relação a P2 e P3 (SILVA, 2018).

Tabela 4. Avaliação da potencialidade dos sistemas solo-saprolitos

Horizonte	Raízes		Teste Pá reta ⁽³⁾	Tipo de Contato	Fratura (cm)			Rev. ⁽⁷⁾	Pre. ⁽⁸⁾
	DRM ⁽¹⁾ (g kg ⁻¹)	Anotação campo ⁽²⁾			Larg. ⁽⁴⁾	Comp. ⁽⁵⁾	Espa. ⁽⁶⁾		
Perfil 1.									
A	4	Muitas	Moderada	Sem contato				-	
Btn	2	Poucas	Moderada	Lítico				-	
Cn	< 1	Raras	Muito alta	Lítico	0,3 H	12,0 H	6,0 H	Comuns	Poucos
Crn	< 1	Raras	Muito alta	-	0,5 H	13,0 H	10,0 H	Poucos	Poucos
Perfil 2									
A	4	Muitas	Baixa	Sem contato				-	
Btn	2	Comuns	Baixa	Sem contato				-	
Cn	2	Comuns	Moderada	Lítico	Ausente			Comuns	Comuns
Crn	< 1	Raras	Muita alta	-	Ausente			Ausente	Ausente
Perfil 3									
A	6	Muitas	Moderada	Sem contato				-	
Btn	4	Muitas	Moderada	Litoide				-	
Cn	2	Poucas	Muito alta	Lítico	0,1 H	5,0 V	5,0 V	Comuns	Comuns
Crn	1	Poucas	Muito alta	-	0,1 H	3,0 V	4,0 V	Poucos	Poucos

⁽¹⁾ Densidade radicular por massa por método experimental; ⁽²⁾ Segundo Santos et al., (2005);

⁽³⁾ Máxima força humana possivelmente aplicável segundo Soil Survey Staf, (1999); ⁽⁴⁾ Largura modal das fraturas; ⁽⁵⁾ Comprimento modal das fraturas; ⁽⁶⁾ Espaçamento modal das fraturas; ⁽⁷⁾ Revestimento de fraturas; ⁽⁸⁾ Preenchimento de fraturas; (H) Posição horizontal ; (V) Posição vertical ; (D) Posição diagonal.

4.2 Influência da estrutura para os atributos físicos e químicos dos perfis

4.2.1 Atributos físicos

O percentual de cascalho é significativo, e as tabelas de atributos (Tabela 5 e 6) são baseadas na terra fina seca ao ar (TFSA), o que superestima os atributos. Essa superestimativa também foi observada por Santos et al. (2021). Nos horizontes saprolíticos, a superestimação é em percentual maior, pois a fração grossa chega a 79, 81, 74 % respectivamente nos perfis P1, P2 e P3 no Crn, e 60, 69 e 71 por cento respectivamente nos perfis P1, P2 e P3 no horizonte Cn. A fração grosseira promove uma estabilidade mecânica.

A fração areia (Tabela 5) é uniforme em todos os perfis contrastando com os perfis de Planossolos que Diniz Filho et al. (2009) no Rio Grande do norte, que o percentual de areia era maior em superfície. Minerais muito resistentes como o quartzo pode explicar essa manutenção do percentual de areia.

Na relação areia grossa/areia fina (Tabela 5) temos o oposto do encontrado por Salviano et al. (2017) ao estudar solos bem drenados, Latossolos amarelos do Nordeste. Nos perfis P1, P2 e P3 observa-se que a areia fina compreende aproximadamente a soma do silte mais argila, ou superior a essa soma. Com isso a infiltração ou a estabilização da estrutura pode ser prejudicada, contudo, como dito anteriormente, a fração calhaus é significativa, e a porosidade não foi prejudicada em profundidade. Temos então regolitos que apesar do horizonte plânico, podemos inferir não ter problemas sérios de infiltração, pois a porosidade é o maior determinante na infiltração, e depende da continuidade de poros (AIMRUN et al., 2004; KOZCIAK; FIORI, 2004).

O conteúdo de silte (Tabela 5) é quase o dobro no saprolito em relação aos horizontes Cn e Btn em todos os perfis, com a razão silte/argila chegam a ser de 20 a 42 vezes maior. O silte parece ter uma importância na adsorção, sendo assim agregação dada sua mineralogia, como a encontrada por Melo et al. (2001) e Soares (2020), onde na fração silte tinham agregados resistentes de caulinita, hematita, hematita + maghemita e não apenas quartzo.

Na fração argila (Tabela 5), tem-se acúmulo de argila característica da classe Planossolos, que no Agreste Pernambucano temos uma formação de argila *in situ* (PARAHYBA et al., 2010; LEHMANN et al., 2021; SARAIVA et al., 2021). Uma das causas desse acúmulo em subsuperfície é a argiluviação, dispersão da argila em superfície levando preenchimento no horizonte plânico (GALINDO et al., 2008). (Tabela 5).

Os saprolitos de P1, P2, P3 na relação silte/argila (Tabela 5), vemos valores com uma relação direta com o nível de intemperização entre o horizonte plânico e o saprolítico. Para

Santos et al. (2014), a relação silte/argila é um indicador de qualidade física do solo e estágio de intemperização, como o estudado por Silva et al. (2019) em regiões semiáridas do Nordeste.

A densidade do solo (D_s) e densidade de partículas (D_p) (Tabela 5) pouco variou, isso foi demonstrado em campo na dificuldade de delimitá-los de forma tátil, com inserções de objeto perfurante, como um martelo estratigráfico geológico. Em P1 nos Horizontes Btn, Cn e Crn, respectivamente, temos D_s (densidade do solo) de 1,61; 1,64; 1,69 g cm⁻³. A D_s em P2 1,58; 1,65 e 1,63 g cm⁻³. Em P3 1,55; 1,62; 1,69 g cm⁻³. Vemos um aumento esperado em profundidade pelo grau de intemperização.

Há relação entre a porosidade e força mecânica aplicada ao solo ou compactação, então a pouca variabilidade da densidade explicaria a manutenção de porosidade ao longo dos 3 perfis (POLA et al., 2010). Em campo, a morfologia e a cor (Tabela 3) foram mais determinante para distinguir os horizontes.

Tabela 5. Caracterização física de perfis saprolíticos de Planossolos sobre gnaiss em Jataúba/PE

Horizontes Símbolo	Prof. cm	Cascalho >2 mm -----%-----	TFSA <2 mm	Areia			Grossa Fina	Silte	Argila	Silte Argila	Dp -----g cm ⁻³ -----	Ds -	Porosidade Total %
				Grossa	Fina	Total							
Perfil 1													
Btn	11-32	7,95	92,05	98	457	555	0,21	225	220	1,02	2,78	1,61	42,12
Cn	30-40	60,68	39,32	79	505	584	0,16	256	160	1,6	2,82	1,64	41,83
Crn	40-66+	79,79	20,21	157	416	573	0,38	407	20	20,4	2,78	1,69	39,31
Perfil 2													
Btn	6-30	7,13	92,88	68	488	556	0,14	184	260	0,7	2,82	1,58	44,02
Cn	30-57	69,46	30,54	125	460	585	0,27	355	60	5,9	2,79	1,65	40,80
Crn	57-80+	81,77	18,23	134	436	570	0,31	420	10	42,0	2,78	1,63	41,36
Perfil 3													
Btn	5-34	8,23	91,77	79	478	557	0,17	183	260	0,7	2,80	1,55	44,63
Cn	34-55	71,94	28,06	56	520	576	0,11	324	100	3,2	2,78	1,62	41,74
Crn	55-77+	74,01	25,99	66	462	528	0,14	452	20	22,6	2,82	1,69	40,05

4.2.2 Atributos químicos

Todos os perfis estudados e em todos os horizontes temos caráter sódico e sálico no saprolito (Tabela 6). O sódio é originado do intemperismo de feldspatos.

A sorção de nutrientes é contrastante com o teor de argila do saprolito (Cr). Vemos ou uma uniformidade dos nutrientes, ou um acréscimo abrupto no caso do fósforo e do sódio, provenientes da intemperização da rocha de origem.

O carbono nos horizontes diagnósticos (Bt) dos perfis P1, P2 e P3 é condizente com a média encontrada em Planossolos de vegetação de Caatinga aberta a densa do Estado de Pernambuco, na camada de 0 a 30 cm, mesmo com densidade do solo (Ds) acima da média para caatinga preservada, e próximo de áreas já em uso de agricultura no Estado. Segundo Araújo et al. (2004), a contribuição de C é pequena da vegetação na caatinga e para Oliveira et al. (2003) valores menores que 10 g kg^{-1} são baixos. Nos perfis P1, P2, P3 a matéria orgânica foi semelhante no solo e saprolito, variando de 5 g kg^{-1} em Btn, caindo para $2,4$ a $3,6 \text{ g kg}^{-1}$ em Cn e 1 g kg^{-1} no Crn.

Os teores de fósforo (P) (Tabela 6) disponível são favoráveis ao desenvolvimento radicular em subsuperfície, sendo os teores mais expressivos na camada saprolítica. Essa distribuição de P nos regolitos P1, P2, P3 é devida a dissolução de minerais, como os da apatita em saprolitos oriundos de rochas cristalinas dos tipos biotita-gnaiss e biotita-xisto. Os fosfatos são minerais acessórios comuns no semiárido de Pernambuco, contudo o fósforo que facilmente se liga a outros elementos pode acumular em profundidade no perfil quando em meio alcalino e com Na, formando apatitas secundárias ou até recristalização (CARVALHO, 2012; LOUREIRO; MELAMED, 2006; SANTOS et al., 2018).

A drenagem é o ponto chave para a manutenção de qualquer cultura em um solo com alta atividade de sódio e saturação por bases. Os solos têm estruturas colunares, característicos do acúmulo de sódio (Figuras 8b, Figura 9B, Figura 10b). A principal limitação agrícola dos Planossolos é a deficiência de drenagem, profundidade efetiva, pedregosidade, salinidade. Em Santos et al. (2018), temos que mesmo com uma saturação por bases alta, um solo não é fértil se acompanhado por características de sódico e/ou sálico ou salino, o que parece categórico ao extremo. Por Lopes e Guilherme (2007), SIDALC (1998) e Novais et al. (2007) temos o conceito de fertilidade natural e a fertilidade do solo necessária a ser produtivo, que pode depender do manejo, o tanto que depende das condições naturais.

A acidez trocável (Tabela 6) foi nula nos horizontes Cn e Crn em todos os perfis, ou quase nula nos horizontes plânicos em P2 e P3, devido ao pH em torno de 5,4 a 5,6.

Na acidez potencial (Tabela6), temos valores decrescentes em direção ao saprolito, mesmo comportamento da matéria orgânica.

A capacidade de troca de cátions não diminui em profundidade, mesmo com a matéria orgânica decrescendo em profundidade isso devido provavelmente aos teores baixos de óxidos de ferro e altos de caulinita ou outro mineral 1:1, ou barramento físico. A saturação por bases (V) nos 3 perfis é próxima ou igual a 100 %, resultado de o clima da região com baixa pluviosidade e de forma intensa em curtos períodos e longos períodos de estiagem.

Tabela 6. Caracterização química de perfis de solo-saprolitos sobre gnaíse em Jataúba/PE

Horizontes		pH		Δ pH	MO	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SB	Al ³⁺	H ⁺ + Al ³⁺	CTC		V	m	PST	
Símbolo	Prof.	H ₂ O	KCl											(t)	(T)				
cm				g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		-----mmolc kg ⁻¹ -----					-----%-----						
Perfil 1																			
Btn	11-32	7,03	5,24	-1,79	5,5	2,7	40,7	37,9	19,6	0,7	98,8	0	12,5	91,8	111,3	89	0	17,6	
Cn	32-40	7,7	6,19	-1,51	2,9	5,7	53,9	46,1	33,7	1,1	134,8	0	5,1	106,2	139,9	96	0	24,1	
Crn	40-66+	8,65	7,34	-1,31	1,7	13,1	67,2	56,9	53,3	1,4	178,7	0	0	125,5	178,7	100	0	29,8	
Perfil 2																			
Btn	6-30	5,62	4,13	-1,49	5,1	2,5	37,8	46,1	39,2	0,6	123,6	1,5	18,4	102,9	123,6	87	1	31,7	
Cn	30-57	8,13	6,9	-1,23	2,4	15	40,2	36,0	76,1	1,2	153,5	0	0,7	78,1	154,2	100	0	49,4	
Crn	57-80+	8,31	7,11	-1,2	0,7	41	57,0	58,4	82,7	1,5	199,5	0	0	116,9	199,5	100	0	41,4	
Perfil 3																			
Btn	5-34	5,4	4,19	-1,21	5,7	2,1	38,4	61,3	35,9	0,8	136,4	1,3	15,4	115,9	151,8	90	1	23,6	
Cn	34-55	7,21	6	-1,21	3,6	17,7	37,5	65,0	69,6	1,0	173,1	0	5,9	109,4	179,0	97	0	38,9	
Crn	55-77+	8,56	7,15	-1,41	1	77,2	41,5	60,9	75,0	1,7	179,1	0	0	104,1	179,1	100	0	41,9	

Figura 9. Fotos do perfil 1 (P1) formado por sistema solo-saprolito derivado de gnaisses: (a) Perfil completo; (b) Horizonte B_t; (c) Horizonte C; (d) Horizonte C_r; (e) Raízes no saprolito; (f) Reação de HCl e H₂O₂ no saprolito.

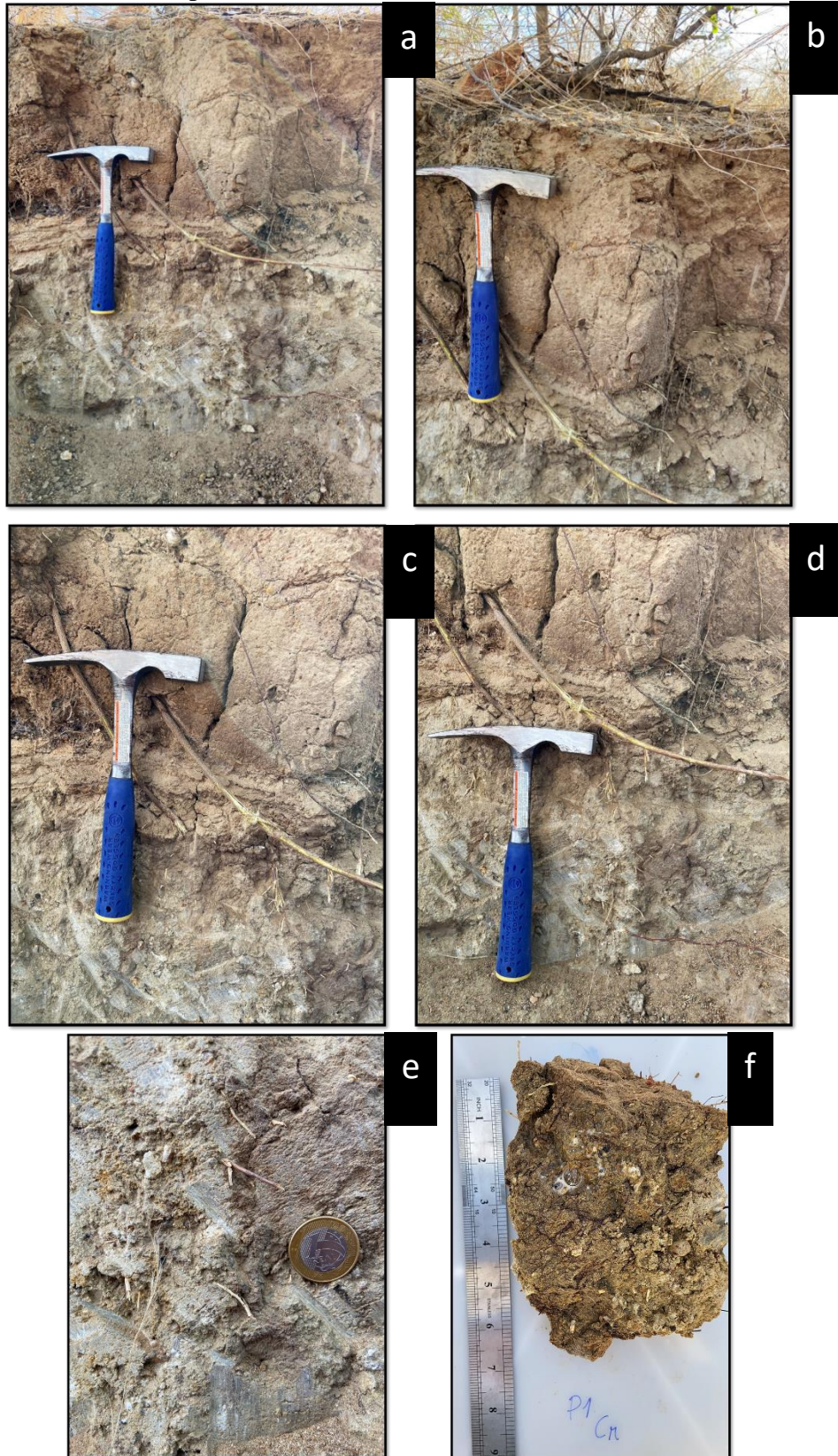


Figura 10. Fotos do perfil 2 (P2) formado por sistema solo-saprolito derivado de gnaisses: (a) Perfil completo; (b) Horizonte B; (c) Horizonte C; (d) Horizonte Cr; (e) microsítios de líquens no saprolito e manchas ferruginosas; (f) Reação de HCl e H₂O₂ no saprolito

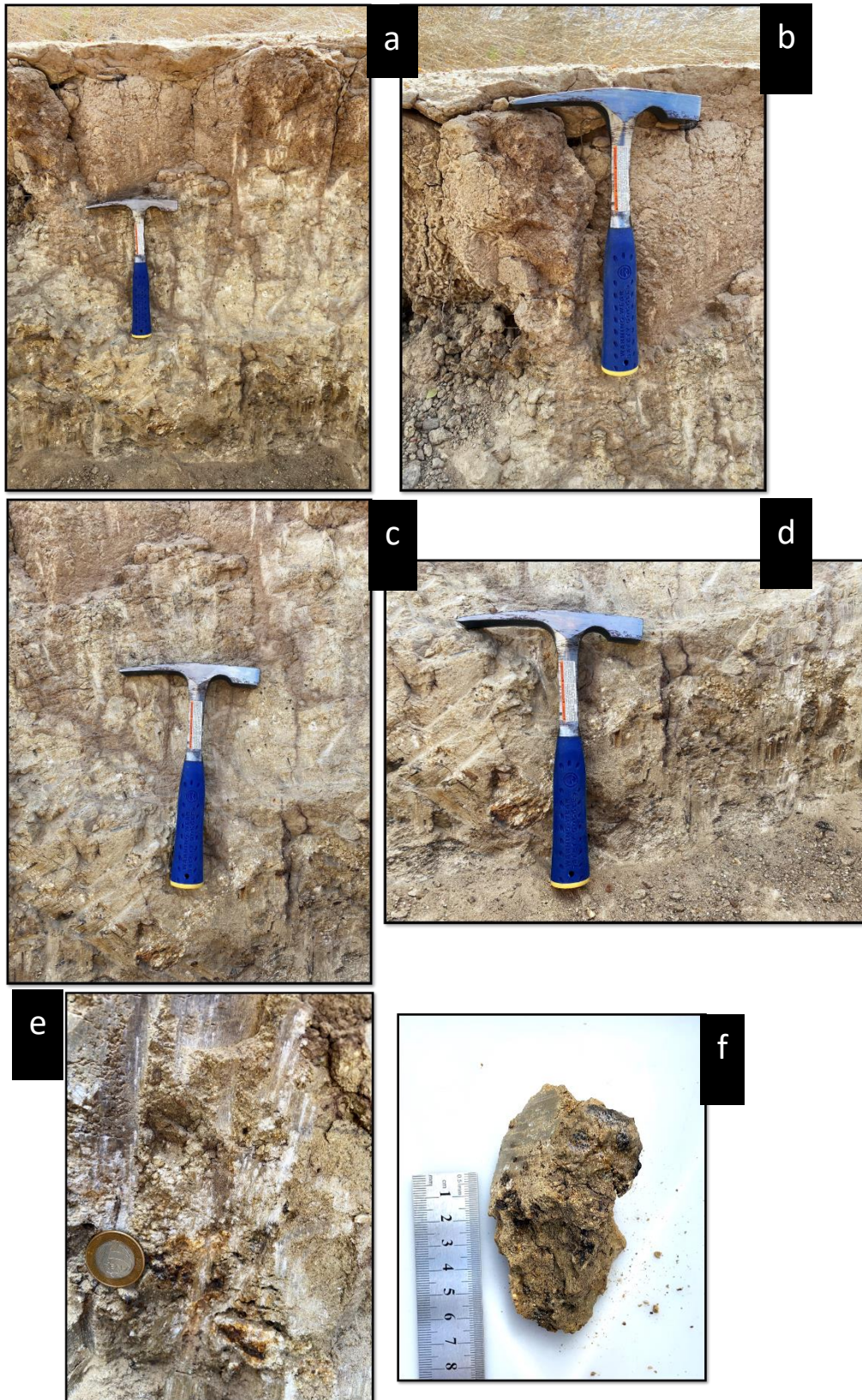
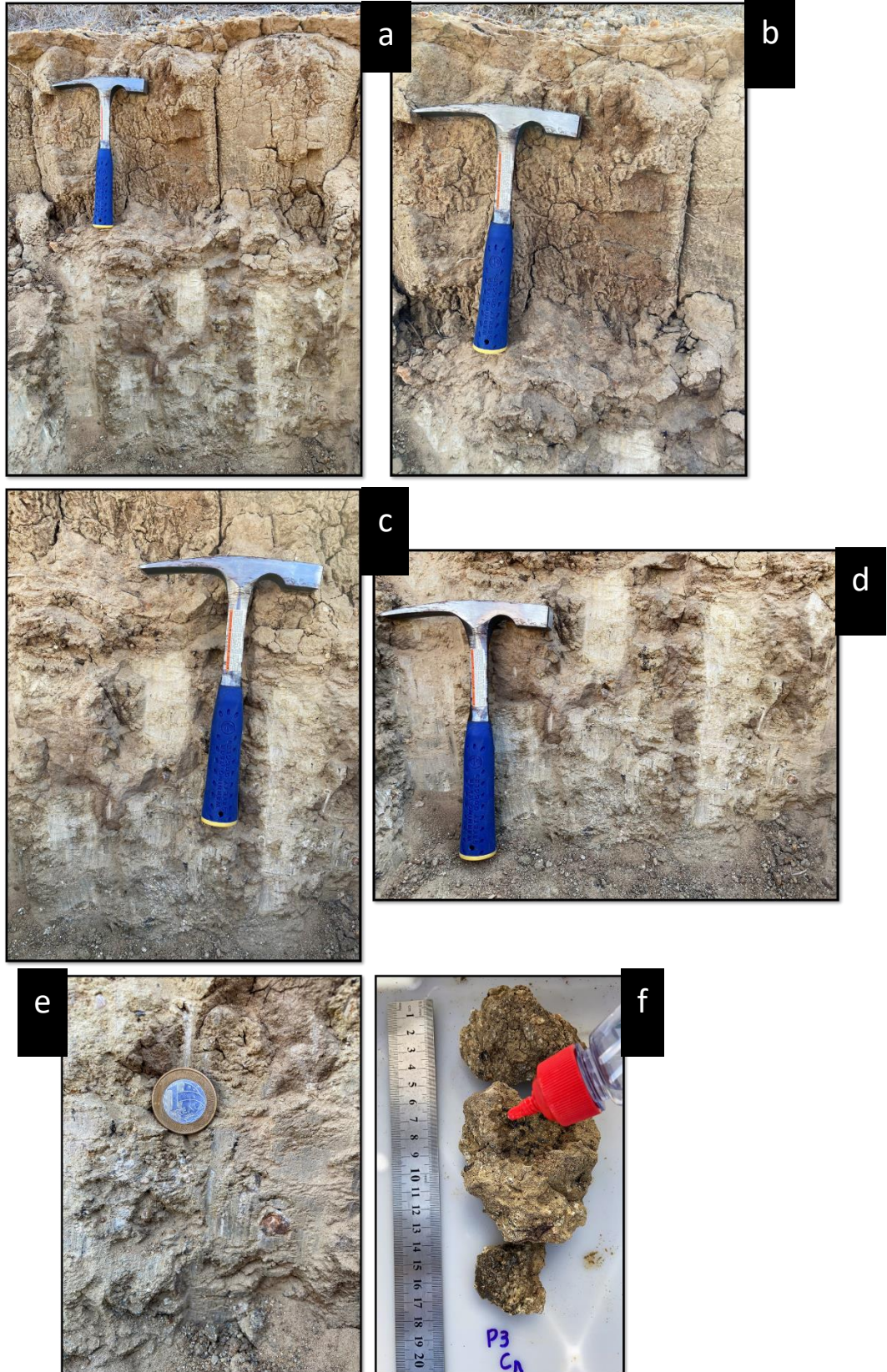


Figura 11. Fotos do perfil 3 (P3) formado por sistema solo-saprolito (a) Perfil completo; (b) Horizonte B_t; (c) Horizonte C; (d) Horizonte C_r; (e) microsítios de líquens no saprolito, com fragmento não intemperizado; (f) Reação de HCl e H₂O₂ no saprolito



4.3 Geoquímica de alteração

A fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica quantitativa, que identifica elementos químicos e estabelece a concentração por proporção. Os elementos presentes nos horizontes dos 3 perfis são expostos em forma de óxidos na Tabela 7.

Os valores de óxidos indicam que em ordem percentual o material é constituído majoritariamente por SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , e K_2O , igual ao encontrado por Souza (2015) e Camara et al. (2021), contudo, os valores de Na_2O são da ordem de 4 vezes maior nos perfis aqui estudados.

O Na_2O aumenta em favor da profundidade, comportamento semelhante ao CaO , MgO e K_2O . Na calcinação óxidos são formados na volatilização de CO_2 e outros gases a partir de hidratos e carbonatos. Os valores de CaO são maiores que os encontrados por Ferreira (2015) em Planossolos, indicando que os perfis aqui estudados são propícios a “mineral carbonation”. O carbonato precipita quando as concentrações excedem o limite de solubilidade.

O valor de Al_2O_3 indica que não há acúmulo nem seu predomínio (alitização), com quantidades praticamente idênticas entre os horizontes.

O acúmulo de silício (SiO_2), com 3 vezes o de Al_2O_3 ao longo dos 3 perfis, e de forma uniforme entre os horizontes, corrobora com o material de origem (DUARTE, 2002; QUETA; DUARTE; BONITO, 2014) e com solos de drenagem restrita ou de pouca precipitação, onde ocorrem bissialitização e formação de minerais 2:1. Isso aumenta a influência do saprolito na formação do solo em relação a sedimentos ou deposições de materiais em superfície (PARAHYBA et al., 2009)

A distribuição de Fe_2O_3 tem valores girando em torno de 5% com tendência de uniformidade nos horizontes dos perfis estudados. Essa uniformidade demonstra que a ferrólise não é predominante nos processos de formação de argila nos horizontes estudados, não diferenciando o saprolito do horizonte pedogênico diagnóstico. Diferindo do encontrado por Ferreira (2015). Pelo resultado do EDS temos ausência de formação de carbonatos de ferro (Figura 14).

Os valores de P_2O_5 são entre 0 e 0,036% no P1, P2 e P3, sempre com valor maior conforme a profundidade aumenta. Valores baixos entre 0,1 e 0,2% em Planossolos de Pernambuco foram verificados por Souza (2015).

O óxido de titânio é uniforme ao longo dos perfis. Os valores de TiO_2 é usado como referência ou indica descontinuidade litológica, e com isso indica material transportado. Os

valores atestam uma origem autóctone dos 3 perfis aqui estudados (TSAI; CHEN, 2000; LIMA, 2020).

O zircão, silicato de zircônio, ou metassedimentar são a fonte de óxido de zircônio (ZrO_2), elemento comumente encontrado em rochas alcalinas, e em melanossomas de rochas ácidas. Assim como o Ti, o Zr é considerado imóvel, e com eles mais os elementos móveis podemos calcular a perda ou fluxo de massa para averiguar a isovolumetricidade (ARAÚJO FILHO, 2003).

Na estimativa de carbonatos e material orgânico temos a perda por fogo (LOI) ou “Lost on ignition” (LI, 2020), que nos perfis e horizonte ficaram em torno de 4,6 %, sem tendência de aumento em direção a superfície, exceto no Btn de P1, com 5,1%. Este é um indício da possibilidade de ocorrência de carbonatação nos saprolitos, pois nele a MO é ínfima em comparação aos horizontes Cn e Btn. Isso reforça que no saprolito, o LOI é indicação de decomposição de espécies químicas de carbonatos de cálcio e magnésio, visto na leitura do MEV (Figura 14), e não apenas perda de água estrutural (DRI; SANNA; MAROTO-VALER, 2014)

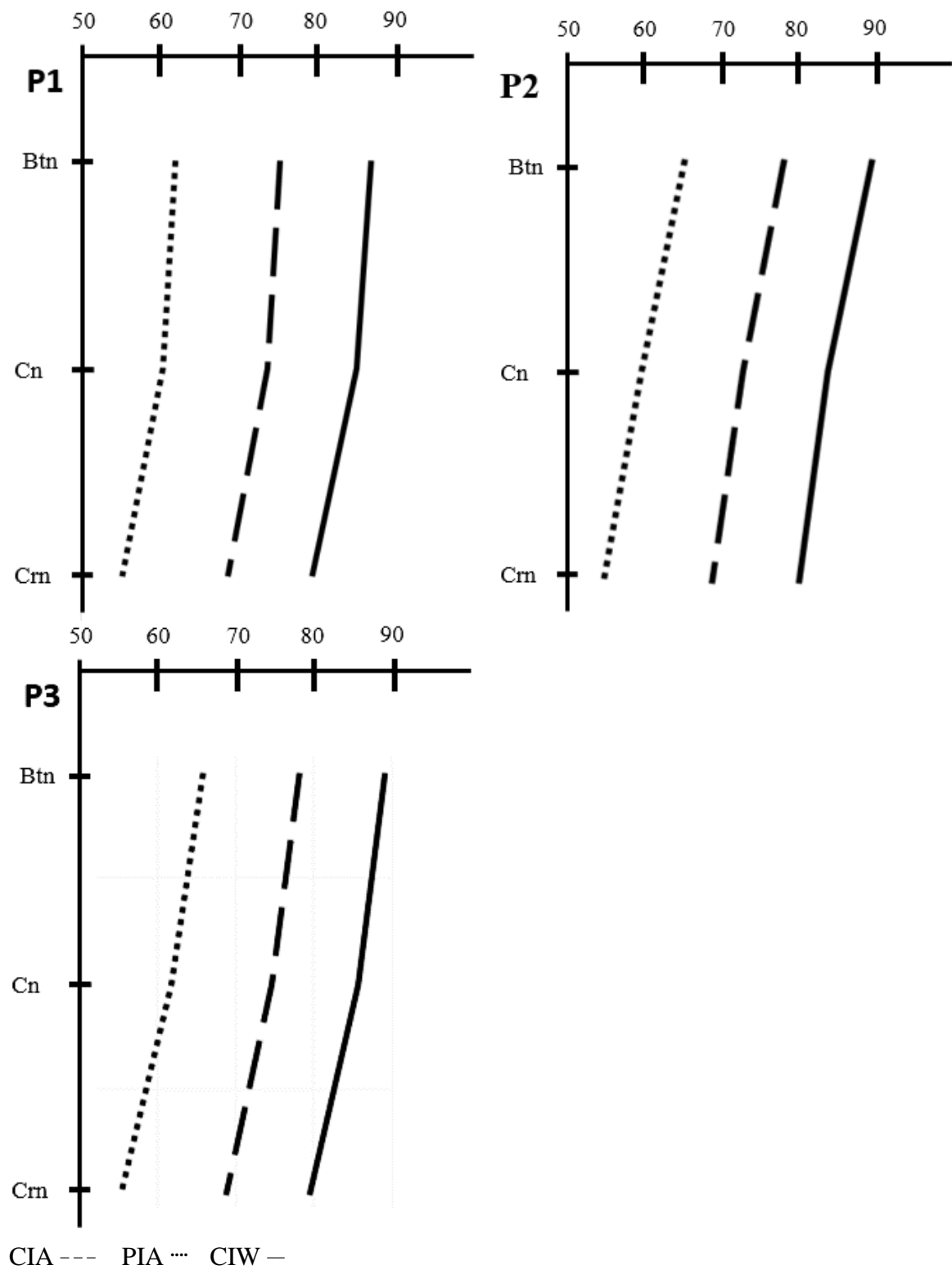
Os índices geoquímicos de intemperização CIA, CIW e PIA (Figura 11) se comportaram de forma semelhante em P1, P2 e P3. Valores são menores em profundidade e maiores em direção a superfície, indicando um desenvolvimento linear dos regolitos em questão. Todos os índices indicaram maior desenvolvimento no horizonte plânico. Isso reforça o desenvolvimento autóctone dos perfis e ocorrência de processos como a argiluviação.

Tabela 7 - Elementos maiores medidos por FRX, LOI e índices geoquímicos CIA, PIA e CIW em sistema solo-saprolito sobre gnaiss

Horizontes	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂	LOI	CIA	PIA	CIW
	%														
P1Bt	1,515	0,722	19,715	61,737	0,007	3,488	1,517	0,877	0,122	5,151	0,060	5,100	75,148	61,852	86,671
P1Cn	1,816	1,049	19,568	62,466	0,005	3,518	1,688	0,838	0,097	4,790	0,065	4,100	73,592	60,361	84,813
P1Crn	2,246	1,276	18,533	61,096	0,022	3,612	2,644	0,880	0,070	5,146	0,075	4,400	68,552	55,191	79,123
P2Btn	1,360	0,883	21,209	60,846	0,003	3,452	1,264	0,817	0,044	5,164	0,059	4,900	77,731	65,080	88,990
P2Cn	2,106	1,393	20,605	59,409	0,015	3,691	2,025	0,889	0,039	5,052	0,076	4,700	72,484	59,500	83,300
P2Crn	2,346	1,396	19,080	59,275	0,035	3,871	2,517	0,917	0,141	5,669	0,053	4,700	68,599	54,681	79,689
P3Btn	1,267	0,923	21,010	61,326	0,007	3,315	1,287	0,839	0,035	5,420	0,071	4,500	78,165	65,832	89,161
P3Cn	1,809	1,320	19,973	61,790	0,000	3,449	1,524	0,792	0,036	4,648	0,059	4,600	74,651	61,760	85,699
P3Crn	2,378	1,797	18,446	59,820	0,036	3,614	2,409	0,946	0,087	5,997	0,071	4,400	68,708	55,246	79,396

LOI: “Loss On Ignition”; CIA: “Chemical Index Of Alteration”; PIA: Plagioclase Index Of Alteration”; CIW: “Chemical Index Of Weathering”.

Figura 12. Índices geoquímicos de intemperização dos 3 perfis estudados

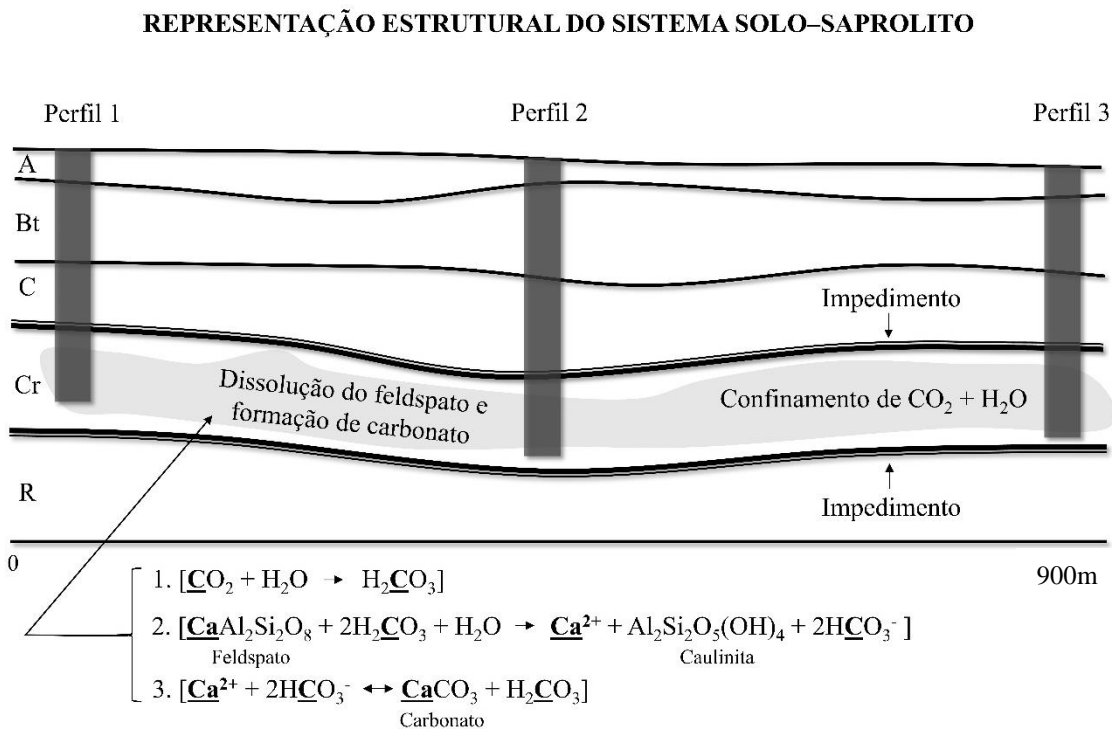


4.4 Processo de formação de carbonatos em saprolitos derivados de gnaiss

O horizonte Crn dos perfis estudados apresentaram forte reação ao teste com ácido clorídrico, o que evidencia a presença de carbonatos distribuídos de forma generalizada em toda a sua estrutura (Figura 8f, Figura 9f, Figura 10f).

Em regolitos, a formação de carbonatos secundários, denominada na literatura internacional como “*mineral carbonation*”, é descrita como um processo que envolve a dissolução de plagioclásios cálcicos e/ou minerais máficos, e.x., olivina, e associado à captura de CO₂ atmosférico (MARINI, 2007; MANNING, 2008; ALLEN et al., 2009). No entanto, o processo de respiração da fauna e da flora também devem estar atuando como fontes de CO₂ para favorecer a ocorrência do processo de formação de carbonatos no horizonte mais profundo destes regolitos estudados, já que raízes e insetos foram descritos nos horizontes Crn e a presença de microorganismos em saprolitos de gnaiss já foi relatada na literatura científica (MANNING, 2008; MANNING; RENFORTH, 2013).

Figura 13. Representação estrutural do sistema solo-saprolito ao longo de um corte de aproximadamente 900 m



A possível captura de CO₂ atmosférico e a consequente formação de carbonatos secundários é geralmente descrita em regolitos derivados de rochas ultrabásicas ou básicas, ex., basalto (MCGRAIL et al., 2006). No entanto, as condições geoquímicas, geomorfológicas e climáticas do ambiente semiárido que engloba os perfis estudados devem contribuir para a formação de carbonatos em saprolitos derivados de gnaiss. Por isso, inferimos que o processo de formação de carbonatos secundários no saprolito de gnaiss não deve ser um evento localizado e pode estender-se por quilômetros no entorno da área estudada.

O processo de formação de carbonato secundários nos saprolitos estudados deve ser favorecido pela existência de planos de impedimento estruturalmente compactos subjacentes e sobrejacentes ao horizonte Crn. Esses planos de impedimento são constituídos pela estrutura compacta do horizonte Cn na posição superior e pela presença da rocha macromorfológicamente preservada na posição inferior (Figura 8cd, Figura 9cd, Figura 10cd).

A presença de planos de impedimento sobrejacentes e subjacentes aos horizontes, onde as reações para formação de carbonatos secundários estão ocorrendo, é necessária para manter o sistema rico em CO₂. O conjunto formado pelos planos de impedimento com o horizonte Crn no centro atua como um ambiente onde o CO₂ penetra no saprolito, seja pelo gás atmosférico ou seja pela atividade respiratória de organismos, porém dificulta a saída de CO₂ do sistema, elevando a pressão do CO₂ solubilizado na solução circundante e mantendo o CO₂ em constante contato com os minerais durante as suas vias de alteração (MCGRAIL et al., 2006; GOLDBERG; TAKAHASHI; SLAGLE, 2008).

As vias de alteração dos minerais primários e a consequente formação de minerais secundários existentes nos perfis estudados podem ser inferidas a partir da constituição mineralógica das frações cascalho, areia, silte e argila, representadas na tabela 8 através da mineralogia do perfil 1. Neste contexto, as frações grossas estão associadas aos minerais primários precursores e a fração argila está associada aos minerais secundários, produtos da alteração dos minerais primários.

Tabela 8. Constituintes minerais das frações cascalho, areia, silte e argila representativa dos três perfis estudados

Horizonte	Cascalho (20-2mm)		Areia				Silte			Argila											
			Grossa: 2-0,2mm		Fina: 0,2-0,05mm		(0,05-0,002mm)			<0,002mm)											
Btn	Q	P	PK	O	M	Q	P	PK ^(T)	O	M ^(T)	Q	P	O	M ^(T)	Q	F	E	I	K	Q	
Cn	Q	P	PK	O	M	Q	P	PK	O	M ^(T)	Q	P	O	M ^(T)	Q	F	E	I	K	Q	
Crn	Q	P	PK	M	B	Q ^(T)	P	PK	M	B	Q ^(T)	P	M	B	Q	F	M	E	I	K	Q

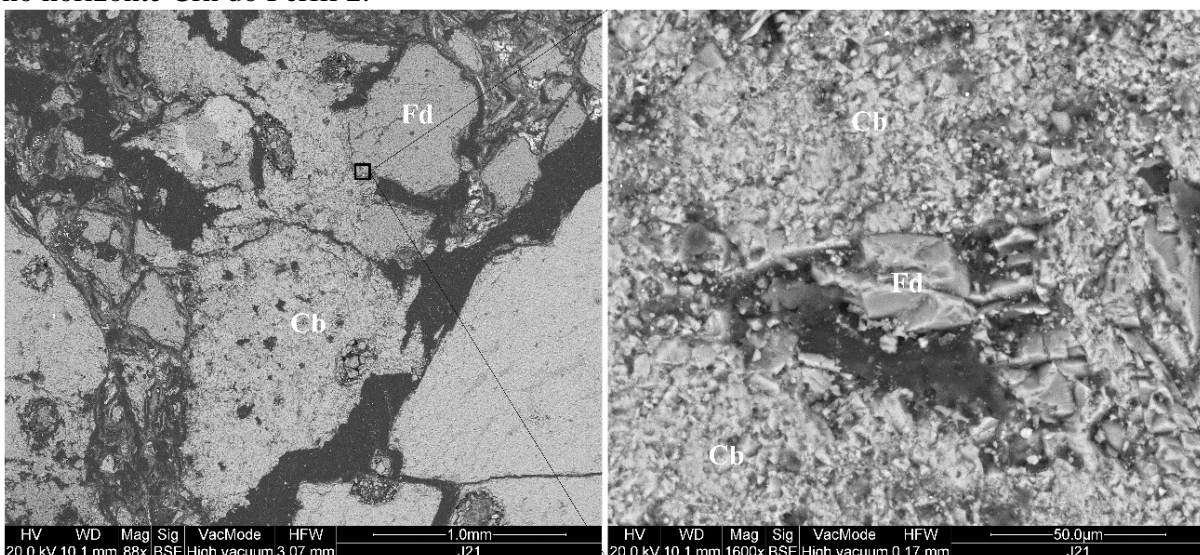
^(T) < 5%

Q = quartzo; P = plagioclásio; PK = plagioclásio caulinizado; Pi = piroxênio; O = ortoclásio; M = muscovita; B = biotita; F = feldspato indiscriminado; E = esmectita; I = illita; K = caulinita.

A constituição mineralógica das diferentes frações demonstra uma clássica alteração preferencial de minerais máficos, como a biotita já na fração cascalho, devido à sua ausência nos horizontes Cn e Btn. Na fração areia, se destaca a formação de pseudomorfos plagioclásio-caulinita, o feldspato é o principal precursor da caulinita em regolitos derivados de gnaisses do cristalino do Nordeste do Brasil (SANTOS et al., 2018), e a via de alteração para caulinita pode ser apontada como a principal envolvendo os feldspatos nos perfis. Diferente da biotita, a muscovita resistiu até a fração silte, devido a sua maior residência estrutural. A elevada resistência estrutural também explica a presença de quartzo, um mineral primário, na fração argila. Em adição, illita e esmectita, presentes na fração argila, podem ser derivadas da neoformação de feldspatos ou de diferentes vias de alteração da biotita (SANTOS et al., 2017).

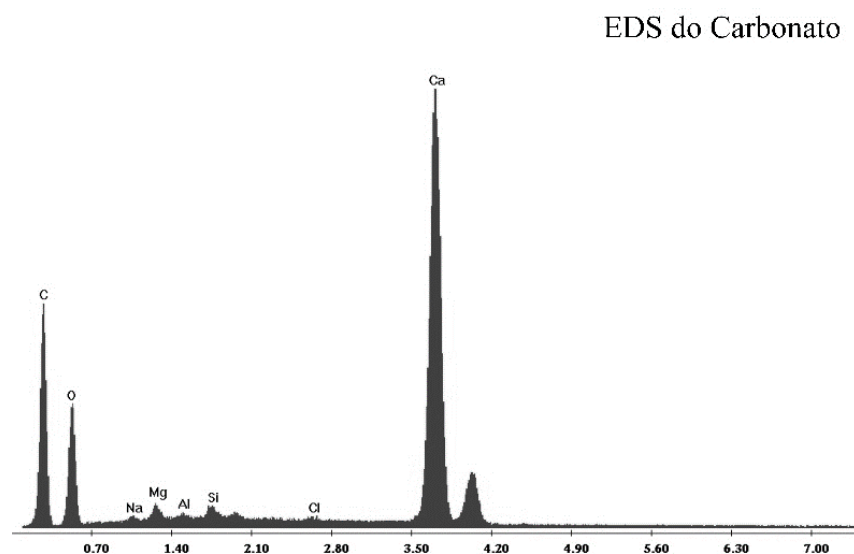
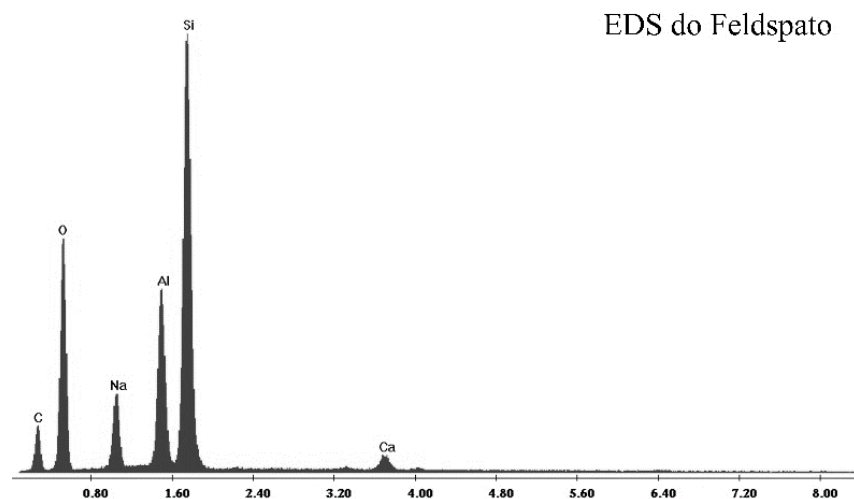
Imagens obtidas por MEV e análises semiquantitativas obtidas por EDS indicam que a precipitação do CaCO_3 nos saprolitos estudados está associada a dissolução do feldspato do grupo dos plagioclásios (Figuras 14 e 15). A dissolução desses plagioclásios não deve ser a única fonte de cátions que reagirão com H_2CO_3 para a formação de carbonatos. No entanto, as imagens por MEV e as respectivas composições elementares por EDS demonstram a dissolução do plagioclásio intimamente associada a formação de carbonatos, o que favorece o incremento dos teores de cátions, em especial Ca^{2+} e Na^+ , para a solução (Figuras 14 e 15). A presença de Mg no carbonato secundário formado (Figura 14) deve estar associada a dissolução de minerais máficos comumente encontrados no gnaissse como a biotita (SANTOS et al., 2018).

Figura 14. Imagens por MEV da dissolução do feldspato e formação de carbonato de cálcio no horizonte Crn do Perfil 2.



Os cátions necessários para a formação dos carbonatos são provenientes da dissolução da assembleia mineralógica herdada do bandejamento melanossomático do gnaiss, rica em biotita e plagioclásios. Apesar do gnaiss ser uma rocha ácida, a composição mineralógica e geoquímica dos melanossomas, quando estudada isoladamente, assemelham-se as observadas em rochas básicas (SANTOS et al., 2017; SANTOS et al., 2018; SANTOS et al., 2019). Em adição, o clima semiárido que abrange a região estudada deve contribuir para taxas de evapotranspiração que implicam na saturação da solução por Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} e HCO_3^- , o que resulta na precipitação do carbonato secundário (MANNING; RENFORTH, 2013).

Figura 15. Análise por EDS do feldspato e do carbonato de cálcio presentes nas imagens por MEV no horizonte Crn do Perfil 2.



O processo de formação de carbonatos secundários presente nos saprolitos estudados soma-se a outros processos geoquímicos ocorrentes em saprolitos em escala global e evidenciam o saprolito como uma região fundamental para o fluxo de elementos ocorrentes entre as esferas terrestres. Os sistemas solo-saprolitos estudados apresentam um processo de “*mineral carbonation*” que provavelmente transcende a área estudada e pode se estender por milhares de quilômetros quadrados, abrangendo o domínio dos Planossolos Nátricos derivados de gnaiss presentes no município de Jataúba e regiões circundantes no estado de Pernambuco e da Paraíba.

6 CONCLUSÕES

O sistema de classificação em construção por Santos (2015) complementa a classificação pedológica de Santos (2005) sem o sobrepor, sendo adequado para classificar o regolito completo, solum e saprolito.

Os perfis de regolito apresentam maior potencialidade dos atributos químicos, que dos atributos físicos e a avaliação da potencialidade estrutural nos leva a concluir que raízes podem penetrar nestes saprolitos derivados de gnaiss abaixo de Planossolos.

Os perfis de regolito apresentam um avanço gradual no grau de intemperização do horizonte mais profundo até o superficial de acordo com os índices geoquímicos de intemperização CIA, CIW e PIA.

Apenas os saprolitos dos perfis de regolito estudados demonstraram forte reação ao HCl, e a micromorfologia eletrônica evidencia que os precipitados cálcicos e magnesianos estão associados a feldspatos em alteração.

As estruturas compactas do horizonte sobrejacente ao saprolito e da rocha virtualmente preservada subjacente ao saprolito é um fator que favorece a formação de carbonatos.

Os melanossomas ricos em biotita e plagioclásios herdados do gnaiss pelo saprolito, apresentam características mineralógicas e geoquímicas que favorecem a formação de carbonatos.

O regime de chuvas + evapotranspiração deve favorecer a elevação dos teores de Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} e H_2CO_3 na solução.

O conjunto de dados nos leva a inferir que a origem do CO_2 necessário para a formação dos carbonatos em saprolitos seja atmosférico e pela respiração de microrganismos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, D.I.J.; BRENT, G. F. Sequestering CO₂ by mineral carbonation: stability against acid rain exposure. **Environmental science & technology**, v. 44, n. 7, p. 2735-2739, 2010. <https://doi.org/10.1021/es903212j>
- ALVES, C. N.; DE LIMA FERREIRA, N.; DE SOUZA, G. B.; BARROSO, L. L.; DA SILVA, J. A. F.; PINTO, R. B. M.; MELO, E. E. P. Caracterização de atributos físico-químicos de um latossolo amarelo no Município de Paragominas-PA. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, p. e10010212130-e10010212130, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12130>
- ARAÚJO FILHO, J. C. D. **Horizontes cimentados em Argissolos e Espodossolos dos tabuleiros costeiros e em Neossolos Regolíticos e Planossolos da depressão sertaneja no Nordeste do Brasil**. 2003. 223f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- ARAÚJO, M.S.B.; SCHAEFER, C.E.R.; SAMPAIO, E.V.S.B. Soil phosphorus fractions from toposequences of semi-arid Latosols and Luvisols in northeastern Brazil. *Geoderma*, 119:309-321, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.07.002>
- ARAÚJO, J. L.; SEVERO, P. J. D. S.; LUCENA, F. T. C.; VERIATO, R. G.; PAIVA, K. F. D. Enxofre elementar ou sulfato de cálcio para remediação de solos salino-sódicos?. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, p. 388-396, 2015. <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4537090>
- BERNASCONI, S. M. Weathering, soil formation and initial ecosystem evolution on a glacier forefield: a case study from the Damma Glacier, Switzerland. **Mineralogical Magazine**, v. 72, n. 1, p. 19-22, 2008. <https://doi.org/10.1180/minmag.2008.072.1.19>
- BISPO, A.; ANDERSEN, L.; ANGERS, D. A.; BERNOUX, M.; BROSSARD, M.; CÉCILLON, L.; COMANS, R. N. J.; HARMSSEN, J.; JONASSEN, K.; LAMÉ, F.; LHUILLERY, C.; MALY, S.; MARTIN, E.; MCELNE, A. E.; SAKAI, H.; WATABE, Y.; EGLIN, T. K. Accounting for carbon stocks in soils and measuring GHGs emission fluxes from soils: do we have the necessary standards?. **Frontiers in Environmental Science**, v. 5, p. 41, 2017. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00041>
- BODÉNAN, F.; BOURGEOIS, F.; PETIOT, C.; AUGÉ, T.; BONFILS, B.; JULCOUR-LEBIGUE, GUYOY F.; BOUKARYC A.; TREMOSAA J.; LASSINA A.; GAUCHERE. C.; CHIQUET, P. Ex situ mineral carbonation for CO₂ mitigation: Evaluation of mining waste resources, aqueous carbonation processability and life cycle assessment (Carmex project). **Minerals Engineering**, v. 59, p. 52-63, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.011>
- BRANCO, P. M. Dicionário de mineralogia e gemologia / Pércio de Moraes Branco. 2. ed. rev. e ampl. -- São Paulo : Oficina de Textos, 2014. ISBN 978-85-7975-163-9

BRENNAN, S.T.; BURRUSS; R.C. Specific storage volumes: A useful tool for CO₂ storage capacity assessment. **Natural Resources Research**, v. 15, n. 3, p. 165-182, 2006. <https://doi.org/10.1007/s11053-006-9019-0>

BREVIK E.C.; CALZOLARI C.; MILLER B.A.; PEREIRA P.; KABALA C.; BAUMGARTEN A.; JORDÁN A. Soil mapping, classification, and modeling: history and future directions. **Geoderma** v. 264, p. 256-274, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.05.017>

BUOL, S.W.; WEED, S.B. Saprolite-soil transformations in the Piedmont and Mountains of North Carolina. **Geoderma**, Amsterdam, v. 51, n. 1/4, p. 15–28, 1991. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(91\)90064-Z](https://doi.org/10.1016/0016-7061(91)90064-Z)

CABRAL, R. L.; ALVES, A. G. C. A.; FILHO, M. R. R.; JÚNIOR, V. S. S.; RIBEIRO, M. R.; SANTOS, C. G. R. Peasant and scientific knowledge on Planosols as a source of material in the making of non-industrial pottery. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 39, n.1, Viçosa, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150719>

CHABBI A.; LEHMANN J.; CIAIS P.; LOESCHER H.W.; COTRUFO M.F.; DON A.; SANCLEMENTS M.; SCHIPPER L.; SIX J.; SMITH P.; RUMPEL C. Aligning agriculture and climate policy. **Nature climate change**. v. 7, p. 307–309, 2017. <https://doi.org/10.1038/nclimate3286>

DINIZ FILHO, E. T.; ERNESTO SOBRINHO, F.; SILVA, F. N.; MARACUJÁ, P.B; MAIA, S. S. S. Caracterização e Uso de Solos de Região Semiárida de Médio Oeste do Rio Grande do Norte. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.22, n. 3, p. 111-120, 2009.

CÂMARA, E. R. G.; DOS SANTOS, J. C. B.; DE ARAUJO FILHO, J. C.; SCHULZE, S. M. B. B.; CORREA, M. M.; FERREIRA, T. O.; DE SOUZA, J. E. S.; DE SOUZA JUNIOR, 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**, v. 385, p. 114878, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114878>

CÂMARA, E. R. G.; SANTOS, J. C. B.; ARAUJO FILHO, J. C.; SCHULZE, S. M. B. B.; CORREA, M. M.; FERREIRA, T. O.; SOUZA, J.E.S.; SOUZA JUNIOR, 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**, v. 385, p. 114878, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114878>

CARNEIRO, P.; DULLIUS, J.; LAGABUE, R.; MACHADO, C.; KETZER, J. M.; EINLOFT, S. Carbonatação do basalto e seu potencial uso no armazenamento de CO₂. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 10, n. 1, p. 43-49, 2013. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2013.006>

CASTRO, S. S. HERNANI C. Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade. **Embrapa Solos-Livro técnico (INFOTECA-E)**, 2015. 367 p. ISBN 978-85-7035-554-6

CAPECHE, C. L. Noções sobre tipos de estruturas do solo e sua importância para o manejo conservacionista. **Comunicado técnico 51 - EMBRAPA**, p. 1-6, 2008.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; RUIZ, H. A.; BASTOS, R. S. Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das várzeas de Sousa (PB). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p. 311-324, 2003.

CPRM Serviço Geológico do Brasil. Glossário Geológico Ilustrado. Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/saprolito.htm>

CUADROS, J. Clay minerals interaction with microorganisms: a review. **Clay Minerals**, v. 52, n. 2, p. 235-261, 2017. <https://doi.org/10.1180/claymin.2017.052.2.05>

CARVALHO, C. C. N.; NUNES, F. C.; ANTUNES, M. A. H. Histórico do levantamento de solos no Brasil: da industrialização brasileira à era da informação. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 5, p. 997-1013, 2013. <https://doi.org/10.14393/revbrascartogr>

DESSERT, C.; DUPRÉ, B.; GAILLARDET, J.; FRANÇOIS, L.M.; ALLEGRE, C.J. Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. **Chemical Geology**. 2003, 202, 257–273. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2002.10.001>

DRI, M.; SANNA, A.; MAROTO-VALER, M. M. Mineral carbonation from metal wastes: Effect of solid to liquid ratio on the efficiency and characterization of carbonated products. **Applied energy**, v. 113, p. 515-523, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.064>

DUARTE, I. M. R., **Solos Residuais de Rochas Granitóides a Sul do Tejo - Características Geológicas e Geotécnicas**. 2002. 373f. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade de Évora, Évora. 2002.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo / TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2017. 574 p. : il. color. ISBN 978-85-7035-771-7

ESCOBAR C. A. **Biolixiviación de níquel a partir de un saprolito garnierítico usando dos cepas de *Acidithiobacillus thiooxidans***. 2019. 135f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Biotecnología). Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias, Escuela de Biociencias Medellín, Colombia, 2019

FEKIACOVA, Z; PICHAT, S.; CORNU, S.; BALESSENT, J. Inferences from the vertical distribution of Fe isotopic compositions on pedogenetic processes in soils. **Geoderma**, v. 209, p. 110-118, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.007>

FERREIRA, J. T. P.. **Desenvolvimento de planossolos em distintas condições Geoambientais e o efeito do pousio em áreas sob processo de desertificação**. 126f. 2015. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2015.

FERREIRA, Q. C. G.; BACELLAR, L. A. P. Analysis of Chemical Mobility of Leachate Contaminants in Gneiss Saprolite of Belo Horizonte Solid Waste Landfill (CTRS BR 040), South-Eastern Brazil. **Soils and Rocks**, São Paulo, v.37, n. 1, p.50-59, 2014.

FONTANA, A.; PEREIRA, M.G.; BERNINI, T.A.; ANJOS, L.H.C. DOS; WADT, P.G.S.; SANTOS, L.L. DOS. Compartimentos da Matéria Orgânica de Solos sob Floresta no Estado do Acre. **Floresta e Ambiente**, v.24, 2017. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.057113>

FOPPEN, J. W.; LUTTERODT, G.; RAU, G. C.; MINKAH, O. Groundwater flow system analysis in the regolith of Dodowa on the Accra Plains, Ghana. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 28, p. 100663, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100663>

GAILLARDET, J.; CALMELS, D.; ROMERO, R.M.; ZAKHAROVA, E.; HARTMANN J. Global climate control on carbonate weathering intensity. **Chemical Geology**, v. 527, p. 118762, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.009>

GISLASON, S.R.; BROECKER, W.S.; GUNNLAUGSSON, E.; SNÆBJÖRNSDÓTTIR, S.; MESFIN, K.G.; ALFREDSSON, H.A.; ARADOTTIR, E.S.; SIGFUSSON, B.; GUNNARSSON, I.; STUTE, M.; MATTER, J.M.; ARNARSON, M. Th.; GALECZKA, I.M.; GUDBRANDSSON, S.; STOCKMANA, G.; WOLFF-BOENISCHA, D.; STEFANSSON, A.; RAGNHEIDARDOTTIR, E.; FLAATHENA, T.; GYSI, A.P.; OLSSENA, J.; DIDRIKSENE, K.; STIPP, S.; MENEZ, B.; OELKERSGA, E.H. Rapid solubility and mineral storage of CO₂ in basalt. **Energy Procedia**, v. 63, p. 4561-4574, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.489>

GULLÀ, G; MATANO, F. Surveys of weathering profile on gneiss cutslopes in Northern Calabria, Italy. **Engineering Geology and the Environment**. 1997. p. 133-138.

HAQUE, F.; SANTOS, R. M.; CHIANG, Y. W. Using nondestructive techniques in mineral carbonation for understanding reaction fundamentals. **Powder Technology**, v. 357, p. 134-148, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.089>

HASEGAWA, T.; SAKURAI, G.; FUJIMORI, S.; TAKAHASHI, K.; HIJIOKA, Y.; MASUI, T. Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs. **Nature Food**, v. 2, n. 8, p. 587-595, 2021. <https://doi.org/10.7910/DVN/KW2UEP>

HASENMUELLER, E. A.; GU, X.; WEITZMAN, J. N.; ADAMS, T. S.; STINCHCOMB, G. E.; EISSENSTAT, D. M.; KAYE, J. P. Weathering of rock to regolith: The activity of deep roots in bedrock fractures. **Geoderma**, v. 300, p. 11-31, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.020>

HAYES, J. L.; RIEBE, C. S.; HOLBROOK, W. S.; FLINCHUM, B. A.; HARTSOUGH, P. C. Porosity production in weathered rock: Where volumetric strain dominates over chemical mass loss. **Science advances**, v. 5, n. 9, p. eaao0834, 2019. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao0834>

HEIDEMANN, M.; BRESSANI, L. A.; FLORES, J. A. Influence of faults on alteration, mineralogy, and geotechnical behavior of granitic residual soils. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 80, n. 9, p. 7051-7068, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02351-x>

IPBES. **Summary for policymakers of the assessment report on land degradation and restoration of the Intergovernmental Science- Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.** / SCHOLLES, R.J. (Editor); MONTANARELLA, L. (Editor);

BRAINICH, E. (Editor); BRAINICH, E. (Editor); BARGER, N. (Editor); Ten BRINK, B. (Editor); CANTELE, M. (Editor); ERASMUS, B. (Editor); FISHER, J. (Editor); GARDNER, T. (Editor); HOLLAND, T.G. (Editor); KOHLER, F. (Editor); KOTIAHO, S. (Editor); Von MALTITZ, G. (Editor); NANGENDO, G. (Editor); PANDIT, R. (Editor); PARROTTA, J. (Editor); POTTS, M.D. (Editor); PRINCE, S. (Editor); SANKARAN, M. (Editor); WILLEMEN, L. (Editor). Bonn, Germany : Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2018. 44 p.

IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. **World Soil Resources Reports** No. 106. FAO, Rome. E-ISBN 978-92-5-108370-3

JENNY, H. Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology McGraw-Hill Book Company Inc., New York. 1941.

JIGE, M.; TAKAGI, T.; TAKAHASHI, Y.; KURISU, M.; TSUNAZAWA, Y.; MORIMOTO, K.; TSUKIMURA, K. Fe-kaolinite in granite saprolite beneath sedimentary kaolin deposits: A mode of Fe substitution for Al in kaolinite. **American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials**, v. 103, n. 7, p. 1126-1135, 2018. <https://doi.org/10.2138/am-2018-6478>

JESUS, K. N.; ALBUQUERQUE, E. R. G. M.; SALES, A. T.; SAMPAIO, E. V. D. S. B. Estoques de carbono em solos de Pernambuco, Brasil (Carbon stocks in soil of Pernambuco state, Brazil). **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 12, n. 3, p. 714-721, 2019.

JOHNSON, D. L.; SCHAETZL, R. J. Differing views of soil and pedogenesis by two masters: Darwin and Dokuchaev. **Geoderma**, v. 237, p. 176-189, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.020>

JUILLERET, J.; AZEVEDO, A. C.; SANTOS, R. A.; SANTOS, J. C.; PEDRON, F. D. A.; DONDEYNE, S. Where are we with whole regolith pedology? A comparative study from Brazil. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 35, n. 4, p. 251-261, 2018. <https://doi.org/10.1080/02571862.2017.1411537>

JUILLERET, J.; DONDEYNE, S.; HISSLER, C. What about the regolith, the saprolite and the bedrock? Proposals for classifying the subsolum in WRB. In: **EGU General Assembly Conference Abstracts**. 2014. p. 2716.

JUILLERET, J.; DONDEYNE, S.; VANCAMPENHOUT, K.; DECKERS, J.; HISSLER, C. Mind the gap: a classification system for integrating the subsolum into soil surveys. **Geoderma**, v. 264, p. 332–339, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.031>

JUNG, H. B.; XU, H.; RODEN, E. E. Long-term sorption and desorption of uranium in saprolite subsoil with nanoporous goethite. **Applied Geochemistry**, v. 102, p. 129-138, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.01.017>

KAMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. **Química e mineralogia do solo parte I - conceitos básicos**. Viçosa, MG: SBCS, 2009.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais**. Bookman Editora, 23 ed., 2012.

KÖPPEN, W. Grundriss der Klimakunde: Outline of climate science. Berlin: Walter de Gruyter, 1931. 388p.

LEHMANN, P.; LESHCHINSKY, B.; GUPTA, S.; MIRUS, B. B.; BICKEL, S.; LU, N.; OR, D. Clays are not created equal: How clay mineral type affects soil parameterization. **Geophysical Research Letters**, v. 48, n. 20, p. e2021GL095311, 2021. <https://doi.org/10.1029/2021GL095311>

LE PERA, E.; CRITELLI, S.; SORISSO, V. M. Weathering of gneiss in Calabria, Southern Italy. **Catena**, v. 42, n. 1, p. 1-15, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00117-X](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00117-X)

LEWIS, T. B.; GARCIA-CHEVESICH, P. A.; WILDEMAN, T. R.; SHARP, J. O. Changes in surface water quality from small-scale gold mining operations in the Surinamean rainforest. **Toxicological & Environmental Chemistry**, v. 102, n. 7-8, p. 334-355, 2020. <https://doi.org/10.1080/02772248.2020.1792908>

LI, G. L.; ZHOU, C. H.; FIORE, S.; YU, W. H. Interactions between microorganisms and clay minerals: New insights and broader applications. **Applied Clay Science**, v. 177, p. 91-113, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.04.025>

LI, N.; SACK, D.; SUN, J.; LIU, S.; LIU, B.; WANG, J.JIE, D. Quantifying the carbon content of aeolian sediments: Which method should we use?. **Catena**, v. 185, p. 104276, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104276>

LIMA, A. P. B. **Gênese de solos em topossequências no sudoeste de Mato Grosso-Brasil**. 2020. 149 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

LIU, M.; GADIKOTA, G. Single-step, low temperature and integrated CO₂ capture and conversion using sodium glycinate to produce calcium carbonate. **Fuel**, v. 275, p. 117887, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117887>

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. Fertilidade do solo, p. 2-64, 2007.

LOUREIRO, F.; MELAMED, R. O fósforo na agricultura brasileira: uma abordagem minero-metalúrgica. **Rio de Janeiro: CETEM–Centro de Tecnologia Mineral**, 2006.

MELO, V. F.; SINGH, B., SCHAEFER, C. E. G. R., NOVAIS, R. F.; FONTES, M. P. F. Chemical and mineralogical properties of kaolinite-rich Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 4, p. 1324-1333, 2001. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6541324x>

MOTA, F. O. B.; OLIVEIRA, J. B.; GEBHARDT, H. Mineralogia de um argissolo vermelho-amarelo eutrófico e de um planossolo háptico eutrófico solódico numa topossequência de gnaisses no Sertão Central do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, p. 607-618, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000300005>

PARAHYBA, R. D. B. V.; SANTOS, M. C. D.; ROLIM NETO, F. C.; JACOMINE, P. K. T. Pedogênese de Planossolos em topossequência do agreste pernambucano. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 34, p. 1991-2000, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000600023>

PITMAN, M. G.; LAÜCHLI, A. Global impact of salinity and agricultural ecosystems. In: LAÜCHLI, A.; LÜTTGE, U. (Eds.). **Salinity: environment-plants-molecules**. Springer, Dordrecht, 2002. p. 3-20. https://doi.org/10.1007/0-306-48155-3_1

POLA, A.; CROSTA, G. B.; CASTELLANZA, R.; AGLIARDI, F.; FUSI, N.; BARBERINI, V.; NORINI, G.; VILLA, A. Relationships between porosity and physical mechanical properties in weathered volcanic rocks. **ISRM International Workshop on Rock Mechanics and Geoenvironment in Volcanic Environments**. Puerto de la Cruz, Espanha, 2010.

MA, B.; CAO, Y.; ZHANG, Y.; ERIKSSON, K. A. Role of CO₂-water-rock interactions and implications for CO₂ sequestration in Eocene deeply buried sandstones in the Bonan Sag, eastern Bohai Bay Basin, China. **Chemical Geology**, v. 541, p. 119585, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119585>

MACHADO, S. R. V. **Caracterização química, física e mineralógica de saprólitos do estado de São Paulo e suas implicações na taxonomia e uso agrícola**. 1997, 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 1997.

MAGALHÃES, T. L.; BORTOLUZZI, R. L. C.; MANTOVANI, A. Levantamento florístico em três áreas úmidas (banhados) no Planalto de Santa Catarina, Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 11, p. 269-279, 2013. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/seerbio/ojs/index.php/rbb/article/view/2533/1211>

MCGRAIL, B.P.; SCHAEF, H.T.; HO, A.M.; CHIEN, Y.J.; DOOLEY, J.J.; DAVIDSON, C.L. Potential for carbon dioxide sequestration in flood basalts. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 111, n. B12, 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JB004169>

MOORE, O. W.; BUSS, H. L.; DOSSETO, A. Incipient chemical weathering at bedrock fracture interfaces in a tropical critical zone system, Puerto Rico. **Science Direct**, v. 252, p. 61-87, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.02.028>

MURPHY, S. F.; BRANTLEY, S. L.; BLUM, A. E.; WHITE, A. F.; & DONG, H. Chemical weathering in a tropical watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico: II. Rate and mechanism of biotite weathering. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 62, n. 2, p. 227-243, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00336-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00336-0)

NAVARRO, J. **Petrofísica e geoquímica de reservatório basáltico no município de Colômbia (SP): condicionantes para captura e armazenamento de CO₂ na Formação Serra Geral**. 2021. 110f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2021.

NAWAZ, M. F. **Geochemistry of hydromorphic soils and waters under rice culture and forest-continuous measurements, thermodynamic modelling and kinetics**. 2010. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente). Université Paul Cézanne-Aix-Marseille III. Provença, 2010.

NDJIGUI, P.D.; BADINANE, M.F.B.; NYECK, B.; NANDJIP, H.P.K.; BILONG, P. Mineralogical and geochemical features of the coarse saprolite developed on orthogneiss in the SW of Yaounde, South Cameroon. **Journal of African Earth Sciences**, Amsterdam, v. 79, p. 125-142, Mar. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2012.11.008>

NIMMO, J. R. The processes of preferential flow in the unsaturated zone. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, n. 1, p. 1-27, 2021. <https://doi.org/10.1002/saj2.20143>

O'CONNOR, W.K.; GERDEMANN, S. J.; DAHLIN D.C; PENNER, L.R.; RUSH G.E. Exsitu and in-Situ Mineral Carbonation as a Means to Sequester Carbon Dioxide. **Albany Research Center**, Albany, New York, 2004.

OESER, R. A.; STRONCIK, N.; MOSKWA, L. M.; BERNHARD, N.; SCHALLER, M.; CANESSA, R.; BRINK L. V. D.; KÖSTER M.; BRUCKER E.; STOCK S.; FUENTES J. P.; GODOY R.; MATUS F. J.; PEDRAZA R. O.; MCINTYRE P. O.; PAULINO L.; SEGUEL O.; BADER M. Y.; BOY J.; DIPPOLD M. A.; EHLERS T. A.; KÜHN P.; Y. KUZYAKOV; P. LEINWEBER; T. SCHOLTEN; S. SPIELVOGEL; M. SPOHN; K. ÜBERNICKEL; K. TIELBÖRGER; WAGNER D.; BLANCKENBURG, F. V. Chemistry and microbiology of the Critical Zone along a steep climate and vegetation gradient in the Chilean Coastal Cordillera. **Catena**, v. 170, p. 183-203, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.002>

OLIVEIRA, L. B. D. **Mineralogia, micromorfologia, gênese e classificação de Luvisolos e Planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas no semi-árido do Nordeste Brasileiro**. 2007. 169f. Tese (doutorado em solos e nutrição de plantas). Universidade Federal de Viçosa, MG, 2007.

OLIVEIRA, L.B.; RIBEIRO, M.R.; FERRAZ, F.B. & JACOMINE, P.K.T. Classificação de solos Planossólicos do Sertão do Araripe (PE). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27:685-693, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000400013>

PARAHYBA, R. B. V.; SANTOS, M. C.; ROLIM NETO, F. C. Evolução quantitativa de planossolos do agreste do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 991-999, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400023>

PARK, A.H.A., FAN, L.S. CO₂ mineral sequestration: physically activated dissolution of serpentine and pH swing process. **Chemical Engineering Science** v.59 p.5241-5247, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.09.008>

PEDRON, F. A. **Mineralogia, morfologia e classificação de saprolitos e Neossolos derivados de rochas vulcânicas no Rio Grande do Sul**. 2017. 160f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

PHILLIPS, D. H.; WATSON, D. B.; ROH, Y. Uranium deposition in a weathered fractured saprolite/shale. **Environmental science & technology**, v. 41, n. 22, p. 7653-7660, 2007. <https://doi.org/10.1021/es070819d>

QUETA, F.M.; DUARTE, I.M.R.; BONITO, F.A.B. Caracterização geológica e geotécnica de solos residuais tropicais da Região Central de Angola. In: J.F. Silva Gomes, C. António, C.F. Afonso & A.S. Matos, (Eds). *A Engenharia como motor para a Inovação e o Desenvolvimento*. **LusoImpress S.A.**, Inhambane. ISBN: 978-989-98832-0-8, 209p. [on CD-ROM insert, Ref.CLME'2014_A103566], Moçambique. ISBN: 978-989-98832-1-5. 2014.

RAHMANI, O. An experimental study of accelerated mineral carbonation of industrial waste red gypsum for CO₂ sequestration. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 35, p. 265-271, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.10.005>

RUIZ, F.; ANDRADE, G. R. P.; SARTOR, L. R.; SANTOS, J. C. B., SOUZA JÚNIOR, V. S.; FERREIRA, T. O. The rhizosphere of tropical grasses as driver of soil weathering in embryonic Technosols (SE-Brazil). **Catena**, v. 208, p. 105764, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2021.105764>

SANNA, A.; UIBU, M.; CARAMANNA, G.; KUUSIK, R.; MAROTO-VALER, M. M. A review of mineral carbonation technologies to sequester CO₂. **Chemical Society Reviews**, v. 43, n. 23, p. 8049-8080, 2014. <https://doi.org/10.1039/C4CS00035H>

SANTOS, J. C. B. dos. **Saprolitologia aplicada à gênese e às implicações ambientais de regolitos do Estado de Pernambuco**. 2015. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

SANTOS, J.C.B.; LE PERA, E.; Souza Júnior; V. S., de Oliveira; C. S., Juilleret, J.; Corrêa, M. M., & de Azevedo, A. C et al. Porosity and genesis of clay in gneiss saprolites: The relevance of saprolithology to whole regolith pedology. **Geoderma**, v. 319, p. 1–13, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.031>

SANTOS, R. A, SERMARINI, R.A.; GUERRA, A.R.; SANTOS J. C. B.; AZEVEDO A.C. Field perception of the boundary between soil and saprolite by pedologists and its differentiation using mathematical models. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v43, 2019. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20180104>

SANTOS, J.C.B.; LE PERA, E.; OLIVEIRA, C.S.; SOUZA JÚNIOR, V.S., PEDRON, F.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. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.040>

SANTOS, J. C. B., LE PERA, E., DE SOUZA JÚNIOR, V. S., CORRÊA, M. M., AZEVEDO, A. C. Gneiss saprolite weathering and soil genesis along an east-west regolith sequence (NE Brazil). **Catena**, v. 150, p. 279-290, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.031>

SANTOS, J. C. B.; OLIVEIRA, C. S.; LE PERA, E.; SARTOR, L. R.; CORRÊA, M. M.; SILVA, A. H. N.; AZEVEDO, A. C. Saprolithology applied to pedology: Integrated study of soil and saprolite derived from crystalline rocks to better understand properties of whole regoliths along a climate gradient (NE Brazil). **Geoderma**, v. 409, p. 115602, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115602>

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; DOS ANJOS, L. H. C.; De Oliveira, V. A., LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SARAIVA, S. M.; FRAGA, V. D. S.; DE ARAÚJO FILHO, J. C.; DOS SANTOS, R. F.; FELIX, E. D. S.; CAMPOS, M.; DIAS, B. S.; CARNEIRO, K. Caracterização de Planossolos nátricos em um gradiente pluviométrico no Semiárido brasileiro. **Embrapa Solos-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2021.

SAUERBRONN, W. M.; CAETANO-CHANG, M. R.; CHANG, H. K.; GASTMANS, D. Potencial mineral de rochas metamáficas e metaultramáficas da faixa Itapira-Amparo para uso em processo de formação de carbonato no sequestro de CO₂. **Geosciences= Geociências**, v. 32, n. 1, p. 101-117, 2013.

SILVA, D. L. A. Solos e gênese da cerosidade numa toposseguência com baixa a alta Atividade da fração argila 2018. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018.

SILVA, L. F.; FRUETT, T.; ZINN, Y. L.; INDA, A. V.; NASCIMENTO, P. C. Genesis, morphology and mineralogy of Planosols developed from different parent materials in southern Brazil. **Geoderma**, v. 341, p. 46-58, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.010>

SCHWERTMANN, U. Relations between iron oxides, soil color, and soil formation. **Soil color**, v. 31, p. 51-69, 1993. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub31.c4>

SCHEINOST, A. C.; SCHWERTMANN, U. Color identification of iron oxides and hydroxysulfates: use and limitations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 5, p. 1463-1471, 1999. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351463x>

SIDALC, BDAGBAMB. Título: Manual internacional de fertilidade do solo. P. imprensa: Piracicaba, SP (Brazil). 1998. 177 p.

SILVA, R. S. S. **Mineralogia e geoquímica do perfil laterítico do depósito de ferro da Serra Leste**, Mestrado (Geologia e Geoquímica). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

SIMON, A.; WILHELMY, M.; KLOSTERHUBER, R.; COCUZZA, E.; GEITNER, C.; KATZENSTEINER, K. A system for classifying subsolum geological substrates as a basis for describing soil formation. **Catena**, v. 198, p. 105026, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105026>

SILVA, P. C. **Carbonatação de basalto para armazenamento de carbono**. 2009. 68f. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

SILVA, W. T. M.; ALVES, F. J. B.; LEONARDO, F. D. A. P.; DOS SANTOS, R. V.; JÚNIOR, J. A.F. Levantamento da textura do solo e da relação silte/argila em regiões semiáridas do nordeste. **AGROPECUÁRIA CIENTÍFICA NO SEMIÁRIDO**, v. 14, n. 4, p. 266-272, 2019. <http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v14i4.993>

SILVA, L. S.; JÚNIOR, J. M.; BARRÓN, V.; GOMES, R. P.; TEIXEIRA, D. D. B.; SIQUEIRA, D. S.; VASCONCELOS, V. Spatial variability of iron oxides in soils from Brazilian sandstone and basalt. **Catena**, v. 185, p. 104258, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104258>

SMITH, P.; SOUSSANA, J. F.; ANGERS, D.; SCHIPPER, L.; CHENU, C.; RASSE, D. P.; N. H. BATJES, N.H; EGMOND, F. V.; MCNEILL, S.; KUHNERT, M.; ARIAS-NAVARRO, C.; OLESEN, J. E.; CHIRINDA, N.; FORNARA, D.; WOLLENBERG, E.; ÁLVARO-FUENTES J.; SANZ-COBENA, A.; KLUMPP, K. How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 219-241, 2020. <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>

SOARES, M. R. **Separação e caracterização da fração nanométrica dos minerais dos solos e sua importância na sorção de nutrientes e qualidade estrutural dos solos**. 66f. Tese (Doutorado em Química). Universidade de São Paulo, 2020.

STONE, E. L.; COMERFORD, N. B. Plant and animal activity below the solum. **Whole regolith pedology**, v. 34, p. 57-74, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub34.c4>

STOLT, M. H.; BAKER, J. C.; SIMPSON, T. W. Characterization and genesis of saprolite derived from gneissic rocks of Virginia. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 2, p. 531-539, 1992. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005020030x>

SURBRUGG, J. E. **Water and solute distributions in the soil/saprolite continuum under on-site wastewater disposal systems**. 1992. Tese (Ph.d.) North Carolina State University, Raleigh, 1993.

TAZAZI, K. Clays, microorganisms, and biomineralization. **Developments in Clay Science**, v. 1, p. 477-497, 2006. [https://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01014-7](https://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01014-7)

TAYLOR, R.; TINDIMUGAYA, C.; BARKER, J.; MACDONALD, D.; KULABAKO, R. Convergent radial tracing of viral and solute transport in gneiss saprolite. **Groundwater**, v. 48, n. 2, p. 284-294, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00547.x>

THENG, B. K. G.; ORCHARD, V. A. Interactions of Clays with Microorganisms and Bacterial Survival in Soil: a Physicochemical Perspective. **Environmental Impacts of Soil Component Interactions: Metals, Other Inorganics, and Microbial Activities**, v. 2, p. 123, 1995.

TJIA, H.D.. Growing evidence of active deformation in the Malay basin region. **Bulletin of the Geological Society of Malaysia**. 35-40. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.258.GL17>

TRINDADE, E. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; ALBUQUERQUE, M. A.; ABRAHÃO, W. A. P.; MELLO, J. W. V.; CHAGAS, A. C. Crostas biológicas em saprolitos de gnaiss: ciclagem biogeoquímica, micromorfologia e ensaio de colonização. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 25, p. 849-861, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000400008>

TRINDADE, E. D. S.; SCHAEFER, C. E. G.; ABRAHÃO, W. A.; RIBEIRO, JR. E. S.; OLIVEIRA, D. M.; TEIXEIRA, P. C. Crostas biológicas de saprólitos da região do quadrilátero ferrífero, mg: ciclagem biogeoquímica e micromorfológica. **Geonomos**, 2005. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v13i1e2.133>

TSAI, C.C.; CHEN, Z.S. Lithologic discontinuities in ultisols along a toposequence in Taiwan. **Soil Science**, v. 167, p. 587-596, 2000.

TUBIELLO, F. N.; CONCHEDDA, G.; WANNER, N.; FEDERICI, S.; ROSSI, S.; GRASSI, G. Carbon emissions and removals from forests: new estimates, 1990–2020. **Earth System Science Data**, v. 13, n. 4, p. 1681-1691, 2021. <https://doi.org/10.5194/essd-13-1681-2021>

VEPRASKAS, M. J.; HOOVER, M. T.; JONGMANS, A. G.; & BOUMA, J. Hydraulic conductivity of saprolite as determined by channels and porous groundmass. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, n. 4, p. 932-938, 1991. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500040006x>

VEPRASKAS, M. J.; KLEISS, H. J.; AMOOZEGAR, A.; GUERTAL, W. R. Porosity factors that control the hydraulic conductivity of soil-saprolite transitional zones. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 1, p. 192-199, 1996. <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000010031x>

VYSLOUŽILOVÁ, B.; ERTLEN, D.; SCHWARTZ, D.; ŠEFRNA, L. Chernozem. From concept to classification: a review. **AUC Geographica**, v. 51, n. 1, p. 85-95, 2016. <http://dx.doi.org/10.14712/23361980.2016.8>

WALD, J. A.; GRAHAM, R. C.; SCHOENEBERGER, P. J. Distribution and properties of soft weathered bedrock at ≤ 1 m depth in the contiguous United States. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n. 6, p. 614-626, 2013. <https://doi.org/10.1002/esp.3343>

WALKER, A. P.; KAUWE, M. G.; BASTOS, A.; BELMECHERI, S. GEORGIU, K.; KEELING, R. F.; MCMAHON, S. M.; MEDLYN, B. E.; MOORE, D. J. P.; NORBY, R. J.; ZAEHLE, S.; ANDERSON-TEIXEIRA, K. J.; BATTIPAGLIA, G.; BRIENEN, R. J. W.; CABUGAO, K. G.; CAILLERET, M.; CAMPBELL, E.; CANADELL, J. G.; CIAIS, P.; CRAIG, M. E.; ELLSWORTH, D. S.; FARQUHAR, G. D.; FATCHI, S.; FISHER, J. B.; FRANK, D. C.; GRAVEN, H.; GU, L.; HAVERD, V.; HEILMAN, K.; HEIMANN, M.; HUNGATE, B. A.; IVERSEN, C. M.; JOOS, F.; JIANG, M.; KEENAN, T. F.; KNAUER, J.; KORNER, C.; LESHYK, V. O.; LEUZINGER, S.; LIU, Y.; MACBEAN, N.; MALHI, Y.; MCVICAR, T. R.; PENUELAS, J.; PONGRATZ, J.; POWELL, A. S.; RIUTTA, T.; SABOR, M. E. B.; SCHLEUCHER, J.; SITCH, S.; SMITH, W. K.; SULMAN, B.; TAYLOR, B.; TERRER, C.; TORN, M. S.; TRESEDER, K. K.; TRUGMAN, A. T.; TRUMBORE, S. E.; MANTGEN, P. J. V.; VOELKER, S. L.; WHELAN, M.E.; ZUIDEMA, P. A. Integrating the evidence for a terrestrial carbon sink caused by increasing atmospheric CO₂. **New Phytologist**, v. 229, n. 5, p. 2413-2445, 2021. <https://doi.org/10.1111/nph.16866>

WILLIAMSON, D.; KUHN, C. The unified rock classification system. In: **Rock Classification Systems for Engineering Purposes**. ASTM International, 1988. <https://doi.org/10.1520/STP48460S>

WINGE, M.; CRÓSTA, A.; NEVES, B.; ALVARENGA, C.; SCHOBENHAUS, C.; CARNEIRO, C. Glossário Geológico Ilustrado. 2001. Disponível em: <<http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/saprolito.htm>>. Acesso em 27 de janeiro de 2022.

WIEDERHOLD, J.G.; TEUTSCH, N.; KRAEMER, M.; HALLIDAY, A.N.; KRETZSCHMAR, R. Iron isotope fractionation during pedogenesis in redoximorphic soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 6 p 1840–1850, 2007. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0379>

XAVIER, S. A. S.; VIANA, M. S. S.; SOUZA, E. B. de. Caracterização química de vegetal holocênico mineralizado procedente de Camocim, Ceará. **Geologia USP. Série Científica**, [S. l.], v. 18, n. 4, p. 3-9, 2018. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-142477>

ZENG, S.; LIU, Z.; KAUFMANN, G. Sensitivity of the global carbonate weathering carbon-sink flux to climate and land-use changes. **Nature communications**, v. 10, n. 1, p. 1-10, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13772-4>

ZEVENHOVEN, R.; TEIR, S.; ELONEVA, S. Heat optimisation of a staged gas–solid mineral carbonation process for long-term CO₂ storage. **Energy**, v. 33, n. 2, p. 362-370, 2008. <https://doi.org/10.1016%2Fj.jhydrol.2015.11.049>

ZHANG, Z.; MA, J.; WANG, Z.; ZHANG, L.; HE, X.; ZHU, G.; WEI, G. Rubidium isotope fractionation during chemical weathering of granite. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 313, p. 99-115, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.08.010>