



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO



DIOGO DANILO DE SOUSA FREITAS

**GÊNESE E VARIABILIDADE ESPACIAL DE SOLOS NO NÚCLEO DE
DESERTIFICAÇÃO DOS CARIRIS VELHOS NA PARAÍBA**

AREIA
2021

DIOGO DANILO DE SOUSA FREITAS

**GÊNESE E VARIABILIDADE ESPACIAL DE SOLOS NO NÚCLEO DE
DESERTIFICAÇÃO DOS CARIRIS VELHOS NA PARAÍBA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do Título em Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Solos em Ecossistemas Agrícolas e Naturais. Linha de Pesquisa: Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Moreira Beirigo
Coorientador: Dr. Rodrigo Santana Macedo

AREIA
2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F866g Freitas, Diogo Danilo de Sousa.

Gênese e variabilidade espacial de solos no núcleo de desertificação dos cariris velhos na Paraíba / Diogo Danilo de Sousa Freitas. - Areia, 2021.
108 f. : il.

Orientação: Raphael Moreira Beirigo.
Coorientação: Rodrigo Santana Macedo.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CCA.

1. Ciência do Solo. 2. Cariri paraibano. 3. Processos pedogenéticos. 4. Estoque de carbono. 5. Degradação do solo. I. Beirigo, Raphael Moreira. II. Macedo, Rodrigo Santana. III. Título.

UFPB/CCA-AREIA

CDU 631.4(043.3)

DIOGO DANILO DE SOUSA FREITAS

**GÊNESE E VARIABILIDADE ESPACIAL DE SOLOS NO NÚCLEO DE
DESERTIFICAÇÃO DOS CARIRIS VELHOS NA PARAÍBA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do Título em Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Solos em Ecossistemas Agrícolas e Naturais. Linha de Pesquisa: Solos e Nutrição de Plantas.

Aprovado em: 31/08/2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Raphael Moreira Beirigo
Orientador - UFPB



Prof. Dr. Milton César Costa Campos
Examinador interno - UFPB



Pesquisadora Dra. Thalita Campos Oliveira
Examinadora externa - PPGBIO/CCA/UFPB

Não há exemplo maior de dedicação do que o da nossa família. A minha querida família e em especial a minha Mãe e a minha Avó, a quem agradeço as bases que deram para eu me tornar a pessoa que sou hoje, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concedido saúde, sabedoria e o dom da vida para trilhar os caminhos mais justos e honestos em busca dos meus objetivos de vida.

A minha família e em especial a minha Mãe, Terezinha de Sousa, e a minha Avó, Josefa Maria de Jesus, que são as minhas maiores inspirações de vida.

Ao Professor, meu orientador e amigo, Raphael Moreira Beirigo, por ter aceitado acompanhar-me neste projeto, pelo companheirismo, pelo grande ser humano que é, pelos bons e divertidos momentos convividos dentro da universidade e nas aulas/coletas de campo, pela humildade em compartilhar o conhecimento durante esta jornada científica e, acima de tudo, pela amizade construída nestes dois anos e seis meses de Mestrado.

Ao pesquisador do Instituto Nacional do Semiárido (INSA), meu coorientador e amigo, Rodrigo Santana Macedo, pelo companheirismo, pelo grande ser humano que é, pelos bons e divertidos momentos convividos nas aulas da disciplina de Mineralogia, no INSA e nas coletas de campo, pela humildade em compartilhar o seu conhecimento, por sempre se mostrar a disposição a tirar as minhas dúvidas no decorrer desta jornada e, acima de tudo, pela amizade construída.

Ao grupo de pesquisa “Gênese e Serviços Ecosistêmicos do Solo” e em especial as pessoas de Kaio (Indiano), Matheus (Mago de aço) e Thomazia pelos bons momentos convividos e pela ajuda nas coletas no campo e nas análises laboratoriais.

Ao Instituto Nacional do Semiárido (INSA) por ter permitido realizar as análises laboratoriais na infraestrutura da Estação Experimental Prof. Ignácio Salcedo junto ao seu corpo técnico. Meu muito obrigado ao pessoal que compõe o Núcleo de Solos do INSA pelo apoio físico e intelectual. Aos Técnicos de Laboratório, Júlia, Fabiane e Seu Raimundo Nonato. Aos Pesquisadores, Cristiano, Letícia Mouro e Rodrigo Macedo. Todos vocês foram importantíssimos no decorrer desta pesquisa.

Ao meu orientador na graduação e amigo o qual tenho uma imensa admiração, Professor Roseilton Fernandes, que foi o precursor no despertar do meu interesse em estudar solos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo (PPGCS) e em especial aos Professores: Alexandre Paiva, Bruno Dias, Davi, Flávio Pereira, Jaime, Milton Campos, Raphael Beirigo e Thalita.

À Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) – Fazenda Almas e a Estação Experimental São João do Cariri (EESJC).

Aos meus amigos da Pós-Graduação, que durante todo este período tornaram-se além de amigos minha família: Cassio Macedo, Camila, Francisco Edson (Rasta), Fernando (Boquinha), Gislaine Santos, Guilherme, João Belarmino (Joãozinho), Joseilton, Josevan (Barroso), Júlia, Rafael (Peruano), Raimundo, Regiane, Roselita, Samuel Inocêncio, Saul Ramos, Walber, Willian (Xablau) e William Santana.

Ao Laboratório de Física do departamento de Solos e Engenharia Rural (DSER), em especial as pessoas do Prof. Flávio Pereira e do Técnico de Laboratório Seu Vaval pelas amizades e por toda contribuição nas análises e equipamentos.

Ao Laboratório de Matéria Orgânica do Solo do DSER, em especial as pessoas do prof. Bruno Dias e do técnico de Laboratório Ramon pela amizade, pelo apoio com os equipamentos e metodologias e por toda contribuição nas análises.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos durante todo o período do Mestrado.

Em tudo dai graças, porque esta é a vontade de Deus em Cristo Jesus para convosco.
1 Tessalonicenses 5:18

RESUMO

O manejo inadequado e a exploração dos recursos naturais que se perpetuou ao longo do tempo na região do Cariri paraibano resultaram na degradação de uma vasta área nessa região e comprometeu o fornecimento dos diversos serviços ecossistêmicos que os solos são capazes de fornecer. Por outro lado, áreas em que ocorre a preservação dos recursos naturais como a reserva particular de patrimônio privado (RPPN), situada na cidade de São José dos Cordeiros no estado da Paraíba, contribuem para o bom funcionamento do ecossistema. O estudo foi realizado em duas áreas distintas alocadas dentro da região do Cariri paraibano e com enfoque em Luvissolos, Neossolos e Planossolos. Uma área que conserva os recursos naturais há 40 anos, Reserva Particular do Patrimônio Natural – (RPPN), e outra área que se encontra sob intenso processo de degradação, Estação Experimental de São João do Cariri (EESJC). Os processos que resultaram na degradação da área da EESJC impactaram na capacidade dos solos de sequestrarem e estocarem C e N quando comparados aos solos das mesmas classes da RPPN. Rubeificação, argilização, elutriação, pedalização e sodificação se mostraram os principais processos pedogenéticos específicos atuantes na gênese dos solos estudados. As malhas amostrais adotadas nos perfis dos solos estudados foram eficientes para o estudo geoestatístico e todos os atributos avaliados apresentaram variabilidade espacial.

Palavras-chave: Cariri paraibano; processos pedogenéticos; estoque de carbono; degradação do solo.

ABSTRACT

The inadequate management and exploitation of natural resources that has been perpetuated over time in the Cariri region of Paraíba resulted in the degradation of a vast area in this region and compromised the provision of the various ecosystem services that the soils are capable of providing. On the other hand, areas where natural resources are preserved, such as the private reserve of private heritage (RPPN) located in the city of São José dos Cordeiros in the state of Paraíba, contribute to the proper functioning of the ecosystem. The study was carried out in two distinct areas allocated within the Cariri region of Paraíba and focusing on Luvisols, Neosols and Planosols. An area that has conserved natural resources for 40 years, Private Reserve of Natural Heritage – (RPPN), and another area that is undergoing an intense process of degradation, Experimental Station of São João do Cariri (EESJC). The processes that resulted in the degradation of the EESJC area impacted the ability of soils to sequester and store C and N when compared to soils of the same classes of the RPPN. Rubeification, claying, elutriation, pedaling and sodification proved to be the main specific pedogenetic processes active in the genesis of the studied soils. The sampling grids adopted in the studied soil profiles were efficient for the geostatistical study and all attributes evaluated showed spatial variability.

Keywords: Cariri from Paraíba; pedogenetic processes; carbon stock; soil degradation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo esquemático de um semivariograma e seus parâmetros.....	24
Figura 2 - Mapa do Brasil, estado da Paraíba e localização de São João do Cariri e São José dos Cordeiros no Cariri paraibano.....	36
Figura 3 - Perfis de uma sequência de solos sob caatinga preservada (CP) em São José dos Cordeiros no estado da Paraíba, Brasil. a) P1 - LUVISSOLO CRÔMICO; b) P2 - PLANOSSOLO NÁTRICO; c) P3 - LUVISSOLO CRÔMICO; D) P4 - NEOSSOLO REGOLÍTICO.....	38
Figura 4 - Perfis de uma sequência de solos sob área degradada (AD) em São João do Cariri no estado da Paraíba, Brasil. e) P5 - LUVISSOLO CRÔMICO; f) P6 - PLANOSSOLO NÁTRICO; g) P7 - LUVISSOLO CRÔMICO.	39
Figura 5 - Estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) de uma topossequência de solos sob caatinga preservada (CP) em São José dos Cordeiros. Estado da Paraíba, Brasil. A) P1; B) P2; C) P3 e D) P4.	61
Figura 6 - Estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) de uma topossequência de solos sob área degradada (AD) em São João do Cariri (AD). Estado da Paraíba, Brasil. E) P5; F) P6 e G) P7.....	62
Figura 7 - Mineralogia da fração areia de solos sob vegetação em regeneração (P1 e P4) e sob processo de degradação (P6) na região semiárida nordestina. Mesoregião dos Cariris, estado da Paraíba, Brasil. An: anfibólio; Al: albita; Fd: feldspato; KFd: feldspato potássico; Ol: olivina; Mi: mica; Qz: quartzo.	63
Figura 8 - Mineralogia da fração argila de solos sob vegetação em regeneração (P1) e sob processo de degradação na região semiárida nordestina (P6). Mesoregião dos Cariris, estado da Paraíba, Brasil. Ct: caulinita; Es: esmectita; Mi: mica; Vm: vermiculita. Tratamentos: 25°C: argila natural; Mg + G: saturação com Mg e solvatação com glicerol.	64
Figura 9 - a) área degradada onde se situam os perfis P5, P6 e P7; b) estrutura laminar do horizonte A do P7; c) Ocorrência de “demoiselles” na área degradada; d) estrutura biogênica encontrada no P1 e e) carbonato de cálcio (CaCO ₃) no horizonte Bt do P2.....	74
Figura 10 - Mapa do Brasil, estado da Paraíba e localização de São João do Cariri e São José dos Cordeiros no.....	84
Figura 11 - A) área do P1; B) área do P2 e C) e D) determinação dos grids amostrais em campo.	85

Figura 12 - Grid estabelecido no perfil do solo (P2) para posterior coleta e determinação da variabilidade espacial dos atributos.....	86
Figura 13 - Esquema de amostragem sistemática utilizado no P1 para determinação do grid.	86
Figura 14 - Esquema de amostragem sistemática utilizado no P2 para determinação do grid.	86
Figura 15 - Mapas de Krigagem e gráficos box-plots para os atributos a) pH; b) COS; c) MOS; d) Ca ²⁺ ; e) Mg ²⁺ ; f) Na ⁺ ; g) K ⁺ , h) Areia; i) Silte e J) Argila do LUVISSOLO CRÔMICO (P1) da Fazenda Almas.....	93
Figura 16 - Mapas de Krigagem e gráficos box-plots para os atributos a) pH; b) COS; c) MOS; d) Ca ²⁺ ; e) Mg ²⁺ ; f) Na ⁺ ; g) K ⁺ , h) Areia; i) Silte e J) Argila do LUVISSOLO CRÔMICO sob área degradada na Estação Experimental São João do Cariri.	97
Figura 17 - Análise de componentes principais das variáveis dos solos nos ambientes estudados da região do cariri paraibano (P1: perfil localizado em ambiente de caatinga preservada; P2: perfil localizado em área sob estágio avançado de degradação).	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Georreferenciamento dos perfis estudados nos municípios de São José dos Cordeiros (Toposequência em Caatinga preservada) (P1 ao P4) e São João do Cariri (Toposequência em Caatinga degradada) (P5 ao P7).....	39
Tabela 2 - Caracterização morfológica de uma sequência de solos sob caatinga preservada (CP) em São José dos Cordeiros. estado da Paraíba, Brasil.	43
Tabela 3 - Atributos físicos de uma sequência de solos sob caatinga preservada (CP) em São José dos Cordeiros (T1). estado da Paraíba, Brasil.	48
Tabela 4 - Atributos químicos de uma sequência de solos sob caatinga preservada (CP) em São José dos Cordeiros. Estado da Paraíba, Brasil.....	50
Tabela 5 - Estoques e teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) de uma sequência de solos sob caatinga preservada (CP) em São José dos Cordeiros. Estado da Paraíba, Brasil.....	52
Tabela 6 - Caracterização morfológica de uma sequência de solos sob área degradada em São João do Cariri (AD). estado da Paraíba, Brasil.....	54
Tabela 7 - Atributos físicos de uma sequência de solos sob área degradada (AD) em São João do Cariri, estado da Paraíba, Brasil.	56
Tabela 8 - Atributos químicos de uma sequência de solos sob área degradada (AD) em São João do Cariri (AD). Estado da Paraíba, Brasil.....	58
Tabela 9 - Estoques e teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) de uma sequência de solos sob área degradada (AD) em São João do Cariri (AD). Estado da Paraíba, Brasil.....	60
Tabela 10 - Estatística descritiva dos atributos químicos e físicos do P1 e do P2.	89
Tabela 11 - Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas para os atributos utilizados dos perfis P1 e P2.....	91

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	14
1.1 Terras secas.....	14
1.2 Solos de terras secas	15
1.3 Desertificação	16
1.4 Serviços ecossistêmicos do solo (SES)	17
1.5 Luvisolos.....	18
1.6 Planossolos	19
1.7 Carbono e nitrogênio	21
1.8 Geoestatística e variabilidade espacial do solo.....	22
REFERÊNCIAS	25
1 INTRODUÇÃO	33
2 MATERIA E MÉTODOS.....	36
2.1 Descrições das áreas	36
2.2 Seleção das áreas de estudo, descrição e amostragem dos solos.....	37
2.3 Análises dos atributos dos solos	40
2.3.1 Análises físicas	40
2.3.2 Análises químicas.....	40
2.3.3 Análises mineralógicas.....	41
2.3.4 Estoques de carbono e nitrogênio.....	41
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
3.1 Atributos morfológicos, físicos, químicos e ECOT e ENT	42
4 CONCLUSÕES.....	75
REFERÊNCIAS	76
1 INTRODUÇÃO	82
2 MATERIAL E MÉTODOS	84
2.1 Descrição das áreas estudadas	84
2.2 Determinação dos grids nos perfis dos solos.....	84
2.3 Estatística descritiva, geoestatística e multivariada (ACP)	87
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
3.1 Solo sob Caatinga preservada (CP)	92
3.2 Solo sob área degradada (AD).....	96
3.3 Discussão	100

3.4 Análise de Componentes Principais	104
4 CONCLUSÕES.....	105
REFERÊNCIAS	106

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Terras secas

As Terras secas (TS) são regiões caracterizadas por baixos índices pluviométricos, altas temperaturas, elevadas taxas de evapotranspiração e uma produção de biomassa vegetal limitada, na qual cobrem mais de 45% da superfície terrestre e são habitadas por mais de 35% da população mundial (Plaza et al., 2018). Algumas TS presentes na África equatorial têm uma precipitação média anual superior a 1000 mm por ano, mas as altas temperaturas médias e as estações secas prolongadas proporcionam elevadas perdas de água por evapotranspiração (Davies et al., 2016).

O método da FAO classifica as TS a partir da razão entre a precipitação pluviométrica e a evapotranspiração potencial, resultando no Índice de Aridez (IA). Esse índice indica a intensidade da aridez de uma região, sendo que quanto menor o valor obtido, maior a aridez da área. Nesse sentido, a United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) define as TS como zonas climáticas com $IA < 0,65$.

As TS ocupam uma área de 6,1 bilhões de hectares no mundo (Cherlet et al., 2018). Com base no índice de aridez, as TS podem ser agrupadas em zonas hiperárida ($<0,05$), áridas (0,05 a 0,2), semiáridas (0,2 a 0,5) e sub úmida secas (0,5 a 0,65). No Brasil, alguns locais inseridos na região semiárida que apresentam precipitação superior a 700 mm, porém concentrada em poucos meses do ano e associadas a elevadas taxas de evapotranspiração (Alvares et al. 2013).

A região semiárida mais populosa do mundo localiza-se no Brasil (Sousa et al., 2017) e, dentro dela, encontram-se as TS. O semiárido estende-se por oito estados da região Nordeste e o Norte de Minas Gerais (INSA, 2018), abrangendo uma extensão territorial de 980.133,079 km², o que é equivalente a 13,25% do território nacional e 72,57% da região Nordeste (IBGE, 2019). Essa região é caracterizada por curtos períodos sazonais de chuvas, altas temperaturas e evapotranspiração, chegando a limitar a produção de biomassa vegetal (Antonino et al., 2000). Todos esses aspectos tornam o semiárido brasileiro um ecossistema frágil (Althoff et al., 2016).

A região do Cariri paraibano (Cariris Velhos) está inserida na região semiárida brasileira. São divididas em Cariri Ocidental e Cariri Oriental, sendo constituído por vinte e nove municípios, entre eles São João do Cariri e São José dos Cordeiros (Souza et al., 2009).

O Cariri apresenta baixos índices pluviométricos, temperaturas médias elevadas (cerca de 27°C), déficit hídrico acentuado, com predomínio de caatinga hiperxerófila e ocorrência de solos desde rasos, com baixo grau de desenvolvimento pedogenético, até solos pouco profundos e com maior expressão dos processos pedogenéticos (Souza et al., 2009; Macedo et al., 2021).

1.2 Solos de terras secas

A geologia da região das terras seca do Brasil é formada predominantemente por material do cristalino (Althoff et al., 2016; Sousa et al., 2017). Em geral, os solos apresentam textura arenosa, reduzida capacidade de armazenamento de água, altas taxas de escoamento superficial, saturação por bases elevadas, baixos teores de matéria orgânica e de carbono orgânico (Plaza et al., 2018).

As classes de solos mais representativas das TS do mundo são: Regosols (Neossolo Regolítico), Leptsols (Neossolo Litólico), Arenosols (Neossolo Quartzarênico) e Calcisols (solos com acúmulo de carbonato de cálcio) (Plaza et al., 2018). Nas TS do Brasil predominam os Latossolos, Neossolos, Argissolos, Luvisolos, Planossolos e Cambissolos (Cunha et al., 2010). Por outro lado, Luvisolo Crômico e Neossolo Litólico predominam no Cariri paraibano, com destaque para os Luvisolos Crômicos que associados aos Luvisolos Háplicos ocupam 89% da região dos Cariris (Macedo et al., 2021).

Devido ao manejo inadequado, os solos das TS estão sujeitos a diversos impactos ambientais (Plaza et al., 2018), a ação antrópica atua diretamente quando acelera e/ou desacelera alguns processos pedogenéticos específicos, tais como erosão, elutriação, salinização e sodificação, em que a atuação em conjunto ou separadamente desses processos podem proporcionar perdas de matéria orgânica, ablação dos horizontes superficiais, assoreamento e eutrofização de corpos hídricos. As ações antrópicas também podem acelerar a dispersão de argilas e afetar de forma negativa a condutividade hidráulica dos horizontes superficiais, isso provocará um aumento na susceptibilidade dos solos a erosão e tornará as áreas ainda mais vulneráveis a desertificação (Macedo et al., 2021).

Nesse contexto, em uma grande área da região semiárida, os solos não absorvem totalmente a água, mesmo se as chuvas ocorrerem de forma concentrada, essa característica deve-se a alguns destes solos possuírem um horizonte subsuperficial que acumula argila em subsuperfície, proporcionando uma baixa condutividade hidráulica do solo e limitação na

infiltração da água. A grande maioria dos solos ocorrentes nas áreas susceptíveis a desertificação ou fortemente desertificadas apresentam elevada vulnerabilidade aos processos erosivos. Um dos principais atributos que contribuem para essas evidências é a ocorrência de mudança textural abrupta, em grande parte oriunda de processos pedogenéticos. Nos Planossolos, que ocorrem em geral em áreas mais rebaixadas e possuem elevados teores de argila dispersa em água e maiores teores de silte, a mudança textural abrupta contribui para perdas consideráveis de solos por erosão (Macedo et al., 2021).

1.3 Desertificação

De acordo com a Convenção das Nações Unidas para o Combate à Desertificação (UNCCD) ao menos 12 milhões de hectares de terra são perdidos todos os anos pelo processo de desertificação. A UNCCD define desertificação como degradação das terras em áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultantes de diversos fatores, incluindo variações climáticas e atividades antrópicas, que prejudicam o desenvolvimento sustentável, ambiental e sócio econômico global (Sun et al., 2019).

No Brasil, a maior parte das Áreas Suscetíveis à Desertificação (ASD) se encontra nas regiões semiáridas e subúmidas secas do Nordeste, com índices de aridez variando de 0,21-0,50 e 0,51-0,65, respectivamente (CGEE, 2016). Após cinco séculos de ocupação desordenada, os solos da região semiárida do Brasil vêm sendo degradados pela intensa exploração dos recursos naturais aliada à alta suscetibilidade à erosão dos solos (Tomasella et al., 2018). As áreas em que a desertificação é mais acentuada são denominadas de núcleos de desertificação, definidos como áreas onde houve a supressão irreversível da cobertura vegetal, tornando-se desertos dentro dos ecossistemas e sistemas produtivos (Vasconcelos Sobrinho, 1974). Atualmente são reconhecidas como núcleos de desertificação as áreas com sinais extremos de degradação em Gilbués (Piauí), Irauçuba (Ceará), Seridó (limite entre os Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte) e Cabrobó (Pernambuco) (Brasil, 2002).

No semiárido, os processos de desertificação são causados e/ou acelerados por fatores antropogênicos e naturais (Macedo et al., 2021), porém a degradação induzida pelo homem está principalmente enraizada no desmatamento e no manejo inadequado do solo com sistemas de corte e queima, sobrepastoreio e extração intensiva de lenha (Menezes et al., 2012), sendo que as atividades induzidas pelo homem possuem uma participação significativa no processo de desertificação nessas áreas (Jiang et al., 2019). Vulnerabilidade dos solos,

ocorrência de processos erosivos, substrato rochoso impermeável e baixa capacidade de resiliência dos sistemas ambientais também têm sido apontados como causas do avanço do fenômeno da desertificação nesses locais (Perez-Marin, 2012; CGEE, 2016; Macedo et al., 2021)

Como consequência da desertificação pode-se citar a ablação de horizontes superficiais, encrostamentos superficiais, redução da disponibilidade hídrica, redução da agregação e redução da fertilidade do solo, perda da biodiversidade, estabelecimento do processo de salinização e, por conseguinte, o agravamento dos problemas sociais (Sampaio et al., 2008; CGEE, 2016). Importante também salientar que a desertificação pode acarreta na redução do estoque de carbono orgânico total do solo (COT), reduzindo sobremaneira a qualidade dos solos e os serviços ecossistêmicos por ele prestados.

1.4 Serviços ecossistêmicos do solo (SES)

Um dos fatores que contribui, direta e indiretamente, para a qualidade de vida dos seres humanos são os ecossistemas saudáveis, os quais proporcionam qualidade do capital natural (água, ar, solo, fauna e flora) (Parron et al., 2015). Uma das primeiras definições de Serviços Ecossistêmicos (SE) os descreve como bens, serviços e produtos prestados pelos ecossistemas e que contribuem para o bem-estar humano (Daily, 2000). Ainda, a *Millennium Ecosystem Assessment* - MEA (2005) definiu Serviços Ecossistêmicos como sendo um conjunto de benefícios prestado pelos ecossistemas, os quais são obtidos pelos seres humanos.

Além de base para a vida e de ser responsável pela regulação de diversos processos biogeoquímicos, o solo desempenha uma grande variedade de funções no ambiente que são essenciais para a manutenção da vida, tais como: ciclagem de nutrientes, estoque de carbono, contribuindo para a regulação climática, entre outros. Por outro lado, o termo “qualidade do solo” se refere à capacidade do solo de ter um bom funcionamento para desempenhar todas essas funções (Bünemann et al., 2018).

O MEA classifica os SE nas categorias provisão, regulação, suporte e cultural. Em relação aos solos, estes podem prover os SE de regulação do ciclo hidrológico, efeito tampão, suporte físico para o crescimento das plantas, retenção e posterior disponibilidade de nutrientes para as plantas, depósito de materiais orgânicos, que está relacionado diretamente com o estoque de carbono, renovação da fertilidade do solo a partir da ciclagem de nutrientes e a regulação dos ciclos dos principais elementos químicos (MEA, 2005).

Diante do exposto, a degradação dos solos e a instauração da desertificação podem acarretar em considerável declínio nas funções prestadas pelo solo. Tais processos podem afetar sobremaneira a capacidade de fornecimento de bens e serviços ecossistêmicos, notadamente em relação às perdas da produtividade agrícola, redução no fornecimento de água, aumento na liberação de gases de efeito estufa, perda da biodiversidade, com graves consequências para o suprimento de fibras, alimentos, água potável (Mcbratney et al., 2014).

1.5 Luvisolos

Os Luvisolos são constituídos por material mineral e apresentam horizonte B textural com argila de atividade alta aliada à alta saturação por bases na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) conforme SiBCS (Embrapa, 2018). Essa classe de solo representa de 50 a 60 milhões de hectares no mundo, sendo que em regiões tropicais e subtropicais os Luvisolos estão restritos, quase que por completo, a superfícies geomórficas recentes (FAO 2014). No semiárido essa classe ocupa 13% da área, enquanto no estado da Paraíba é a segunda ordem de solo de maior ocorrência, ocupando uma área de 9.839,55 km², representando 17,20 % do território paraibano (Medeiros, 2018).

A ocorrência desses solos está associada principalmente a regiões com restrições hídricas elevadas e prolongados períodos de estiagem, sendo que no Nordeste são bem distribuídos na zona semiárida. Na pediplanície sertaneja ocorrem em altitudes em torno de 250 m, enquanto que no Planalto da Borborema, suas altitudes estão entre 500 e 600 metros (Brasil, 1972; Oliveira et al., 2009). São solos formados em diversas superfícies de pediplanos da zona semiárida e são desenvolvidos de rochas não muito ácidas e, por vezes, básicas de granulação média a fina, como as rochas gnáissicas ricas em minerais ferro-magnesianos (biotita, anfibólio e hornblenda) do Pré-Cambriano (Brasil, 1972; Araújo Filho, et al 2000; Oliveira et al., 2008).

Apresentam uma boa aptidão agrícola e têm como principais potencialidades elevado teor de nutrientes disponíveis às plantas – cálcio, magnésio e potássio – provenientes de uma grande quantidade de minerais facilmente intemperizáveis ricos nessas bases trocáveis (Cunha et al., 2008; Resende et al., 2019). Por outro lado, esses solos apresentam limitações relacionadas à restrição, à mecanização devido à elevada pedregosidade presentes tanto na camada superficial, ambiente esse característico das regiões áridas e semiáridas, (Resende et

al., 2019), normalmente esses solos são encontrados em associações com Planossolos, Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos.

A hidrólise parcial é o processo atuante nesses solos, sendo responsável pela bissialitização que é rota que predomina durante o intemperismo dos solos na região semiárida. Esse processo é responsável pela formação das argilas expansivas e de alta atividade, aumentando consideravelmente a CTC desses solos. Estudos têm mostrado que a monossialitização também é atuante nesses solos. Tal fato é evidente nos Luvisolos sob diferentes gradientes pluviométricos no semiárido paraibano e em outras regiões do semiárido nordestino pela presença na fração argila de caulinita, esmectita, vermiculita, nontronita, beidelita, ilita e interstratificados de mica com vermiculita (Barbosa et al., 2020; Saraiva et al., 2020; Câmara et al., 2021). Na fração areia e silte desses solos predomina quartzo, plagioclásio, ortoclásio, muscovita, biotita e anfibólio (Santos et al., 2017).

1.6 Planossolos

Os Planossolos são solos constituídos por material mineral com horizonte A ou E seguido do B plânico, localizando-se preferencialmente em áreas de relevo plano ou suave ondulado conforme SiBCS (EMBRAPA, 2018). Sua ocorrência no mundo cobre cerca de 135 milhões de hectares, sendo que 40% encontram-se na América Latina (Brasil, Paraguai e Argentina), também são encontrados na África, no leste dos Estados Unidos, no Sudoeste Asiático e na Austrália (FAO, 2014). Os Planossolos ocupam extensas áreas do Brasil, tais como na região Nordeste, onde são expressivos, Pantanal, Rio Grande do Sul e Rio de Janeiro (IBGE, 2007).

No Pantanal e no Rio Grande do Sul estão associados às condições de hidromorfismo, sendo predominantemente explorados com arroz irrigado e pastagens. Apesar de apresentarem limitação de drenagem e geralmente ocorrerem nas posições mais baixas do terreno, os Planossolos da região Nordeste geralmente não sofrem influência de condições hidromórficas e são basicamente utilizadas para a produção de pastagens utilizadas na alimentação de bovinos e caprinos (Brasil 1972; 1996; Resende et al., 2019).

Na Paraíba, os Planossolos abrangem uma extensão de aproximadamente 5.929,18 km², o que equivale a uma área de 10,36% da superfície do estado (Medeiros, 2018), enquanto que no cariri paraibano abrange uma extensão de aproximadamente 343,2 km², equivalente a uma área total de 3,1% (Souza et al., 2009).

Os altos valores de soma e saturação por bases e a presença de minerais facilmente intemperizáveis imprimem a esses solos importante capacidade nutricional para as plantas; porém apresentam fortes limitações para o uso agrícola decorrentes de suas propriedades físicas. Seu horizonte diagnóstico apresenta características pouco favoráveis para o desenvolvimento das raízes como, p. ex., horizonte plânico extremamente duro quando seco e muito plástico e pegajoso quando molhado, acarreta em limitações de drenagem e aprofundamento das raízes, bem como dificulta a utilização de maquinários para o preparo do terreno, as quais se tonam mais limitantes quando o horizonte Bt encontra-se próximo à superfície (Brasil., 1972; EMBRAPA, 2018).

Materiais de origem mais ricos em feldspato e biotita favorecem a formação de Planossolos com altos teores de argila, visto que a dissolução desses minerais primários se torna um fator fundamental para a formação de argila *in situ* (argilização) e gênese do horizonte Bt (Sousa et al., 2020). O processo de formação de argila *in situ* também contribui com a mudança textural abrupta deste solo, tornando-os mais susceptíveis aos processos erosivos, o que leva a perda do horizonte superficial, uma vez que o arraste do material em superfície é favorecido pela menor permeabilidade do horizonte Bt o qual impede e/ou diminui a infiltração de água favorecendo tais eventos (Sousa et al., 2020; Macedo et al., 2021).

Dado a formação a partir de diversos materiais de origem, os Planossolos apresentam mineralogia diversificada, ocorrendo solos desde essencialmente caulínico até aqueles com considerável contribuição de esmectítica, sempre apresentando baixos teores de ferro livre relacionados às condições de formação (Oliveira, 2008; Sousa et al., 2020; Câmara et al., 2021). Sob condições semiáridas, a ocorrência de elevada quantidade de minerais 2:1 expansivos ou não e/ou intraestratificados de caulinita e minerais 2:1 está associada à deficiência hídrica e à reduzida drenagem, favorecendo a hidrólise parcial e consequentemente a rota da bissialitização (Corrêa et al., 2003).

Quartzo, feldspatos, anfibólio e biotita foram os principais minerais encontrados na fração areia grossa dos Planossolos (Sousa, 2015). Já Saraiva et al. (2020), estudando os Planossolos ao longo de um gradiente pluviométrico no semiárido brasileiro, encontrou na fração argila de Planossolos, sob condições muito seca, a presença de interestratificados com ilita + esmectita, esmectita, ilita, caulinita, quartzo e feldspato.

1.7 Carbono e nitrogênio

O carbono é um dos elementos químicos essenciais para a vida na terra, pois é constituinte estrutural de uma grande quantidade de compostos químicos essenciais, tais como proteínas, carboidratos, lipídeos e pigmentos (Souza et al., 2012). O ciclo do nitrogênio no solo é muito complexo e sofre influência de fatores químicos, físicos e biológicos. No sistema solo-planta, a entrada de nitrogênio pode se dar por deposições atmosféricas, adubação e fixação biológica e podendo ser perdido por lixiviação, volatilização e remoção pelas culturas (Menezes et al., 2012).

Em ecossistemas semiáridos, a disponibilidade de recursos naturais como água, biomassa vegetal, serapilheira, nutrientes do solo e carbono são fortemente influenciadas pela precipitação, já que durante os períodos de chuvas abundantes ocorre uma maior disponibilidade de nutrientes no solo, o que resulta em uma absorção mais rápida e eficiente pela vegetação, proporcionando um aumento no desenvolvimento foliar. Já em períodos de escassez de chuva ocorre a redução na área foliar ocasionada pelas perdas das folhas na estação seca, afetando diretamente a dinâmica do carbono nesse ambiente e reduzindo a sua absorção ao mínimo (Campos et al., 2019; Mendes et al., 2020)

Assim como o carbono, para que os diversos ecossistemas funcionem, a presença do nitrogênio é essencial, tendo em vista sua participação na composição de diversos compostos importantes para a vida. No solo, o grande estoque de nitrogênio ocorre na forma orgânica, apresentando-se em diferentes níveis de recalcitrância (Canterella, 2007).

A matéria orgânica é uma componente chave do solo, pois ela exerce influência na estrutura, na estabilidade de agregados, na disponibilidade de nutrientes, na retenção de água, na resiliência e é fonte de energia e nutrientes para a biomassa microbiana (Brogniez et al., 2015). Por meio dessas propriedades, os solos são capazes de fornecer numerosos serviços ecossistêmicos dos quais se destacam a produção de alimentos e a prevenção da degradação ambiental (Keith et al., 2015).

O carbono estocado no solo é afetado pelo clima, por mudanças no uso da terra, pelo tipo de solo e pela rapidez que os microrganismos o utilizam como fonte de energia (Schulz et al., 2016; Minasny et al., 2017). Os fatores que influenciam os estoques de carbono e nitrogênio nos solos são clima, cobertura vegetal, tipo de manejo e textura do solo. Os solos possuem características intrínsecas que permitem diferentes capacidades de armazenamento

desses elementos, sendo observados em geral maiores teores de COT e N nos solos mais profundos e com maiores teores de argila e silte (Lal et al., 2015).

Sistemas de cortes, queimas e extração de lenha no semiárido brasileiro contribuem para a supressão da vegetação de Caatinga e, conseqüentemente, para as perdas de carbono e nitrogênio. Esses fatores, aliados à erosão do solo, contribuem para o estabelecimento do processo de degradação e redução da sua fertilidade. Destaca-se, ainda, a ação do fogo que leva a perda gradual de aproximadamente 100% do carbono e do nitrogênio que estão contidos na biomassa queimada (Menezes et al., 2012).

Mudanças no uso do solo são capazes de converter sistemas naturais em sistemas agrícolas, promovendo normalmente a diminuição dos teores de matéria orgânica em decorrência das alterações dos ciclos biogeoquímicos, intensificando a emissão de gases de efeito estufa, principalmente CO₂ (Fraga & Salcedo 2004). Assim, a soma dessas atividades acarreta no aumento das perdas de solos por processos erosivos, na rápida decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) e na oxidação do carbônico orgânico, alterando o ciclo do carbono e o ciclo do nitrogênio - elementos importantes para a manutenção da dinâmica dos ecossistemas (Giongo et al., 2011).

Nesse sentido, quantificar os estoques de carbono e nitrogênio nos solos do semiárido brasileiro e compreender os impactos causados pelas mudanças no uso da terra é de suma importância para o melhor dimensionamento dos estoques globais e nacionais, bem como, para o planejamento estratégico de manutenção e/ou aumento dos estoques desses elementos nos solos.

1.8 Geoestatística e variabilidade espacial do solo

A geoestatística surgiu por volta de 1950 com o engenheiro Daniel Krige, o qual buscava estimar os teores de ouro em uma mina na África do Sul com a finalidade de aumentar a eficiência e melhorar o planejamento na sua exploração. Krige concluiu que para explicar a variância dos teores obtidos seria necessário considerar a distância entre as amostras (Landim, 2006). Anos depois dessa descoberta, essa técnica começou a ser difundida na área da ciência do solo (Vieira, 2000).

Os solos não são formados de maneira homogênea e a sua formação é condicionada a uma variabilidade tanto no tempo quanto no espaço (Berner et al., 2007). A variabilidade dos

atributos do solo tem relação direta com os seus fatores de formação, processos pedogenéticos e sua posição na paisagem, sendo influenciadas pela dinâmica da água (Bukak et al., 2012). A geoestatística aliada à krigagem tornou-se uma ferramenta poderosa para avaliar a variabilidade dos atributos do solo (Vieira et al., 2002). A krigagem permite a representação quantitativa da variação de um fenômeno regionalizado no espaço a partir da interpolação de dados para pontos não amostrados sem tendência (Huijbregts, 1975).

Por meio da geoestatística é possível fazer a organização de dados obtidos com sua respectiva posição geográfica, a partir da semelhança entre vizinho georreferenciados (Grego et al., 2014). Em outras palavras, a inferência da continuidade espacial pode ser feita tendo como base a estatística entre dois pontos, sendo o semivariograma a ferramenta utilizada para medir essa variabilidade (Yamamoto; Landim, 2013).

Por meio do ajuste de semivariogramas é possível analisar o grau de dependência espacial de uma variável a partir de pontos amostrais de acordo com a seguinte equação (Vieira, 2000):

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{n(\mathbf{h})} [Z_{(xi+h)} - Z_{(xi)}]^2$$

(equação 01)

Em que:

y (h) – semivariância entre os pares de valores medidos para determinada distância h;

h – distância entre os valores medidos;

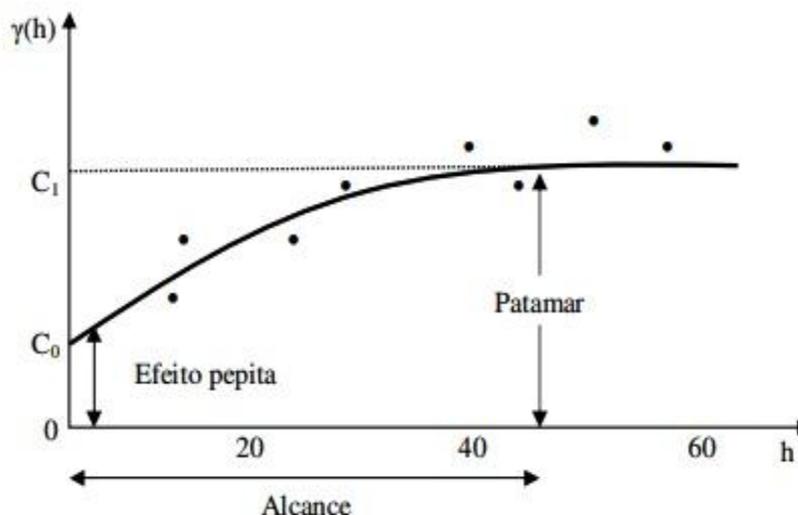
N (h) – número de pares experimentais de observações Z(xi) e Z (xi + h);

Z – valor do atributo;

x_i – posição de determinado atributo

O semivariograma é representado pelo gráfico $\gamma(h)$ versus h. Os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma são o efeito pepita (C0), patamar (C0+C1) e o alcance (a).

Figura 1 - Modelo esquemático de um semivariograma e seus parâmetros.



O grau de dependência espacial é obtido por meio da relação do efeito pepita com o patamar, sendo classificada como fraca quando $> 75\%$, moderada entre 25 a 75% e forte $< 25\%$ (Cambardela et al., 1994). Ocorrendo a dependência espacial e utilizando o método da krigagem é possível estimar os valores para os locais não amostrados, pois a krigagem é um método que usa um estimador de interpolação linear imparcial com uma variância mínima, garantindo uma estimativa mais precisa dos dados (Vieira, 2000).

Dessa forma, os modelos de semivariograma obtidos geram uma superfície contínua expressa a partir do desenvolvimento de mapas de isolinhas aliada à técnica da krigagem ordinária, que por sua vez realiza a interpolação de dados e, conseqüentemente, gera valores para pontos não amostrados sem tendência (Yamamoto, Landim, 2013). Diversos estudos utilizando a geoestatística foram realizados para avaliar a variabilidade dos atributos do solo, (Tao et al., 2018; Sun et al., 2019; Gubra et al., 2020; Mesquita et al., 2020).

Dessa forma, a geoestatística identifica, na região amostrada, características e necessidades que requerem manejos diferenciados (Vieira et al., 2002). Logo, é possível avaliar as respostas dos atributos do solo, as práticas de manejo adotadas e qualquer outro processo que acarrete na redução da qualidade do solo e na sua capacidade de fornecimento dos serviços ecossistêmicos (Ribeiro et al., 2016).

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L., SENTELHAS; P.C., GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. KÖPPEN'S climate classification map for Brazil. *Meteorologisc e eitsc rift* Vol. 22, No. 6, p711–728, 2013.
- ALTHOFF, TIAGO DINIZ et al. Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality, Northeast Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 360, p. 367-375, 2016.
- ANTONINO, ANTONIO CELSO DANTAS et al. Balanço hídrico em solo com cultivos de subsistência no semi-árido do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 29-34, 2000.
- BARBOSA, W. R.; ROMERO, R. E.; SOUZA JÚNIOR, V. S. de; COOPER, M.; SARTOR, L. R.; PARTITI, C. S. de M.; JORGE, F. de O.; COHEN, R.; JESUS, S. L. de; FERREIRA, T. O. Effects of slope orientation on pedogenesis of altimontane soils from the Brazilian semi-arid region (Baturité massif, Ceará). **Environmental Earth Science**, v. 73, p. 3731-3743 2014
- BROGNIEZ D. et al. 2015. A map of the topsoil organic carbon content of Europe generated by a generalized additive model. **European Journal of Soil Science** 66:121–134.
- BUKAK, D. L.; PASSOS, R. B.; ANDRADE, F. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob cafeeiro Conilon: relação com textura, matéria orgânica e relevo. *Bragantia*, v. 71, p. 538-547, 2012.
- DE ARAÚJO FILHO, J. C. et al. Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do Estado de Pernambuco. **Embrapa Solos-Séries** anteriores (INFOTECA-E), 2000.
- DOS SANTOS, J. C. B., LE PERA, E., DE SOUZA JÚNIOR, V. S., CORRÊA, M. M., & DE AZEVEDO, A. C. Gneiss saprolite weathering and soil genesis along an east-west regolith sequence (NE Brazil). **Catena**, v. 150, p. 279-290, 2017.
- BERNER, P. G. M. et al. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um Cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 837-844, 2007.
- 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 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.
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A. (1994). Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58:1501-1511pp.
- CAMPOS, S., MENDES, K. R., DA SILVA, L. L., MUTTI, P. R., MEDEIROS, S. S., AMORIM, L. B., ... & BEZERRA, B. G. Closure and partitioning of the energy balance in a preserved area of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 271, p. 398-412, 2019.

CANTARELLA, H. NITROGÊNIO. IN: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, p. 375-470, 2007.

CGEE-CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil**. 2016.

CHERLET, M., HUTCHINSON, C., REYNOLDS, J., HILL, J., SOMMER, S., VON MALTITZ, G. (Eds.), **World Atlas of Desertification**, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2018.

CORRÊA, MARCELO METRI et al. Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das várzeas de Sousa (PB). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 311-324, 2003.

CUNHA, T. J. F.; SILVA, F. H. B. DA; SILVA, M. S. L. DA; PETRERE, V. G.; SÁ, I. B.; OLIVEIRA NETO, M. B. DE CALVALCANTI, A.C. Solos do Submédio do Vale do São Francisco: potencialidades e limitações para uso agrícola. Petrolina: **Embrapa Semiárido**, 2008.

DAILY, G. C.; SÖDERQVIST, T.; ANIYAR, S.; ARROW, K.; DASGUPTA, P.; EHRLICH, P. R.; FOLKE, C.; JANSSON, A. M.; JANSSON, B-O.; KAUTSKY, N.; LEVIN, S.; LUBCHENCO, J.; MÄLER, K-G.; SIMPSON, D.; STARRETT, D.; TILMAN, D.; WALKER, B. The value of nature and nature of value. **Science**, v. 289, n. 5478, p. 395-396, 2000.

DAVIES, J., BARCHIESI, S., OGALI, C.J., WELLING, R., DALTON, J., AND P. LABAN (2016). Water in drylands: Adapting to scarcity through integrated management. **Gland, Switzerland**: IUCN. 44pp.

DE SOUSA, J. E. S., DOS SANTOS, J. C. B., CORRÊA, M. M., DO NASCIMENTO, A. F., SCHULZE, S. M. B. B., FERREIRA, T. O., ... & DE SOUZA JÚNIOR, V. S. Mineralogy and genesis of Planosols under a semi-arid climate, Borborema Plateau, NE Brazil. **Catena**, v. 184, p. 104260, 2020.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2018). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed. Brasília. 590p.

FRAGA V.S. & SALCEDO I.H. 2004. Declines of Organic Nutrient Pools in Tropical Semi-Arid Soils under Subsistence Farming. *Soil Science Society of America Journal* 68:215-224.

FAO. IUSS Working Group WRB. 2014. World reference base for soil resources. **World Soil Resources Reports** N°. 106. FAO, Roma. 2014.

GIONGO, V., CUNHA, T. J. F., MENDES, A. M. S., & GAVA, C. A. T. Carbono no sistema solo-planta no Semiárido brasileiro. Embrapa **Semiárido-Artigo** em periódico indexado (ALICE), 2011.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. de; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a agricultura de 68 precisão. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L.H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília: Embrapa, 2014. p.74-83.

BÜNEMANN, E. K., BONGIORNO, G., BAI, Z., CREAMER, R. E., DE DEYN, G., DE GOEDE, R., ... & BRUSSAARD, L. Soil quality—A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105-125, 2018.

GRUBA, PIOTR; MULDER, JAN; PACANOWSKI, PIOTR. Combined effects of soil disturbances and tree positions on spatial variability of soil pH_{CaCl2} under oak and pine stands. **Geoderma**, v. 376, p. 114537, 2020.

HUIJBREGTS, C.J. (1975) Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In.: Davis, J.C.; Mc Cullagh, M.J. (eds). **Display and analysis of spatial data**. New York: John Wiley, p.38-53.

INSA – Instituto Nacional do Semiárido. Agricultura Temporária: **Semiárido brasileiro 2017, 2018**. Disponível em https://portal.insa.gov.br/images/acervo/livros/Tabela%20Agricultura_RESUMO%203.pdf. Acessado em: 09 de fevereiro de 2021.

JACOMINE, P.K.T.; MELO FILHO, H.F.R.; MONTENEGRO, J.O.; RIBEIRO; M.R. & SILVA, A.P. Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado da Paraíba. II. Interpretação para uso agrícola dos solos do Estado da Paraíba. **Embrapa Solos - Séries anteriores (INFOTECA-E)**, 1972.

JIANG, L.; JIAPAER, G.; BAO, A.; KURBAN, A.; GUI, H.; ZHENG, G.; MAEYER, P. Monitoring the long-term desertification process and assessing the relative roles of its drivers in Central Asia. **Ecological Indicators**, v. 104, p. 195-208, 2019.

KEITH A.M. et al. 2015. Monitoring soil natural capital and ecosystem services by using large-scale survey data. Soil Ecosystems Services. Stromberger, M.; Comerford, N. and Lindbo, D. (eds.) **Soil Science Society of America**, WI-USA.

LAL, R., NEGASSA, W., LORENZ, K., 2015. Carbon sequestration in soil. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 15, 79–86

LANDIM, P. M.B. **Sobre Geoestatística e Mapas**, Terra Didática, v, 2, n,1, 19 - 33, 2006.

MACEDO, R. S., BEIRIGO, R. M., MEDEIROS, B. M., FELIX, V. J. L., da Silva Souza, R. F., & de Bakker, A. P. PROCESSOS PEDOGENÉTICOS E SUSCEPTIBILIDADE DOS SOLOS À DEGRADAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. **Caminhos de Geografia**, v. 22, n. 81, p. 176-195, 2021.

MEA. (2005). Millennium Ecosystem Assessment, **Ecosystem and Human Well-being: A Framework for Assessment**. Island Press Washington, DC.

MEDEIROS, BEATRIZ MACÊDO. **Atualização da classificação do mapa de solos da Paraíba**. 2018.

MENDES, K. R., CAMPOS, S., DA SILVA, L. L., MUTTI, P. R., FERREIRA, R. R., MEDEIROS, S. S., ... & E SILVA, C. M. S. Seasonal variation in net ecosystem CO₂ exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-16, 2020.

MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; GIONGO, V.; PÉREZ-MARIN, A. M. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. **Brazilian Journal of Biology**, v.72, p.643- 653, 2012

MESQUITA, GLAUCIA MACHADO; DOS SANTOS, FELIPE CORRÊA VELOSO; CORRECHEL, VLADIA. Efeito do fogo no comportamento e na variabilidade espacial dos atributos químicos do solo sob mata, no jardim botânico, Goiânia-GO. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 91253-91267, 2020.

Mcbratney, A.; Field D.J.; Koch, A. The dimensions of soil security. **Geoderma**, v.213, p.203-213, 2014.

MINASNY, B et al., 2017. Soil carbon 4 per mille. **Geoderma** 292, 59–86.

OLIVEIRA, VA de. **Manual técnico de pedologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.

OLIVEIRA, L. B de; FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, M. R.; KER, J. C. Micromorfologia e gênese de Luvisolos e Planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas no semiárido Brasileiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 2407-2423, 2008.

OLIVEIRA, L. B.; FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, M. R.; KER, J. C. Morfologia e classificação de Luvisolos e Planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas no semiárido do nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 1333-1345, 2009.

PARRON, L.M.; GARCIA, J.R.; OLIVEIRA, E.B. de; BROWN, G.G.; PRADO, R. B. Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica. Colombo: **Embrapa Florestas**; Brasília: Embrapa, 2015.

PEREZ-MARIN, A. M. Núcleos de desertificação no semiárido brasileiro: ocorrência natural ou antrópica? *Parcerias Estratégicas*, v. 17, p. 87-106, 2012.

PLAZA, CÉSAR et al. Soil resources and element stocks in drylands to face global issues. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1-8, 2018.

RESENDE, M; CURI, N; POGGERE, G.C; BARBOSA, J.Z; POZZA, A.A.A. **Pedologia, Água, e Planta**. Editora UFLA, 2019.

RIBEIRO, L, S.; OLIVEIRA, I, R.; DANTAS, J, S.; SILVA, C, V.; SILVA, G, B.; AZEVEDO, J, R, Variabilidade espacial de atributos físicos de solo coeso sob sistemas de manejo convencional e de plantio direto, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v, 51, n, 9, p, 1699-1702, 2016.

SAMPAIO, E. VSB; MARIA DO SOCORRO, B. ARAÚJO; SAMPAIO, YONY SB. Propensão à desertificação no semiárido brasileiro. **Revista de Geografia** (Recife), v. 22, n. 2, p. 59-76, 2008.

Saraiva, S. M.; Fraga, V. S.; Filho, J. C. A.; Santos, R. F.; Felix, E. S.; Carneiro, K. A. A. Mineralogia de luvisolos formados sob gradiente pluviométrico no semiárido Paraibano. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 4, p. 4416-4433, 2020.

SCHULZ, K., VOIGT, K., BEUSCH, C., ALMEIDA-CORTEZ, J.S., KOWARIK, I., WALZ, A., CIERJACKS, A., 2016. Grazing deteriorates the soil carbon stocks of Caatinga forest ecosystems in Brazil. *For. Ecol. Manag.* 367, 62–70.

SOUSA, A. B.; COSTA, C.T.; FIRMINO, P.R.A.; BATISTA, V.S. Tecnologias sociais de convivência com o Semiárido na região do Cariri cearense. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 34, n. 2, p. 197-220, 2017.

SOUZA, B. I.; SUERTEGARAY, D. M. A.; DE LIMA, E. R. V. **Desertificação e seus efeitos na vegetação e solos do cariri paraibano**, v. 8, n. 16, p. 217 a 232-217 a 232, 2009.SOUZA, M. F. L.; LONGHINI, C. M.; SILVA, A. M.; LENTINI, C. A. D. Ciclo do carbono: processos biogeoquímicos, físicos e interações entre compartimentos na Baía de Todos os Santos. **Revista Virtual Química**, vol. 4, n. 5, p. 566-582, 2012.

SUN, J.; HOU, G.; LIU, M.; FU, G.; ZHAN, T.; ZHOU, H.; TSUNEKAWA, A.; HAREGEWEYN, N. Effects of climatic and grazing changes on desertification of alpine grasslands, Northern Tibet. **Ecological Indicators**, v. 107, p.105-647, 2019.

TAO, DAVID LONGPANI; SINGH, NAOREM JANAKI; GOSWAMI, CHANDAN. Spatial variability of soil organic carbon and available nutrients under different topography and land uses in Meghalaya, India. **International Journal of Plant and Soil Science**, v. 21, n. 4, p. 1-16, 2018.

TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M. S. P.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; SANTANA, M. O.; SESTINI, M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000-2016. **International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation**, v. 73, p. 197-206, 2018.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, P.F.; Alvarez, V.H.; Schaefer, C.E.G.R. (2000). **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa: SBCS, v.1. p.1-54.

VIEIRA, S. R. et al. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data, In: ALVAREZ, V. V. H. et al. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 1-45, 2002.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: Conceitos e Aplicações**. Oficina de Textos São Paulo, 2013. 215p.

CAPÍTULO I**GÊNESE DE SOLOS EM DUAS SEQUÊNCIAS DE SOLOS NO CARIRI
PARAIBANO**

RESUMO

A intensa exploração dos recursos naturais no cariri paraibano combinada com a alta susceptibilidade, dos solos dessa região, à erosão resultou na degradação de uma vasta área e comprometeu no fornecimento dos diversos serviços ecossistêmicos que os solos são capazes de fornecer. Estudos com enfoque nos estoques de carbono e nitrogênio, gênese e descrição dos principais atributos dos solos dessa região, quando comparado a uma área de caatinga preservada, são muito importantes, no entanto raros. O objetivo deste estudo foi determinar e identificar os processos pedogenéticos envolvidos na formação dos solos, avaliando a influência do processo de degradação nos atributos físicos, químicos e quantificar os estoques de carbono e nitrogênio dos solos em uma área de caatinga degradada (CD) e uma de caatinga preservada (CP). Foram selecionados sete perfis P1, P2, P3 e P4 na área de CP e P5, P6 e P7 na área de CD e avaliados os atributos físicos, mineralógicos, morfológicos e químicos e calculado os teores e estoques de carbono e nitrogênio das duas áreas estudadas. Os solos da área de CP obtiveram valores de estoques de carbono e nitrogênio bem inferiores aos valores de estoques dos solos da área de CD. Os solos da área de CD apresentaram elevados valores de densidade do solo (Ds) nos horizontes superficiais e a partir da caracterização morfológica foi detectada estrutura do tipo laminar no horizonte superficial desses solos e possível contribuição do processo de formação de argila na gênese dos horizontes Bt dos solos das duas áreas. Os solos situados na CP se mostraram eficientes na prestação de diversos serviços ecossistêmicos (SE), enquanto os solos situados na CD não apresentaram o mesmo comportamento. Pelo contrário, a degradação da área fez com que esses solos passassem a prestar diversos desserviços ao ambiente.

Palavras-Chave: Semiárido; serviços ecossistêmicos; processos pedogenéticos; estoques de carbono e nitrogênio.

ABSTRACT

The intense exploitation of natural resources in Cariri, Paraíba, combined with the high susceptibility of soils in this region to erosion, resulted in the degradation of a vast area and compromised the provision of the diverse ecosystem services that the soils are capable of providing. Studies focusing on carbon and nitrogen stocks, genesis and description of the main attributes of soils in this region, when compared to a preserved caatinga area are very important, however rare. The objective of this study was to determine and identify the pedogenetic processes involved in soil formation, evaluating the influence of the degradation process on physical and chemical attributes and quantifying soil carbon and nitrogen stocks in an area of degraded caatinga (DC) and a of preserved caatinga (PC). Seven profiles P1, P2, P3 and P4 were selected in the PC area and P5, P6 and P7 in the DC area and the physical, mineralogical, morphological and chemical attributes were evaluated and the carbon and nitrogen contents and stocks of the two studied areas were evaluated. The soils in the DC area had values of carbon and nitrogen stocks much lower than the values of stocks of the soils in the PC area. The soils in the DC area showed high values of soil density (Ds) in the surface horizons and from the morphological characterization a laminar structure was detected in the surface horizon of these soils and a possible contribution of the clay formation process in the genesis of Bt horizons of the soils of the two areas. Soils located in the PC proved to be efficient in providing several ecosystem services (SE), while the soils located in the DC did not show the same behavior. On the contrary, the degradation of the area caused these soils to provide several disservices to the environment.

Keywords: Semiarid; ecosystem services; pedogenetic processes; carbon and nitrogen stocks.

1 INTRODUÇÃO

A região semiárida sofreu e vem sofrendo forte pressão antrópica principalmente relacionadas ao uso inadequado e contínuo do solo pela atividade agrícola, à retirada da fitomassa para produção de energia e ao sobrepastoreio (Giongo et al., 2011). Esses fatores foram cruciais para o estabelecimento de processos erosivos, que resultam na degradação dos solos dessas áreas (Giongo et al., 2011). Apesar de o ecossistema semiárido ser adaptado à variabilidade climática e ao estresse hídrico regional, este ecossistema é frágil e pode ser facilmente degradado quando utilizado acima de sua capacidade de suporte (Reynolds et al., 2007).

O cariri paraibano é uma das áreas mais degradadas da região semiárida nordestina (CGEE, 2016). Contribui para esse cenário o desmatamento e a atividade pecuária acima da capacidade de suporte da caatinga, somado à ampla ocorrência em relevo suave ondulado de Luvisolos Crômicos com mudança textural abrupta, aumentando a vulnerabilidade desses solos aos processos erosivos (Perez-Marín, 2012; Macedo et al., 2021).

Nessa mesorregião, estão localizados os municípios de São José dos Cordeiros, onde se situa a Fazenda Almas que possui 90% da sua área coberta por florestas e matas (Barbosa et al., 2007) e o município de São João do Cariri, onde está inserida a Estação Experimental de São João do Cariri (EESJC), a qual mais de 75% da sua área é coberta por terras degradadas (Araujo et al., 2020).

São João do Cariri representa uma área com baixa complexidade, uma vez que 75% da sua área encontram-se degradada. Para Araújo et al (2020) em estudo com foco na abordagem nexos, em paisagens distintas e com diferentes complexidades no cariri paraibano, concluiu que a degradação das terras reduz a provisão de serviços ecossistêmicos como a disponibilidade de água subterrânea e a produção de alimentos. Notadamente os serviços de regulação como estocagem de carbono e nitrogênio são também afetados.

O conceito da FAO sobrenexo água-energia-alimento aborda explicitamente as interações entre os sistemas humano e natural, baseando-se na tentativa de equilibrar os diferentes usos dos recursos do ecossistema: energia, água, solo e fatores socioeconômicos (Flammini et al., 2014). A estrutura da paisagem influencia na produção de serviços ecossistêmicos (Duarte et al., 2018), e o cariri paraibano apresenta uma grande variação ambiental devido à diversidade de solos, à topografia e aos diferentes usos de terra. Nesse

sentido, a Fazenda Almas representa uma paisagem com alta complexidade, pois possui 90% da sua área coberta por florestas (Barbosa et al., 2017).

Dada participação na formação das proteínas, carboidratos, lipídeos dentre outros compostos orgânicos, o carbono e nitrogênio são considerados elementos essenciais para a manutenção da vida (Minasny et al., 2017). Quando presente em níveis adequados, a matéria orgânica contribui com diversas funções no solo, além de ser fonte de energia e nutrientes para a biomassa microbiana e para as plantas, estabiliza a estrutura do solo por meio da capacidade de infiltração e armazenamento de água, criando um ambiente adequado para o crescimento das raízes (Brogniez et al. 2015). Por meio dessas propriedades, o solo é capaz de prover diversos serviços ecossistêmicos, entre os quais estão a produção de alimentos e a prevenção da degradação dos solos (Keith et al. 2015).

Quando se trata de semiárido, as pesquisas relacionadas à determinação e aos estoques de C e N no solo, a níveis de horizontes, são incipientes, sendo essas concentradas nas camadas superficiais dos solos. Neves et al (2020) investigando os estoques de C e N em Planossolos de área degradada e área preservada no semiárido brasileiro concluiu que os Planossolos de área degradada tiveram uma redução significativa nos teores de C, enquanto houve uma manutenção nos estoques de N.

Santana et al (2019) quantificando os estoques de C e N das principais classes de solos sob diferentes usos de terras no semiárido pernambucano concluiu que as classes de solos com uso agrícola foram os que obtiveram os menores estoques de C e N e que a conversão de caatinga densa em áreas agrícolas reduziu os estoques de C do solo de 63 para 47 Mg ha⁻¹.

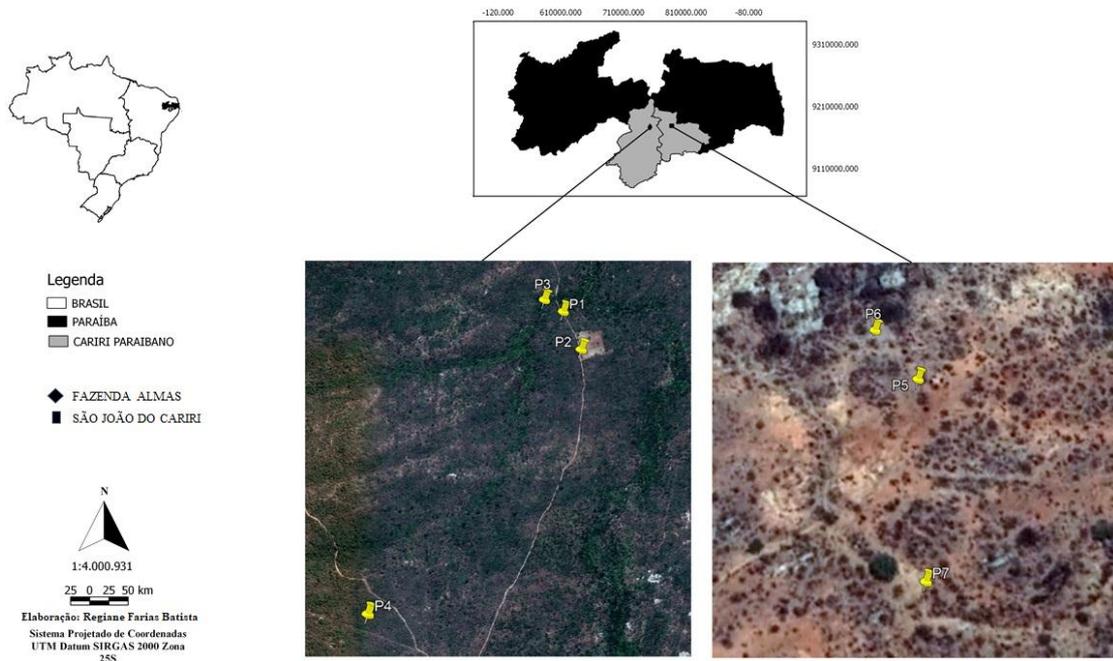
O estudo de caracterização de solos pouco desenvolvidos no cariri paraibano, em dois ecossistemas ambientalmente distintos, pode favorecer com o aumento do nível de informações sobre a evolução destes solos na paisagem, buscando compreender os principais processos pedogenéticos envolvidos em ao longo de sua formação. Ainda, o entendimento da dinâmica destes solos a partir da determinação de seus atributos físicos e químicos pode definir os serviços ecossistêmicos por eles prestados, o que facilita a tomada de decisão quanto às estratégias mais adequadas de uso, à ocupação do solo e à recuperação de áreas degradadas no cariri paraibano.

O objetivo desta pesquisa foi: i) determinar e identificar os processos pedogenéticos envolvidos na formação dos solos; ii) avaliar a influência do processo de degradação nos atributos físicos, químicos e nos estoques de carbono e nitrogênio em duas topossequências de solos em uma área sob caatinga em regeneração e em área degradada com supressão da vegetação.

2 MATERIA E MÉTODOS

2.1 Descrições das áreas

Figura 2 - Mapa do Brasil, estado da Paraíba e localização de São João do Cariri e São José dos Cordeiros no Cariri paraibano.



O trabalho foi desenvolvido na região do cariri Paraibano, em específico nos municípios de São José do Cordeiros/Sumé e em São João do Cariri. Foram avaliados solos em uma área intensamente degradada localizada em São João do Cariri e solos sob mata preservada localizada na Reserva Particular do Patrimônio Nacional (RPPN) no limite entre os municípios de Sumé e São José dos Cordeiros.

A área sob Caatinga preservada localiza-se na Fazenda Almas, ($7^{\circ}28'45''$ S e $36^{\circ}54'18''$ W) (Figura 2), que abrange uma área de aproximadamente 5000 ha, sendo 3500 hectares ocupados pela RPPN. Esta área é conservada há mais de 40 anos (Barbosa et al., 2017) e é a maior RPPN do estado da Paraíba e a quarta maior do Nordeste.

O relevo varia de ondulado a forte ondulado com altitude variando de 580 a 740 m. O clima é do tipo BSh, caracterizado como semiárido quente de baixa latitude e altitude, com precipitação média anual em torno de 553 mm e temperatura média anual próximo a 24°C (Alvares et al. 2013). A vegetação nativa é predominantemente composta por Savana Estépica

(caatinga hiperxerófila), com áreas de floresta caducifólia (floresta seca), com 90% da área coberta por florestas e matas.

A área sob Caatinga degradada fica localizada na Estação Experimental do Centro de Ciências Agrárias da UFPB localizada no município de São João do Cariri (EESC) inserida na região mais seca e árida do Brasil (Figura 3). Possui uma área de 500 hectares, área central do Estado da Paraíba e está inserida na Mesorregião da Borborema e Microrregião do Cariri Oriental, na Superfície Aplainada do Planalto da Borborema entre as coordenadas geográficas 7°22'45,1"S e 36°31'47,2"W.

A altitude varia de 400 a 600 m. A vegetação é em sua maioria composta por Savana Estépica (caatinga hiperxerófila). De acordo com a classificação de Köppen, o clima é do tipo BSh-semiárido quente com chuvas de verão. A precipitação média é de 400 mm/ano. Apresenta um relevo suave ondulado (Paes-Silva et al., 2003). Ao contrário da RPPN, representa uma paisagem de baixa complexidade, já que 75% da área é coberta por terras degradadas tornando-a parte de um Núcleo de Desertificação (Travassos e Souza, 2014; Araujo et al., 2021). A geologia, em ambas as áreas, data do pré-cambriano. A litologia é cristalina, com ocorrência predominante de granito e gnaisse (Santos et al., 2002).

2.2 Seleção das áreas de estudo, descrição e amostragem dos solos

Foram estudados quatro perfis na toposequência de solos na RPPN da Fazenda Almas (AP), a saber: (P1, P2) Luvisolos Crômicos; (P3) Planossolo Nátrico; (P4) Neossolo Regolítico. Na EESJC (AD), foram selecionados Luvisolos Crômicos (P5 e P7) e Planossolo Nátrico (P6).

Figura 3 - Perfis de uma sequência de solos sob caatinga preservada (CP) em São José dos Cordeiros no estado da Paraíba, Brasil. a) P1 - LUVISSOLO CRÔMICO; b) P2 - PLANOSSOLO NÁTRICO; c) P3 - LUVISSOLO CRÔMICO; D) P4 - NEOSSOLO REGOLÍTICO.

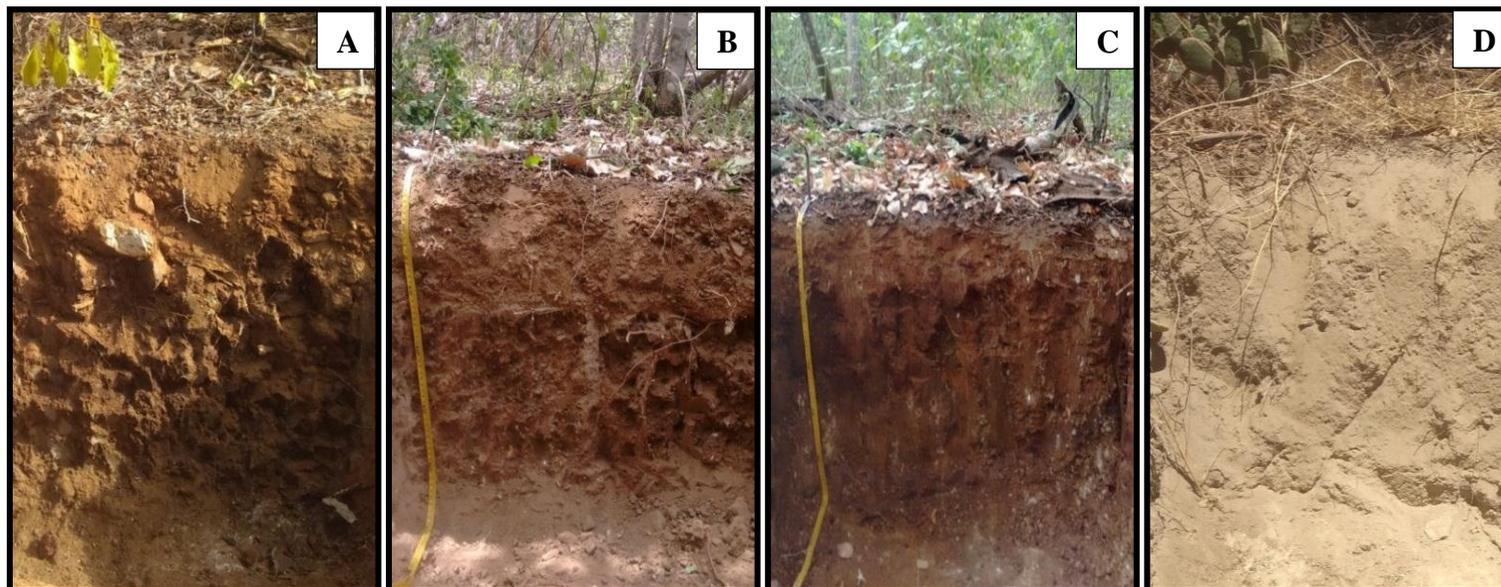


Figura 4 - Perfis de uma sequência de solos sob área degradada (AD) em São João do Cariri no estado da Paraíba, Brasil. e) P5 - LUVISSOLO CRÔMICO; f) P6 - PLANOSSOLO NÁTRICO; g) P7 - LUVISSOLO CRÔMICO.

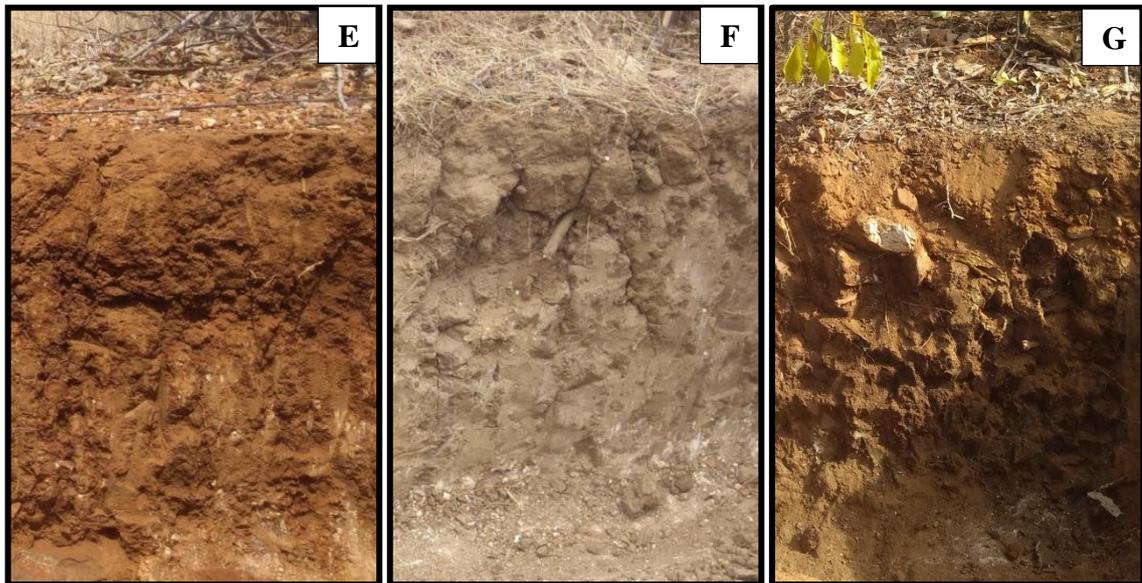


Tabela 1 - Georreferenciamento dos perfis estudados nos municípios de São José dos Cordeiros (Toposequência em Caatinga preservada) (P1 ao P4) e São João do Cariri (Toposequência em Caatinga degradada) (P5 ao P7).

PERFIL	CLASSIFICAÇÃO	COORDENADAS	ALTITUDE (m)
P1	Luvissole Crômico	07° 26' 44.8" S / 36° 53' 36.2" W	575
P2	Planossolo Nátrico	07° 26' 50.4" S / 36° 53' 33.8" W	579
P3	Luvissole Crômico	07° 26' 43.0" S / 36° 53' 38.8" W	574
P4	Neossolo Regolítico	07° 27' 26.3" S / 36° 54' 01.4" W	602
P5	Luvissole Crômico	07° 22' 17.8" S / 36° 31' 32.9" W	472
P6	Planossolo Nátrico	07° 22' 17.1" S / 36° 31' 33.5" W	474
P7	Luvissole Crômico	07° 22' 20.4" S / 36° 31' 32.8" W	470

Os solos foram amostrados e descritos morfológicamente de acordo com Santos et al. (2015) e classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solos (EMBRAPA, 2018). Amostras deformadas foram coletadas para realização das análises físicas e químicas, enquanto que amostras em torrões (amostras indeformadas) foram utilizadas para determinação da densidade do solo. As análises foram realizadas no Departamento de Solos e Engenharia Rural (DSER) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) Campus II – Areia/PB e no Instituto Nacional do Semiárido (INSA) em Campina Grande/PB.

As amostras foram destorroadas e passadas em peneiras de 2 mm para obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA). As análises físicas e químicas foram realizadas conforme normas constantes no Manual de Métodos de Análises de solo (EMBRAPA, 2017). Também foram coletados torrões (amostras indeformadas) para a determinação da densidade do solo e amostras dos materiais de origem.

2.3 Análises dos atributos dos solos

2.3.1 Análises físicas

A análise granulométrica foi realizada após agitação mecânica e dispersão química com solução NaOH 0,1 mol L⁻¹. A argila dispersa em água (ADA) foi realizada por meio de agitação mecânica com água destilada utilizada como dispersante. O teor de argila foi determinada pelo método da pipeta. De posse desses resultados, foi calculado o grau de flocculação conforme equação abaixo:

$$GF (\%) = [(At - ADA)/At] * 100$$

Em que: GF = grau de flocculação (%); At = Argila total (g kg⁻¹); ADA = Argila dispersa em água (g kg⁻¹).

A densidade de partículas (pp) foi determinada pelo método do balão volumétrico, utilizando álcool como líquido penetrante. A densidade do solo (ps) foi determinada pelo método do torrão parafinado. A partir dos dados de pp e ps foi calculado o volume total de poros (VTP), segundo a expressão:

$$VTP = [1 - (\rho_s / \rho_p)]$$

Em que: VTP = volume total de poros (m³ m⁻³); ρ_s = densidade do solo (g cm⁻³); ρ_p = densidade de partículas (Mg m⁻³).

2.3.2 Análises químicas

As análises químicas foram realizadas conforme Embrapa (2018). O pH foi determinado em água e em solução de KCl 1 mol L⁻¹ na proporção 1:2,5. A condutividade elétrica (CE) foi determinada em uma proporção 1:2,5. As bases Ca²⁺ e Mg²⁺ foram extraídos com solução KCl 1 mol⁻¹ e quantificados por titulometria. P, Na⁺ e K⁺ foram extraídos com a solução de Mehlich-1 (HCl 0,05 molL⁻¹ + H₂SO₄ 0,025 molL⁻¹). P foi determinado por colorimetria, enquanto Na⁺ e K⁺ foram determinados por fotômetro de chama. A acidez

potencial (H+Al) foi extraída com solução de acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0 e quantificada por titulometria com solução NaOH 0,025 mol L⁻¹. O carbono orgânico total (COT) foi determinado por oxidação via úmida utilizando o dicromato de potássio 0,1667 mol/L⁻¹ em meio sulfúrico e submissão das amostras a uma fonte externa de calor para extração e determinação pela titulação do excesso de dicromato de potássio com solução de sulfato ferroso amoniacal 0,1 mol/L⁻¹ (Yeomans & Bremner, 1988). O nitrogênio total (NT) foi determinado pelo método de Kjeldahl após a extração em câmara de difusão com solução sulfúrica.

A partir dos resultados obtidos, foram calculados: soma de bases (SB) pelo somatório de Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Na⁺; a capacidade de troca de cátions (CTC) pelo somatório entre a soma de bases (SB) + acidez potencial (Al³⁺+H⁺); a saturação por bases (V%) calculada pela relação entre SB e a capacidade de troca de cátions a pH 7,0 e a percentagem de saturação por sódio (PST%) pela divisão do Na⁺ pela CTC.

2.3.3 Análises mineralógicas

A matéria orgânica das amostras foi eliminada com peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e o ferro foi eliminado com ditionito-citrato de sódio-bicarbonato de sódio - DCB (Mehra & Jackson, 1960). A fração areia foi separada por peneiramento e a fração argila por sedimentação (Jackson, 2005). Foram utilizadas laminas em pó para a identificação dos minerais constituintes da fração areia. Foram utilizadas lâminas orientadas e identificadas, em que a fração argila foi montada após os seguintes pré-tratamentos: Mg²⁺ em temperatura ambiente (25°C) e Mg²⁺ solvatada com glicerol para determinação de minerais do grupo das esmectitas. Os minerais foram submetidos à difração de raio-X no difratômetro D-2 Phaser, de acordo com os seguintes parâmetros de ajuste de equipagem: fenda de 1,0 mm, intervalo angular (2θ) de 3 – 40° (argila) e 5 – 70° (areia e silte), tempo de 2,0 s, passo de 0.0125, “anti-scatter slit”, “faca” de 1,0 mm e abertura de detector de 3,0° (99 canais). O software EVA do D-2 Phaser foi utilizado para a identificação das fases dos minerais.

2.3.4 Estoques de carbono e nitrogênio

Os estoques de COT e NT foram calculados segundo a expressão (Patton et al., 2019).

$$\text{Estoque de C ou N (Mg ha}^{-1}\text{)} = C_{\text{con}} \text{ ou } N_{\text{con}} \times D_s \times E \times FC / 10$$

Onde: C_{conc} ou N_{conc} = concentração de C ou N ($g\ kg^{-1}$); D_s = densidade do solo em ($g\ cm^{-3}$); E = espessura da camada em (cm) e FC = fator de correção $(1 - (\% \text{ pedras}) / 100)$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Atributos morfológicos, físicos, químicos e ECOT e ENT

Caatinga preservada (CP)

Os atributos morfológicos dos solos são apresentados na Tabela 2. Os solos apresentaram a seguinte sequência de horizontes: A-Bt₁-Bt₂ (P1); A₁-A₂-E-Btg₁-Btg₂ (P2); A₁-A₂-Bt-Cr (P3). A-C₁-C₂-C₃ (P4). Estes solos apresentaram-se de rasos a pouco profundo com a espessura do *sólun* (horizontes A+B) variando de 35 (P3) a 60 cm (P2).

Os Luvissolos Crômicos (P1 e P3) são formados de gnaisse e ocorrem em relevo suavemente ondulado. Apresentam-se moderadamente drenados, no P1 foram identificadas as cores bruno-escuro horizonte A (7,5YR 3/3, úmida), bruno-avermelhado-escuro no Bt₁ (2,5YR 3/3, úmida) e vermelho-escuro-acinzentado no Bt₂ (10R 3/4, úmida). No P3, as cores obtidas foram preto-avermelhado no horizonte A₁ (2,5YR 2,5/1, úmida), bruno muito escuro no A₂ (7,5YR 2,5/3, úmida), bruno-avermelhado-escuro Bt (2,5YR 3/3, úmida) e bruno-oliváceo-escuro no Cr (2,5Y 5/4, úmida). A transição entre os horizontes foi ondulada e clara para os horizontes do P1 e para o P2 foi plana e abrupta, A₁ ondulada e abrupta A₂ e ondulada e clara no Bt.

Tabela 2 - Caracterização morfológica de uma sequência de solos sob caatinga preservada (CP) em São José dos Cordeiros, estado da Paraíba, Brasil.

Hor.	Prof. (cm)	Cor (úmida)		Textura	Estrutura	Consistência	Cerosidade	Transição	Nódulos	Carbonatos	Manganês
		Matiz	Mosqueado								
P1 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico											
A	0 - 10	7,5 YR 3/3	-	francoarenosa	mg, fo, gr	du, fr, lpl, lpe	-	on, cl	-	-	-
Bt ₁	10 - 25	2,5 YR 3/3	-	francoargilo arenosa	mg, fo, pr	md, fi, lpl, pe	mo/ab	on, cl	po,	-	+
Bt ₂	25 - 47	10R 3/4	-	francoargilo arenosa	mg, fo, pr	md, fi, pl, pe	-	-	-	-	-
P2 PLANOSSOLO NÁTRICO Órtico méxico											
A ₁	0 - 7	10YR 2/2	-	francoarenosa	mg, fo, gr	ld, fr, lpl, lpe	-	pl, cl	-	-	-
A ₂	7 - 20	7,5YR 3/3	-	francoarenosa	mg, mo, bs	ld, fr, lpl, lpe	-	pl, cl	-	-	-
E	20 - 21,5	10YR 6/2	2,5YR 4/8	areia franca	mp, mo, bs	ld, mfr, npl, npe,	-	pl, cl	-	-	-
Btg ₁	21,5 - 40	7,5YR 4/2	2,5YR 4/8	francoargilo arenosa	mg, fo, pr	ed, ef, pl, pe	-	pl, cl	-	-	-
Btg ₂	40 - 60	10YR 3/2	10YR 4/6; N 2,5/	francoargilo arenosa	mg, fo, pr	ed, ef, pl, pe	-	-	-	-	-
P3 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico											
A ₁	0 - 5	2,5YR 2,5/1	-	francoarenosa	gr, fo, gr/gru	ma,fr, lpl, lpe	-	pl, ab,	-	-	-
A ₂	5 - 12	7,5YR 2,5/3	-	francoarenosa	gr, mo, bs	ld, mf, lpl, lpe	-	on, ab	-	-	-
Bt	12 - 35	2,5YR 3/3	-	francoargilo arenosa	mg, fo, pr; mg/gr, fo, ba	md, mf, lpl, lpe	mo, ab	on, cl	-	-	-
Cr	35 - 75 ⁺	2,5Y 5/4	N 2,5/ 10YR 8/2	francoarenosa	ma, gr, md	md, mfi, lpl, lpe,	-	-	-	++	++
P4 NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico léptico											
A	0 - 7	10YR 2/2	-	areia franca	gr, mo, gr	ld, mfr,npl, npe,	-	pl, cl	-	-	-
C ₁	7 - 26	2,5Y 3/2	-	areia franca	gr, mo, bs	ld, mfr, npl, npe,	-	pl, cl	-	-	-
C ₂	26 - 45	2,5Y 4/3	-	areia	mg, mo, bs	ld, mf, npl, npe	-	pl, cl	-	-	-
C ₃	45 - 60	2,5Y 4/3	-	areia	mg, mo, bs	ld, mf, npl, npe	-	-	-	-	-

Estrutura: mp (muito pequeno); pe (pequeno); me (médio); gr (grande); mg (muito grande); fr (fraco); mo (moderado); fo (forte); bs (bloco subangular); ba (bloco angular); gr (granular); gru (grumosa); la (laminar); ma (maciça); pr (prismática); cn (cuneiforme). **Consistência:** ma (macia); ld (ligeiramente dura); du (dura); md (muito

dura); ed (extremamente dura); mfr (muito friável); fr (friável); fi (firme); mf (muito firme); ef (extremamente firme); npl (não plástico); lpl (ligeiramente plástico); pl (plástico); npe (não pegajoso); lpe (ligeiramente pegajoso); pe (pegajoso). **Cerosidade:** co (comum); mo (moderado); ab (abundante). **Transição:** ab (abrupta); cl (clara); gr (gradual); pl (plana); on (ondulada); ir (irregular). **Nódulos:** mp (muito pouco); po (pouco); fr (frequente); mf (muito frequentes); pe (pequeno); ma (macio); du (duro), es (esférico); ir (irregular). **Efervescência:** forte (+), muito forte (++)).

O horizonte A (P1) apresentou estrutura muito grande, forte e granular, enquanto que no A₁ (P3) a estrutura é grande, forte e granular/grumosa e no A₂ (P3) é muito grande, moderada e blocos subangulares. Os horizontes Bt de ambos os Luvisolos apresentaram estruturas muito grande, forte e prismática, ao passo que a estrutura é grande, forte e maciça no horizonte Cr (P3).

O A (P1) é duro e o A₁ e A₂ do P3 é macio e ligeiramente duro, respectivamente. Os horizontes A (P1) e A₁ (P3) são friáveis e os demais horizontes são muito firmes. Todos os horizontes são ligeiramente plásticos e ligeiramente pegajosos. Cerosidade comum e moderada ocorre no Bt₁ (P1) e cerosidade comum e abundante foi identificada no Bt (P3). O Bt₁ (P1) e o Cr (P3) apresentaram efervescência forte e muito forte, respectivamente, com água oxigenada (H₂O₂). O horizonte Cr também apresentou forte efervescência com HCl.

O Planossolo Nátrico (P2) é formado de gnaise, enquanto que o Neossolo Regolítico (P4) é formado de granito e ocorreram em relevo suavemente ondulado. Esses solos apresentaram-se pouco profundos com a espessura do *sólun* (horizontes A+B) de 60 cm para os dois perfis. No perfil P2 foram identificadas as cores bruno escuro horizonte A (10YR 2/2, úmida), bruno escuro no A₂ (10YR 3/3, úmida), cinzento no E (10YR 6/2, úmida), bruno acinzentado no Btg₁ (7,5YR 4/2, úmida) e bruno escuro no Btg₂ (10YR 3/2). O perfil P4 apresentou cores bruno muito escuro no A (10YR 2/2, úmida), bruno oliváceo no C₁ (2,5YR 3/2, úmida), bruno oliváceo no C₂ (2,5Y 4/3) e bruno oliváceo no C₃ (2,5Y 4/, úmida), verificou-se, ainda, transição entre os horizontes plana e clara para todos os horizontes dos perfis P2 e P4.

O horizonte A₁ do (P2) apresentou estrutura muito grande, forte e granular, o A₂ muito grande, moderada e blocos subangulares, o E muito pequena, moderada e bloco subangulares, enquanto que o Btg₁ e o Btg₂ apresentaram a estrutura muito grande, forte e prismática. A estrutura do horizonte A do (P4) foi granular, moderada e grande, C1 granular, moderada e bloco subangulares, enquanto que os horizontes C₂ e C₃ foram muito grande, moderada e blocos subangulares.

Os horizontes A₁ e A₂ (P2) são ligeiramente duro, friável e ligeiramente plástico e pegajoso, enquanto que o horizonte E é ligeiramente duro, muito friável, não plástico e não pegajoso, já os horizontes Btg₁ e Btg₂ são extremamente duros e firmes, plásticos e pegajosos. O perfil P4 em seus horizontes A e C₁ apresentaram-se ligeiramente duros, muito friáveis, não

plásticos e não pegajosos, enquanto que o C₂ e C₃ são ligeiramente duros, muito firmes, não plásticos e não pegajosos.

Os atributos físicos dos solos são apresentados na Tabela 3, verifica-se que os horizontes superficiais destes solos apresentaram predomínio da fração areia, sendo observado significativo aumento nos teores de argila nos horizontes subsuperficiais. Esses gradientes de 1,50 no P1 e de 1,53 no P3 são suficientes para o enquadramento do horizonte diagnóstico dos Luvisolos como B textural.

Cascalhos foram identificados em todos os horizontes do perfil P1 e nos horizontes A do perfil P3. Calhaus ocorrem somente nos horizontes A e Bt do perfil P3. Quanto à textura, verifica-se que no perfil P1, foi francoarenosa no horizonte A e a dos horizontes Bt₁ e Bt₂ foram franco-argiloarenosa, no P3 os horizontes A₁, A₂ e Cr foram francoarenosas e o Bt franco-argiloarenosa, foi observado o predomínio da fração areia grossa em todos os horizontes.

O maior valor de argila dispersa em água (ADA) no P1 ocorreu no horizonte Bt₁, ao passo que os menores valores foram encontrados no Bt₂, que por sua vez, apresentou o maior valor de grau de floculação (GF). No P3, os menores valores de ADA ocorrem no A₁ e A₂, enquanto que os maiores valores foram obtidos nos horizontes Bt e Cr. Os horizontes superficiais apresentam menor Ds e, por conseguinte, maior porosidade total (PT). O inverso foi obtido para os horizontes diagnósticos subsuperficiais.

Os horizontes superficiais A₁ e A₂ do P2 apresentaram predomínio da fração areia, enquanto que nos horizontes subsuperficiais Btg₁ e Btg₂ foram observados um significativo aumento nos teores de argila. A fração calhaus foi identificada apenas nos horizontes superficiais, enquanto que a fração cascalho se fez presente em todos os horizontes. A textura dos horizontes A₁ e A₂ é francoarenosa, do E é areia franca e do Btg₁ e Btg₂ é franco argiloarenosa. Os maiores valores de ADA foram observados nos horizontes subsuperficiais e os menores valores nos horizontes superficiais que por sua vez teve os menores valores de GF. Os valores de Ds foram maiores nos horizontes subsuperficiais, enquanto que o horizonte A₁ obteve o menor valor e consequentemente maior valor de PT.

O P4 apresentou-se excessivamente arenoso sem presença da fração calhaus, entretanto a fração cascalho se fez presente em todos os horizontes. Os horizontes A e C₁ tiveram a textura areia franca, enquanto que o C₂ e C₃ predominou a fração areia. Os valores de ADA

foram praticamente constantes e o C2 obteve o maior valor de GF. O horizonte C3 obteve o maior valor de Ds e o menor valor de PT.

Tabela 3 - Atributos físicos de uma sequência de solos sob caatinga preservada (CP) em São José dos Cordeiros (T1). estado da Paraíba, Brasil.

Hor.	Prof.	Calhau	Cascalho	AT	AG ⁽¹⁾	AF ⁽²⁾	Silte	Argila	ADA ⁽³⁾	GF ⁽⁴⁾	S/A ⁽⁵⁾	Ds ⁽⁶⁾	Dp ⁽⁷⁾	PT ⁽⁸⁾
	(cm)	-----g kg ⁻¹ -----							%	*	g cm ⁻³		%	
P1 LUVISSOLO CRÔMICO órtico lítico														
A	0 - 10	-	194,44	683	430	253	137	180	120	33,33	0,76	1,49	2,64	43,46
Bt ₁	10 - 25	-	169,1	646	362	284	114	240	220	8,33	0,48	1,96	2,71	27,68
Bt ₂	25 - 47	-	260,69	565	339	226	135	300	260	13,33	0,45	1,97	2,68	26,49
P2 PLANOSSOLO NÁTRICO Órtico méxico														
A ₁	0 - 7	14,4	145,3	640	403	237	160	200	80	60,00	0,80	1,47	2,47	40,49
A ₂	7 - 20	72,0	312,7	704	436	268	116	180	60	66,67	0,64	1,69	2,53	33,20
E	20 - 21,5	-	200,2	791	584	207	109	100	60	40,00	1,09	1,49	2,56	41,80
Btg ₁	21,5 - 40	-	251,8	534	391	143	126	340	300	11,76	0,37	1,83	2,73	32,97
Btg ₂	40 - 60	-	297,1	564	367	197	136	300	260	13,33	0,45	1,85	2,71	31,73
P3 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico														
A ₁	0 - 5	0,00	53,11	678	397	281	182	140	40	71,43	1,3	1,50	2,26	33,63
A ₂	5 - 12	78,83	121,49	715	401	314	165	120	80	33,33	1,38	1,51	2,60	33,19
Bt	12 - 35	212,62	-	620	465	155	180	200	160	20,00	0,9	1,86	2,50	25,60
Cr	35 - 75 ⁺	-	-	676	482	194	144	180	153	15,00	0,8	2,00	2,56	21,86
P4 NEOSSOLO REGOLÍTICO eutrófico léptico														
A	0 - 7	-	66,58	829	534	295	91	80	40	50,00	1,14	1,43	2,5	42,80
C ₁	7 - 26	-	71,84	839	520	319	61	100	40	60,00	0,61	1,42	2,53	43,87
C ₂	26 - 45	-	46,05	874	577	297	46	80	20	75,00	0,56	1,40	2,63	46,77
C ₃	45 - 60	-	76,53	857	600	157	83	60	40	33,33	1,38	1,49	2,66	43,98

areia grossa; ⁽²⁾ areia fina; ⁽³⁾ argila dispersa em água; ⁽⁴⁾ grau de flocculação; ⁽⁵⁾ relação silte/argila; ⁽⁶⁾ densidade do solo; ⁽⁷⁾ densidade de partículas e ⁽⁸⁾ porosidade total.

Os atributos químicos dos solos são apresentados na Tabela 4. Verifica-se que no P1, os valores de pH em H₂O de todos os horizontes apresentaram-se com reação moderadamente alcalina. No P3, os horizontes A₁, A₂ e Bt a reação é praticamente neutra, enquanto que o horizonte Cr foi moderadamente alcalino. Os valores de pH KCl, inferiores aos de pH H₂O, indicaram predomínio de carga líquida negativa.

Os teores de Ca²⁺ foram classificados como altos em todos os horizontes do P1. No P3, esses teores são altos no A1 e baixos nos demais horizontes à exceção dos teores médios no Bt₁ (P1), os teores de Mg²⁺ nos demais horizontes de ambos os Luvisolos são considerados elevados. Os teores de K⁺ também são elevados em todos esses horizontes, já os teores de P variaram de médios a adequados nos horizontes superficiais e no Cr (P3). No P1, a CTC é considerada média, já o perfil P3 a maioria dos horizontes apresentaram elevada CTC, acrescenta-se que todos esses horizontes também apresentaram elevada saturação por bases. Os baixos teores de CE demonstram que os solos não apresentam níveis elevados de sais, por outro lado, os horizontes Bt₁ e Bt₂ (P1) e A₁ e A₂ (P3) são solódicos e os horizontes subsuperficiais de P3 são sódicos.

Os valores de pH em água de todos os horizontes do P2 foram classificados como praticamente neutro, nos horizontes A₁ e A₂ se concentraram os maiores teores de Ca²⁺ e K⁺, enquanto que os maiores teores de Mg²⁺ e N⁺ se concentraram nos horizontes Btg₁ e Btg₂. O maior valor de saturação por bases se concentra no horizonte Cr e o menor no A₂. Todos os horizontes obtiveram baixos valores de CE e o maior teor de P foi encontrado no horizonte A. Os valores de pH em H₂O dos horizontes do perfil P4 foram classificados como praticamente neutros, já o teor mais elevado de Ca²⁺ foi encontrado no horizonte A, enquanto que o maior teor de Mg²⁺ foi encontrado no C₃. O maior teor de K⁺ encontra-se no A e o maior valor de Na⁺ no C₃.

Tabela 4 - Atributos químicos de uma sequência de solos sob caatinga preservada (CP) em São José dos Cordeiros. Estado da Paraíba, Brasil.

Hz	Prof. (cm)	pH		Δ pH	CE dS m ⁻¹	P mg kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	H+Al	SB	t	T	V ---- % ----	PST	COT g kg ⁻¹
		H ₂ O	KCl														
P1 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico lítico																	
A	0 - 10	7,35	5,67	-1,68	0,34	9,50	3,30	1,60	0,51	6,74	1,65	12,16	12,16	13,81	88,05	3,70	29,66
Bt ₁	10 - 25	7,51	5,48	-2,03	0,11	3,60	3,30	0,90	0,69	2,06	1,98	6,95	6,95	8,93	77,82	7,72	12,00
Bt ₂	25 - 47	7,48	4,82	-2,66	0,09	1,30	4,30	2,10	1,13	1,06	2,48	8,59	8,59	11,06	77,63	10,22	6,11
P2 PLANOSSOLO NÁTRICO Órtico méxico																	
A ₁	0 - 7	6,98	5,41	-1,57	0,10	1,90	1,50	1,80	0,54	4,26	3,96	8,10	8,10	12,06	67,16	4,48	15,38
A ₂	7 - 20	6,97	5,42	-1,55	0,10	1,20	1,20	1,30	0,68	2,45	3,14	5,63	5,63	8,76	64,23	7,76	9,79
E	20 - 21,5	6,95	4,49	-2,46	0,08	1,00	0,30	1,00	1,76	0,70	1,98	3,76	3,76	5,74	65,50	30,66	3,73
Btg ₁	21,5 - 40	6,69	3,64	-3,05	0,10	0,40	1,40	2,90	7,37	0,62	3,30	12,29	12,29	15,59	78,84	47,27	3,26
Btg ₂	40 - 60	6,75	5,76	-0,99	0,09	0,70	1,20	3,60	12,46	0,60	1,82	17,86	17,86	19,67	90,77	63,35	2,33
P3 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico																	
A ₁	0 - 5	6,58	5,61	-0,97	0,43	15,70	3,40	4,30	2,21	6,78	4,79	16,69	16,69	21,48	77,72	10,28	54,54
A ₂	5 - 12	6,95	5,83	-1,12	0,14	7,80	1,20	2,00	1,09	5,17	1,82	9,46	9,46	11,27	83,90	9,68	11,19
Bt	12 - 35	7,22	5,67	-1,55	0,11	1,60	1,10	3,20	24,01	1,91	0,99	30,22	30,22	31,21	96,83	76,94	2,80
Cr	35 - 75 ⁺	7,90	5,80	-2,10	0,12	15,00	1,60	2,10	57,61	1,62	0,00	62,93	62,93	62,93	100,00	91,55	1,13
P4 NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico léptico																	
A	0 - 7	6,79	6,54	-0,25	0,48	14,50	3,00	2,10	0,18	4,26	1,32	9,54	9,54	10,86	87,84	1,68	21,06
C ₁	7 - 26	7,19	5,77	-1,42	0,13	10,30	0,90	1,60	0,40	1,83	1,49	4,73	4,73	6,21	76,09	6,44	6,57
C ₂	26 - 45	6,79	5,56	-1,23	0,10	13,60	0,40	0,90	1,10	0,90	1,32	3,30	3,30	4,62	71,42	23,72	3,85
C ₃	45 - 60	6,73	5,43	-1,30	0,17	3,80	1,80	3,40	5,89	0,98	1,98	12,07	12,07	14,05	85,91	41,94	4,75

Os teores e estoques de COT e NT são apresentados na Tabela 5, observa-se que os teores de COT e NT são maiores nos horizontes superficiais e decrescem gradualmente em profundidade, em geral, os estoques desses elementos e a relação C/N seguiram tendência semelhante.

Os teores de nitrogênio total (NT) tiveram o comportamento um pouco distinto, uma vez que seus maiores teores também foram encontrados nos horizontes superficiais, porém, em alguns solos da Caatinga Preservada (perfis P2 e P4), os teores tiveram uma pequena variação em nível de horizontes subsuperficiais. Os teores de COT e NT dos solos da CP são apresentados nas Tabelas 5. Entre as classes de solos presentes na CP, o P1 apresentou teores, em seus horizontes, de COT variando de 6,11 a 29,66 g kg⁻¹ e um acúmulo total (0 – 47 cm) de 47,77 g kg⁻¹, sendo que 62% desse valor encontram-se no horizonte A e teores de NT variando de 2,10 a 7,11 g kg⁻¹ e um acúmulo total de 13,91 g kg⁻¹, tendo 51% desse valor presentes no horizonte A.

O perfil P3 apresentou valores de COT em seus horizontes variando de 1,13 a 54,54 g kg⁻¹ e um acúmulo total (0 – 75 cm) de 69,65 g kg⁻¹, 78,3% desse valor está presente no horizonte A e teores de NT variando de 1,20 a 18,01 g kg⁻¹ com um acúmulo total de 28,01 g kg⁻¹, tendo no horizonte A 64,3% desse acúmulo total. Dentre os quatros solos presentes na CP, o P3 foi o que apresentou os maiores teores totais acumulados de COT e NT 69,65 e 28,01 g kg⁻¹ respectivamente.

O perfil P2 apresentou teores, em seus horizontes, de COT variando de 2,33 a 15,38 g kg⁻¹ e um acúmulo total (0 – 60 cm) de 34,49 g kg⁻¹, tendo 44,6% desse acúmulo presente no horizonte A e teores de NT variando de 0,70 a 3,70 g kg⁻¹ com um acúmulo total de 10,90 g kg⁻¹, 33,94% desse valor encontra-se no horizonte A₂. Essa classe de solo foi a que apresentou os menores teores totais acumulados de COT e NT 34,49 e 10,90 g kg⁻¹ respectivamente. O P4 apresentou teores, em seus horizontes, variando de 3,85 a 21,06 g kg⁻¹ e um acúmulo total (0 – 60 cm) de 36,22 g kg⁻¹, tendo 58,1% deste acúmulo presente no horizonte A e teores de NT variando de 1,5 a 9,51 g kg⁻¹ e um acúmulo total de 17,41 g kg⁻¹, porém 54,6% deste acúmulo estão presentes no horizonte A₂.

De acordo com os valores observados na Tabela 5, para os solos da RPPN, o acúmulo total dos teores de COT de forma decrescente se dá na seguinte ordem: P3>P1>P4>P2 e para NT P3>P4>P1>P2.

Os estoques de COT e NT não tiveram um comportamento semelhante aos dos teores desses elementos ao longo dos perfis avaliados. Diferentemente do que foram observados com os teores, os estoques de COT e NT (Tabela 5) aumentaram de forma significativa em alguns horizontes subsuperficiais, fazendo com o que alguns desses horizontes estoquem mais carbono do que alguns horizontes superficiais, que é onde se concentram os maiores teores desses elementos.

Entre os quatros solos da CP o P1 foi o solo que obteve o maior estoque total de COT 84,48 Mg ha⁻¹ seguido do P3 70,15 Mg ha⁻¹, P4 55,70 Mg ha⁻¹ e o P2 49,58 Mg ha⁻¹ e para NT o P3 37,99 Mg ha⁻¹ foi o que obteve o maior estoque total de NT seguido do P1 27,26 Mg ha⁻¹, P2 21,95 Mg ha⁻¹ e P4 19,64 Mg ha⁻¹ (Tabela 8).

Os solos dessa toposequencia foram classificados como (P1) e (P3) Luvissoilo Crômico Órtico típico, (P2) Planossolo Nátrico Órtico méxico e (P4) Neossolo Regolítico Eutrófico léptico.

Tabela 5 - Estoques e teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) de uma sequência de solos sob caatinga preservada (CP) em São José dos Cordeiros. Estado da Paraíba, Brasil.

Hor	Prof (cm)	COT ----- g kg ⁻¹ -----	NT ----- Mg ha ⁻¹ -----	ECOT ----- Mg ha ⁻¹ -----	ENT -----	C/N -
P1 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico lítico						
A	0 - 10	29,66	7,11	35,60	9,06	4,17
Bt ₁	10 - 25	12,00	4,70	29,31	11,48	2,55
Bt ₂	25 - 47	6,11	2,10	19,57	6,72	2,91
Σ	0 - 47	47,77	13,91	84,48	27,26	-
P2 PLANOSSOLO NÁTRICO Órtico méxico						
A ₁	0 - 7	15,38	0,70	13,53	0,62	21,96
A ₂	7 - 20	9,79	3,70	14,79	5,59	2,64
E	20 - 21,5	3,73	1,30	6,94	2,42	2,87
Btg ₁	21,5 - 40	3,26	3,00	8,26	7,60	1,09
Btg ₂	40 - 60	2,33	2,20	6,06	5,72	1,06
Σ	0 - 60	34,49	10,90	49,58	21,95	-
P3 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico						
A ₁	0 - 5	54,54	18,01	38,73	12,85	3,03
A ₂	5 - 12	11,19	6,60	10,4	6,13	1,70
Bt	12 - 35	2,80	2,20	11,98	9,41	1,27
Cr	35 - 75 ⁺	1,13	1,20	9,04	9,60	0,94
Σ	0 - 75 ⁺	69,65	28,01	70,15	37,99	-
P4 NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico léptico						
A	0 - 7	21,06	9,51	19,68	7,58	2,21
C ₁	7 - 26	6,57	2,70	16,45	5,76	2,43

C ₂	26 - 45	3,85	1,50	9,77	2,79	2,56
C ₃	45 - 60	4,75	3,70	9,80	3,51	1,28
Σ	0 - 60	36,22	17,41	55,70	19,64	-

Solos sob área degradada (AD)

Os atributos morfológicos dos solos são apresentados na Tabela 6. Observou-se que os perfis de solos tiveram a seguinte sequência de horizontes: A-Bt-Cr P5; A-Bt₁-E-Bt₂-Cr (P6); A-Bt-Cr P7, estes solos apresentaram-se de rasos a pouco profundo com a espessura do *sólun* (horizontes A+B) variando de 32 cm (P5 e P6) a 60 cm P7.

Os Luvisolos Crômicos (P5 e P7) são formados de gnaiss e ocorrem em relevo suavemente ondulado, o perfil P5 apresentou cores bruno avermelhado escuro (5YR 3/3, úmida) nos horizontes A e Bt e vermelho escuro acinzentado Cr (2,5YR 2/2). No perfil P7, as cores obtidas foram vermelho claro acinzentado (5YR 8/3, úmida) no horizonte A, bruno avermelhado escuro (5YR 3/3) no horizonte Bt e preto avermelhado (2,5YR 2/2) no Cr. A transição entre os horizontes foi ondulada e abrupta no P5 e plana e abrupta e ondulada e abrupta no P7.

O horizonte A do P5 apresentou estrutura muito grande, moderada e granular, enquanto que no A do P7 foi média, moderada e laminar. O horizonte Bt de ambos os Luvisolos apresentaram estrutura muito grande, forte e prismática e os horizontes Cr apresentaram estruturas grande, média e maciça. O horizonte A do P5 e P6 apresentaram consistência ligeiramente dura, não plástica e não pegajosa, enquanto que os horizontes Bt foram muito dura, firme, pegajosa e plástica e a estrutura dos horizontes Cr foram muito dura, firme, ligeiramente plástica e pegajosa.

O Planossolo Nátrico P6 é formado de gnaiss e também ocorre em relevo suave ondulado, nesse perfil foram identificadas as cores no horizonte A (10YR 3/3, úmida), no Bt₁ (2,5YR 3/3, úmida), no Bt₂ (10YR 3/2, úmida) e no Cr (2,5YR 5/3, úmida) e a transição entre horizontes que predominou foi a plana e clara. O Horizonte A apresentou a estrutura grande, moderada e granular, o Bt₁ foi muito grande, forte e prismática, o Bt₂ foi muito grande, forte e maciça e o Cr foi grande, forte e maciça. A consistência do horizonte A foi ligeiramente dura, friável, não plástica e não pegajosa, do Bt₁ e Bt₂ foram muito dura, extremamente firme, plástica e pegajosa e do Cr foi muito dura, muito firme, plástica a pegajosa

Tabela 6 - Caracterização morfológica de uma sequência de solos sob área degradada em São João do Cariri (AD), estado da Paraíba, Brasil.

Hor.	Prof. (cm)	Cor (úmida)		Textura	Estrutura	Consistência	Cerosidade	Transição	Nódulos	Carbonatos	Manganês
		Matiz	Mosqueado								
P5 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico lítico											
A	0- 10	5YR 3/3	-	francoarenosa	gr, mg, mo	ld, fr, npl, npe	-	on, ab	-	-	-
Bt	10 -32	5YR 3/3	2,5YR 3/4	francoargilo arenosa	mg, fo, pr	md, fi, pe, pl	-	on, ab	-	-	-
Cr	32 - 50	2,5YR 2/2	10R 4/6	francoargilo arenosa	ma, gr, md	md, fi, lpl, lpe,	-	-	-	-	-
P6 PLANOSSOLO NÁTRICO Distrófico vertissólico											
A	0 - 5	10YR 3/3	-	francoarenosa	gr, gr, mo	ld, fr npl, npe	-	pl, ab	-	-	-
Bt ₁	5 - 20	2,5YR 3/3	-	francoargilosa	mg, fo, pr	md, ef, pl, pe	-	pl, cl	-	-	+
Bt ₂	20 - 32	10YR 3/2	-	francoargilosa	mg, fo, ma	md, ef, pl, pe	-	pl, cl	-	-	+
Cr	32 - 55	2,5YR 5/3	-	francoargilo arenosa	ma, gr, fo	md, mf, pl, pe	-	-	-	-	-
P7 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico vertissólico											
A	0 - 8	5YR 8/3	-	francoarenosa	la, me, mo	ld, mf, npl, npe	-	pl, ab	-	-	-
Bt	8- 40	5YR 3/3	-	francoargilo arenosa	mg, fo, pr	md, fi, pe, pl	-	on, ab	-	-	-
Cr	40 - 60	2,5YR 2/2	-	francoargilo arenosa	ma, gr, md	md, fi, lpl, lpe	-	-	-	-	-

Estrutura: mp (muito pequeno); pe (pequeno); me (médio); gr (grande); mg (muito grande); fr (fraco); mo (moderado); fo (forte); bs (bloco subangular); ba (bloco angular); gr (granular); g (grumosa); la (laminar); ma (maciça); pr (prismática); cn (cuneiforme). **Consistência:** ma (macia); ld (ligeiramente dura); du (dura); md (muito dura); ed (extremamente dura); mfr (muito friável); fr (friável); fi (firme); mf (muito firme); ef (extremamente firme); npl (não plástico); lpl (ligeiramente plástico); pl (plástico); npe (não pegajoso); lpe (ligeiramente pegajoso); pe (pegajoso). **Cerosidade:** co (comum); mo (moderado); ab (abundante). **Transição:** ab (abrupta); cl (clara); gr (gradual); pl (plana); on (ondulada); ir (irregular). **Nódulos:** mp (muito pouco); po (pouco); fr (frequente); mf (muito frequentes); pe (pequeno); ma (macio); du (duro), es (esférico); ir (irregular). **Efervescência:** forte (+), muito forte (++)).

Os atributos físicos dos solos são apresentados na Tabela 7. Os horizontes superficiais desses solos apresentaram predomínio da fração areia, sendo observado significativo aumento nos teores de argila nos horizontes subsuperficiais, esses gradientes de 2,33 no P5 e de 1,71 no P7 são suficientes para o enquadramento do horizonte diagnóstico dos Luvisolos como B textural.

A fração cascalho foi identificada em todos os horizontes do P5 e P7. Os horizontes A desses perfis têm a textura francoarenosa, enquanto que os horizontes Bt e Cr são francoargilo arenosa. Os menores valores de ADA foram identificados nos horizontes A, enquanto que os maiores estão nos horizontes Bt e os horizontes superficiais desses perfis apresentaram os menores valores de GF. Os maiores valores de Ds estão situados nos horizontes Bt de ambos os perfis, enquanto que a porosidade total sempre foi maior nos horizontes superficiais.

O perfil P6 também apresentou predomínio da fração areia no horizonte superficial e um significativo aumento no teor de argila no horizonte subsuperficial, porém todos os horizontes apresentaram a fração cascalho, enquanto que apenas o horizonte A e o Cr constaram a presença de calhaus. O horizonte A apresentou a textura francoarenosa, o Bt1 e Bt2 foram francoargilosa e o Cr foi francoargilo arenosa. Já os maiores valores de ADA e os menores valores de GF estão situados nos horizontes Bt₁ e Bt₂ e os maiores valores de Ds e os menores de PT também foram encontrados nesses horizontes.

Tabela 7 - Atributos físicos de uma sequência de solos sob área degradada (AD) em são João do Cariri, estado da Paraíba, Brasil.

Hor.	Prof.	Calhau	Cascalho	AT	AG ⁽¹⁾	AF ⁽²⁾	Silte	Argila	ADA ⁽³⁾	GF ⁽⁴⁾	S/A ⁽⁵⁾	Ds ⁽⁶⁾	Dp ⁽⁷⁾	PT ⁽⁸⁾
	(cm)				-----g kg ⁻¹ -----					%	*	---g cm ⁻³ ---	%	
P5 LUVISSOLO CRÔMICO órtico lítico														
A	0 - 10	-	106,98	711	386	325	169	120	60	50	1,41	1,60	2,60	38,46
Bt	10 - 32	-	240,08	582	396	186	138	280	260	7,14	0,49	1,87	2,53	26,09
Cr	32 - 50	-	452,93	643	438	205	137	220	160	27,27	0,62	1,88	2,70	30,37
P6 PLANOSSOLO NÁTRICO distrófico vertissólico														
A	0 - 5	62,81	369,22	701	318	383	199	100	75	25,00	1,99	1,66	2,60	36,15
Bt ₁	5 - 20	-	114,85	440	225	215	220	340	300	11,76	0,65	1,84	2,53	27,27
Bt ₂	20 - 32	-	157,64	440	239	201	200	360	280	22,22	0,56	1,83	2,56	28,52
Cr	32 - 55	265,95	454,11	681	481	200	119	200	120	40,00	0,60	1,90	2,53	24,90
P7 LUVISSOLO CRÔMICO órtico vertissólico														
A	0 - 8	-	47,65	578	283	295	282	140	120	14,29	2,01	1,72	2,56	32,81
Bt	8 - 40	-	85,01	668	401	267	92	240	200	16,67	0,38	1,74	2,43	28,40
Cr	40 - 60	-	286,99	550	341	209	190	260	220	15,38	0,73	1,79	2,53	29,24

⁽¹⁾ areia grossa; ⁽²⁾ areia fina; ⁽³⁾ argila dispersa em água; ⁽⁴⁾ grau de flocculação; ⁽⁵⁾ relação silte/argila; ⁽⁶⁾ densidade do solo; ⁽⁷⁾ densidade de partículas e ⁽⁸⁾ porosidade total.

Os atributos químicos dos solos são apresentados na Tabela 8. Verifica-se que no perfil P5, os valores de pH em H₂O apresentaram reação praticamente neutra enquanto que no perfil P7 todos os horizontes apresentaram reação moderadamente alcalino, já o ΔpH indica predomínio de carga líquida negativa.

Os valores de Ca²⁺ foram praticamente constantes nos horizontes do perfil P5 e P7 o maior valor se situou no horizonte Cr, já os maiores teores de Mg²⁺ se concentraram nos horizontes Bt e no Cr de ambos os perfis. Os teores de Na⁺ mais elevados se concentraram nos horizontes Cr e os teores de K⁺ nos horizontes superficiais. Os valores de SB dos horizontes de ambos os perfis os classificaram como eutróficos e/ou hiper-eutróficos. O horizonte A do perfil P5 obteve o maior valor de P, enquanto que no perfil P7 o maior valor se concentrou no Cr, os valores de CE foram considerados baixos para todos os horizontes de ambos os perfis.

Os valores de pH em H₂O dos horizontes do perfil P6 os classificaram com reação moderadamente alcalino, nesse perfil os valores de pH em KCl também foram inferiores aos de pH em H₂O indicaram predomínio de carga líquida negativa. Os horizontes Bt₁ e Bt₂ obtiveram os maiores teores de Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺, já no horizonte A se concentrou o maior teor de K⁺. Os elevados valores de PST fez com que esse solo fosse classificado como Nátrico no segundo nível categórico. Por outro lado, o maior teor de P disponível se situou no horizonte Cr e todos os horizontes obtiveram valores de CE considerados como baixos.

Tabela 8 - Atributos químicos de uma sequência de solos sob área degradada (AD) em São João do Cariri (AD). Estado da Paraíba, Brasil.

Hz	Prof. (cm)	pH		Δ pH	CE dS m ⁻¹	P mg kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	H+Al	SB	t	T	V	PST	COT
		H ₂ O	KCl														
P5 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico lítico																	
A	0 - 10	7,29	5,44	-1,85	0,34	12,30	1,60	1,20	0,79	4,78	0,99	8,37	8,37	9,36	89,43	8,45	16,53
Bt	10 - 32	6,73	5,17	-1,56	0,77	0,60	1,70	3,40	25,11	0,45	2,15	30,66	30,66	32,80	93,46	76,54	5,89
Cr	32 - 50	6,85	6,46	-0,39	2,98	37,20	1,80	3,40	89,48	0,57	0,33	95,25	95,25	95,58	99,65	93,61	3,85
P6 PLANOSSOLO NÁTRICO Distrófico vertissólico																	
A	0 - 5	7,63	5,80	-1,83	0,19	6,00	1,80	1,50	1,15	3,74	1,82	8,19	8,19	10,01	81,86	11,49	12,00
Bt ₁	5 - 20	7,35	5,34	-2,01	0,22	1,00	4,70	4,60	12,52	0,72	1,98	22,54	22,54	24,52	91,93	51,06	4,75
Bt ₂	20 - 32	7,51	5,41	-2,10	0,50	0,70	4,50	5,00	17,15	0,68	1,65	27,33	27,33	28,98	94,31	59,18	3,40
Cr	32 - 55	7,42	5,66	-1,76	0,72	22,70	2,30	2,70	16,15	0,62	0,66	21,78	21,78	22,44	97,06	71,97	2,49
P7 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico vertissólico																	
A	0 - 8	7,49	5,71	-1,78	0,13	18,00	1,80	1,30	0,76	3,65	0,66	7,51	7,51	8,17	91,92	9,26	2,10
Bt	8 - 40	7,13	5,54	-1,59	0,21	2,40	3,30	3,00	1,77	0,99	0,99	9,05	9,05	10,04	90,14	17,58	1,30
Cr	40 - 60	7,44	5,29	-2,15	0,11	2,40	4,30	4,80	2,94	0,69	0,83	12,73	12,73	13,56	93,92	21,68	0,30

Os teores e estoques de COT e NT são apresentados na Tabela 9. Os teores de COT e NT são maiores nos horizontes superficiais e decrescem gradualmente em profundidade. Em geral, os estoques desses elementos e a relação C/N seguiram tendência semelhante.

Os solos dessa área também tiveram comportamento semelhante aos solos da CP, ocorrendo um decréscimo nos teores de COT e NT em profundidade. Ao comparar os teores de COT e NT, principalmente, dos horizontes superficiais, percebe-se uma acentuada redução desses valores nos solos que estão situados sob a AD.

O P5, somando os teores de COT e NT dos seus horizontes, apresentou um acúmulo total de 26,26 e 3,90 g kg⁻¹, respectivamente. Este perfil apresentou os maiores teores de COT concentrados no seu horizonte superficial, com um acúmulo de 62,9% do valor total. Já para o NT o horizonte subsuperficial (Bt) foi o que concentrou o maior teor desse elemento com 53,84% do valor acumulado total. Ao se comparar os teores de COT e NT do horizonte superficial, que é o que concentra os maiores teores e é, também, o mais afetado pelos processos erosivos, do P5 com os dos P1 e P3 percebe-se uma redução significativa nos valores. O horizonte A do P5 apresentou uma redução de 44,26% no teor de COT e de 87,34% de NT quando comparado com o P1. Já quando comparado com o P3, apresentou uma redução de COT e NT de 74,85 e 96,34% respectivamente.

O P6 também apresentou uma tendência decrescente nos valores de COT e NT. Este solo apresentou um acúmulo total, ao somar os valores de todos os seus horizontes, de 22,64 e 5,40 g kg⁻¹ para COT e NT, respectivamente. 53% do acúmulo total de COT e 64,81% de NT estão presentes no seu horizonte A. Ao comparar os valores dos teores de COT e NT do horizonte A do P6 sob AD com o horizonte A do P2 sob CP, percebe-se uma redução nos teores de 52,34% de COT e 20,45% de NT.

O P7 também apresentou uma tendência decrescente nos valores de COT e NT, à medida que se aprofunda no perfil. Este solo foi o que os processos erosivos atuaram de forma mais intensa na área, reduzindo os teores de COT e NT aos menores valores entre os três solos, com valores acumulados totais de 11,55 e 3,70 g kg⁻¹ para COT e NT respectivamente. Ao se comparar os teores de COT e NT desse perfil com os dois perfis de Luvissolos da área de CP (P1 e P3), percebe-se uma redução de 83,98% de COT e 73,40% de NT quando comparado ao (P1) e de 82,42% de COT e de 84,97 de NT quando comparado ao P3.

Entre os três solos situados na AD, o P5 foi o solo que obteve o maior estoque total de COT 49,15 Mg ha⁻¹ seguido do P7 34,47 Mg ha⁻¹ e do P6 30,11 Mg ha⁻¹ e para NT o P5 9,52 Mg ha⁻¹ seguido do P6 6,06 Mg ha⁻¹ e do P7 4,17 Mg ha⁻¹ (Tabelas 9 e Figura 8).

Ao se comparar os estoques totais de COT e NT da AD com os solos da CP para os solos de mesmas classes, percebe-se uma redução significativa principalmente nos estoques de COT. O P5 em relação ao P1 obteve uma redução de 41,82 e 65,08% nos estoques de COT e NT respectivamente. O P5 em relação ao P3 obteve uma redução de 29,94 e 74,95% para os estoques de COT e NT respectivamente. O P7 em relação ao P1 obteve uma redução de 59,2 e 84,72% para COT e NT respectivamente. O P7 em relação ao P3 obteve uma redução de 50,86 e 89,02% para os estoques de COT e NT respectivamente. O P6 em relação ao P2 obteve uma redução de 39,27 e 72,39% para os estoques de COT e NT respectivamente.

Os solos dessa topossequência foram classificados como (P5) Luvissoilo Crômico Órtico típico, (P6) Planossolo Nátrico Distrófico vertissólico e (P7) Luvissoilo Crômico Órtico vertissólico.

Tabela 9 - Estoques e teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) de uma sequência de solos sob área degradada (AD) em São João do Cariri (AD). Estado da Paraíba, Brasil.

Hor	Prof (cm)	COT ----- g kg ⁻¹ -----	NT -----	ECOT ----- Mg ha ⁻¹ -----	ENT	C/N -
P5 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico lítico						
A	0 - 10	16,53	0,90	23,62	1,29	18,35
Bt	10 - 32	5,89	2,10	18,41	6,57	2,80
Cr	32 - 50 ⁺	3,85	0,90	7,12	1,66	4,27
Σ	0 - 50	26,26	3,90	49,15	9,52	-
P6 PLANOSSOLO NÁTRICO Distrófico vertissólico						
A	0 - 5	12,00	3,50	6,28	1,83	3,43
Bt ₁	5 - 20	4,75	1,10	11,6	2,69	4,32
Bt ₂	20 - 32	3,40	0,70	6,29	1,30	4,85
Cr	32 - 55	2,49	0,10	5,94	0,24	24,89
Σ	0 - 55	22,64	5,40	30,11	6,06	-
P7 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico vertissólico						
A	0 - 8	4,75	2,10	6,22	2,75	2,26
Bt	8 - 40	4,30	1,30	21,9	0,66	3,31
Cr	40 - 60	2,49	0,30	6,35	0,76	8,30
Σ	0 - 60	11,55	3,70	34,47	4,17	-

Figura 5 - Estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) de uma topossequência de solos sob caatinga preservada (CP) em São José dos Cordeiros, Estado da Paraíba, Brasil. A) P1; B) P2; C) P3 e D) P4.

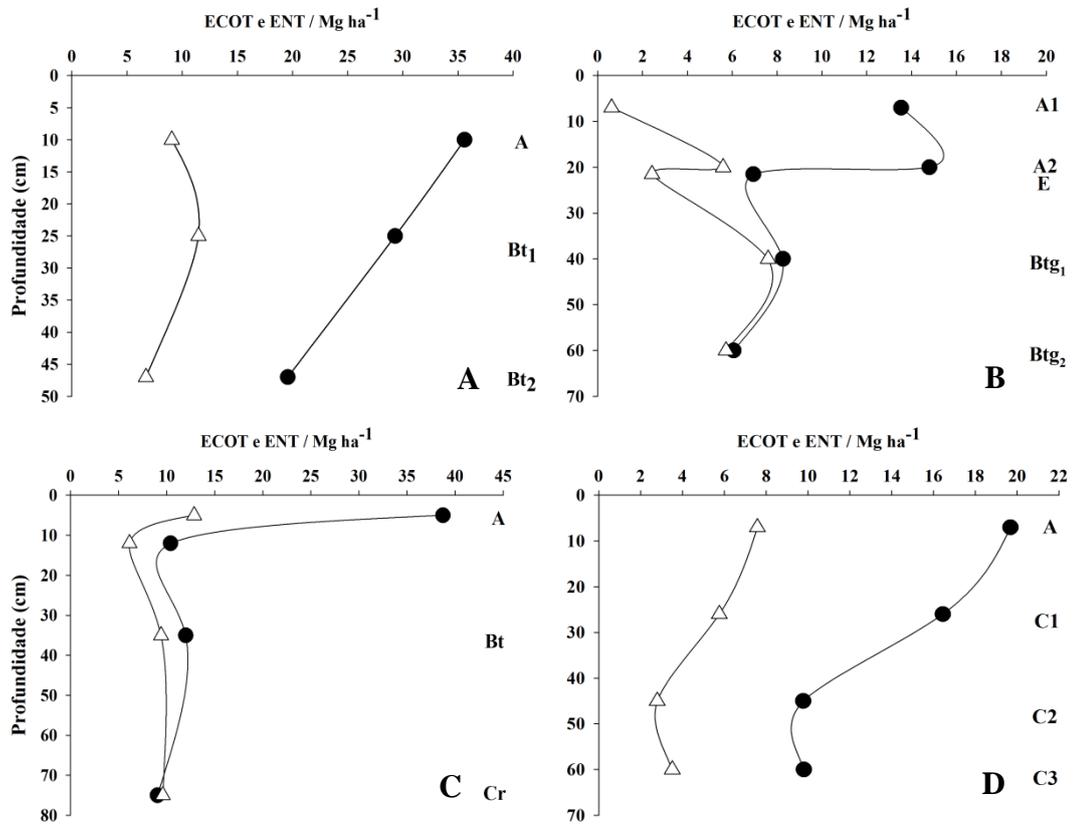
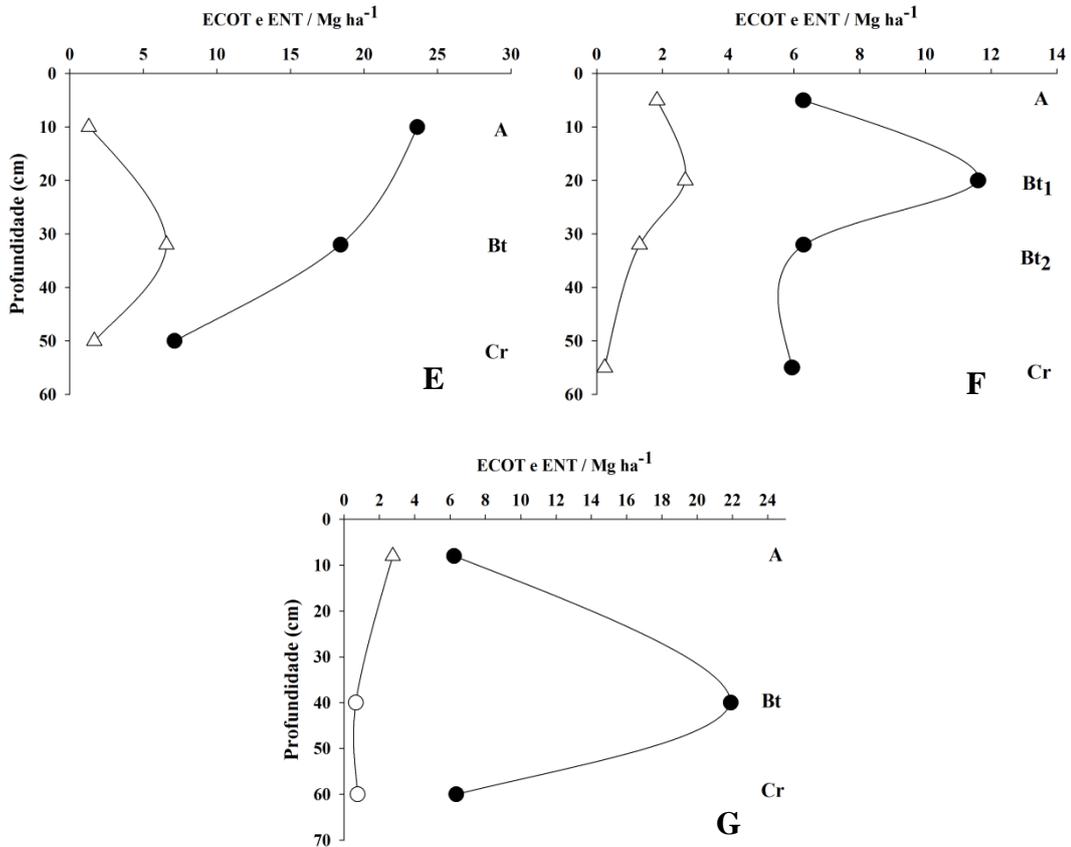
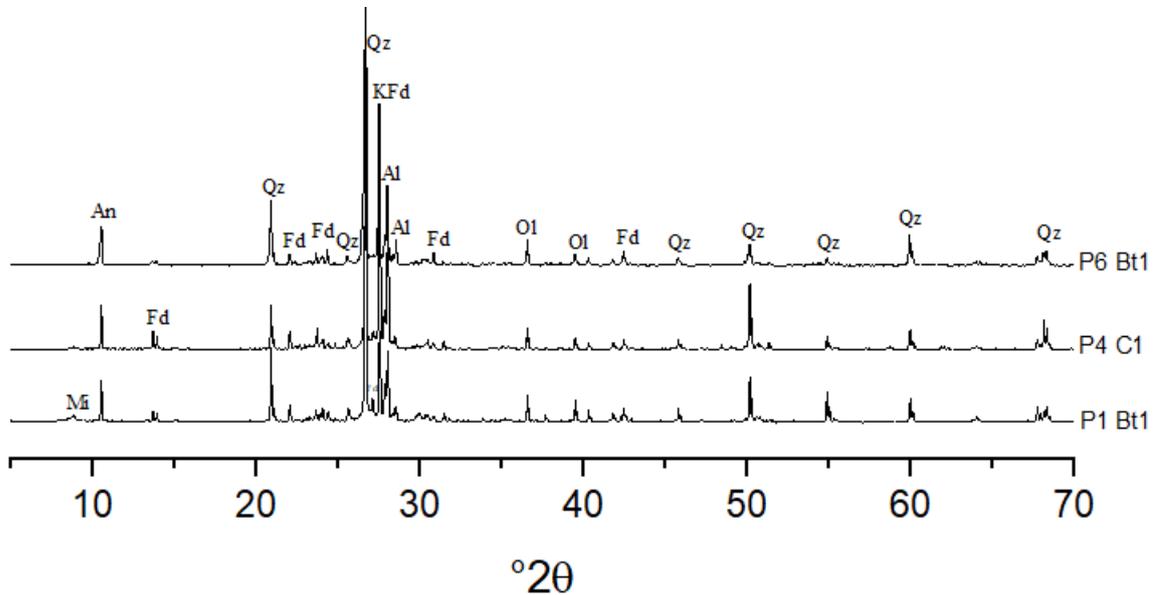


Figura 6 - Estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) de uma toposequência de solos sob área degradada (AD) em São João do Cariri (AD). Estado da Paraíba, Brasil. E) P5; F) P6 e G) P7.



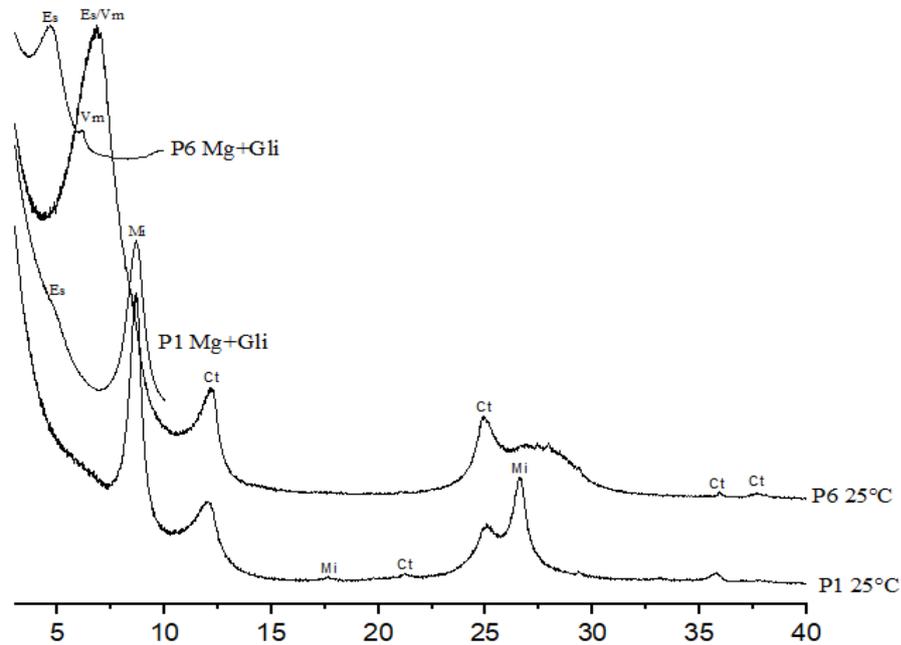
Dada a mineralogia semelhante entre as classes de solos e as paisagens com diferentes formas de utilização da terra estudadas, é apresentada na Figura 7 a mineralogia da fração areia somente do horizonte diagnóstico Bt do Luvissole Crômico, C1 do Neossolo Regolítico (área preservada) e do Bt₁ do Planossolo Nátrico (área degradada). Foram identificados os minerais anfibólio (0,840 nm); feldspato (0,650 nm; 0,636 nm; 0,403 nm; 0,376 nm; 0,370 nm, 0,324 nm); quartzo (0,425 nm; 0,348 nm), mica (1,001), albita (0,318 nm, 0,312 nm) e olivina (0,245 nm; 0,228 nm).

Figura 7 - Mineralogia da fração areia de solos sob vegetação em regeneração (P1 e P4) e sob processo de degradação (P6) na região semiárida nordestina. Mesoregião dos Cariris, estado da Paraíba, Brasil. An: anfibólio; Al: albita; Fd: feldspato; KFd: feldspato potássico; Ol: olivina; Mi: mica; Qz: quartzo.



Dada a similaridade mineralógica entre os solos ao nível de ordem, bem como entre as áreas estudadas, na Figura 8 é apresentada a mineralogia da fração argila do Luvissole Crômico (P1) e do Planossolo Nátrico (P6). A caulinita foi identificada pelas reflexões 0,728, 0,350, 0,249 e 0,238 nm, enquanto que as reflexões a 1,001, 0,502 e 0,361 atestam a presença de mica. Pico de mica com mais alta intensidade e menor largura a meia altura foram encontrados no Luvissole Crômico. No Planossolo Nátrico foi identificada esmectita pela reflexão a 1,923 nm e vermiculita pelo pico a 1,420 após saturação com Mg e solvatação com glicerol. O pico em 1,296 (P6) na amostra de argila natural provavelmente indica a ocorrência de esmectitas sódicas.

Figura 8 - Mineralogia da fração argila de solos sob vegetação em regeneração (P1) e sob processo de degradação na região semiárida nordestina (P6). Mesorregião dos Cariris, estado da Paraíba, Brasil. Ct: caulinita; Es: esmectita; Mi: mica; Vm: vermiculita. Tratamentos: 25°C: argila natural; Mg + G: saturação com Mg e solvatação com glicerol.



Discussão

GÊNESE DOS SOLOS

Os Planossolos P2 e P6 apresentaram cores mais claras, típicas dessa ordem, em que ocorrem com mais frequência matizes 7,5YR e 10YR, valor ≥ 4 e croma ≥ 3 (úmidas). Os Luvisolos (P1, P3, P5 e P7) apresentam cores mais escuras, com matizes 10R, 2,5YR e 5YR, valor ≥ 3 e croma ≥ 4 . O Neossolo P4 apresentou matizes 2,5YR e 10YR, valor ≥ 4 e croma ≥ 3 . Os Luvisolos e os Planossolos das duas áreas estudadas (AP e AD) foram desenvolvidos de um material de origem denominado de gnaiss. Essa rocha metamórfica apresenta em sua estrutura uma banda leucocrática rica em minerais félsicos e uma banda melanocrática com predomínio de minerais máficos (Brasil, 1972).

No Cariri paraibano, os Luvisolos apresentam forte contribuição destes minerais máficos facilmente intemperizáveis, tais como biotita e anfibólios (Figura 7), ao passo que nos Planossolos há uma contribuição considerável nas frações grossas de quartzo e feldspatos (Figura 7) oriundos do segmento leucocrático (Ferreira et al., 2016). Essas informações vão ao encontro das de (Camara et al., 2021) ao confirmar que a gênese de Luvisolos e

Planossolos têm uma relação mais direta com o material de origem do que com a posição na paisagem.

O caráter crômico dos Luvisolos é originado a partir do processo pedogenético denominado de rubeificação. Neste processo, há liberação do Fe^{2+} dos minerais primários, p. ex., anfibólios e biotitas, e posterior oxidação como óxido de ferro hematita (FeO_2) (Kämpf e Curi, 2012). Elevado teor de ferro, altas temperaturas, baixo aporte de matéria orgânica, valores de pH próximos à neutralidade e a baixa disponibilidade de água favoreceram o processo (Buol e Weed 1991).

As cores mais claras dos Planossolos denotam que provavelmente na sua formação houve participação de minerais félsicos, associada a um período de estagnação de água, acarretando redução dos óxidos de Fe, aos quais imprimem valores e cromas mais elevados aos solos. Esse processo de oxidação e redução nos Planossolos ficou evidente pela ocorrência de mosqueados oliváceos comuns, grandes e distintos (2,5YR 4/8, úmido) e (10YR 4/6, úmido) de tamanho médio. De fato, outros estudos mostram esse mesmo comportamento ao informar que hematita está mais relacionada com Luvisolos indicando condições mais quentes e goethita com Planossolos indicando condições mais úmidas, favorecendo a formação de mosqueados (Camara et al., 2021).

O processo de pedalização aliado à ocorrência de argilas de alta atividade, os quais são responsáveis pelos processos de expansão e contração em resposta a ciclos de umedecimento e secagem (pedoturbação), são comuns em regiões semiáridas. Esses mecanismos favoreceram o desenvolvimento de estrutura prismática identificadas nos horizontes Bt dos Luvisolos e Planossolos estudados.

Por outro lado, foi observada considerável quantidade de raízes finas e médias amassadas e com rupturas devido à movimentação física dos Luvisolos e Planossolos notadamente na área CP, em que a contração é potencializada devido ao secamento pontual do solo e devido à absorção de águas pela vegetação.

Esses maiores teores de argila, nos horizontes subsuperficiais, são de suma importância em ambientes semiáridos dada à sua elevada capacidade de adsorção de água, contribuindo sobremaneira para o suprimento de água para as plantas em épocas de escassez hídrica. Nesses períodos mais secos, é comum a emissão de raízes de diversos diâmetros em direção aos horizontes subsuperficiais de maior umidade, o que indiretamente contribui para a

infiltração da água nesses solos a partir de canais biológicos ativos. Tal fato pode ainda contribuir para atenuar os efeitos causados pela quebra de capilaridade, característica comum nesses solos com horizontes subsuperficiais com acúmulo de argila sobrejacentes a horizontes superficiais de textura média ou arenosa.

Os teores mais elevados de matéria orgânica nos horizontes A dos Luvisolos na área conservada, provenientes de maior aporte de material vegetal, contribuíram para a formação de estrutura granular. Por outro lado, a intensa exploração dos recursos naturais da área degradada (AD), principalmente a partir da supressão da vegetação nativa, sobrepastoreio de caprinos e ovinos (Araújo et al., 2021) foram os fatores preponderantes para o desenvolvimento de estrutura laminar nos horizontes superficiais dos Luvisolos dessa área.

Esses solos têm como característica um elevado teor de silte e a retirada da vegetação aumentou a exposição do solo ao impacto direto das gotas de chuva, acarretando no rearranjando dessas partículas de forma laminar. Nossos dados confirmam que a manutenção da vegetação além de ser importante para a proteção do solo, também favorece a formação de estruturas que propiciam maior agregação aos solos e que permite maior fluxo de água para os horizontes subsuperficiais.

A identificação em campo de argila recobrindo e cimentando minerais primários, apontam para a formação de minerais secundários de argila *in situ* (argilização) nos horizontes C dos Luvisolos e Planossolos das duas áreas. A ocorrência de raízes finas nesses horizontes pode estar contribuindo com a acidificação de microsítios específicos por meio da liberação de H^+ , contribuindo para o aumento da hidrólise, desestabilizando a estrutura dos minerais primários facilmente intemperizáveis, notadamente biotitas, feldspatos e anfibólios (Figura 7), contribuindo para a formação de argila *in situ*.

O processo de argilização se desenvolve por meio da alteração dos minerais primários e posterior formação de argila *in situ* (Buol & Weed, 1991). Nossas evidências morfológicas são suportadas por estudos anteriores que demonstraram micromorfologicamente que a dissolução de minerais primários e formação da argila *in situ*, ou seja, o processo de argilização é o principal processo pedogenético responsável pela gênese de horizontes Bt de Luvisolo e Planossolo no semiárido brasileiro (Oliveira et al., 2008; Sousa et al., 2020; Câmara et al., 2021).

O elevado gradiente textural nos solos AD (P5, P6 e P7) também devem consideravelmente resultar da perda preferencial de argila e silte fino dos horizontes superficiais por erosão (elutriação). Localmente esse processo é evidenciado a partir da ocorrência de erosão laminar e erosão em sulco aliada à presença de feições erosivas caracterizadas por pequenos pedestais “demoiselles”, que resultam do salpicamento das gotas de chuva diretamente no solo exposto, facilitando a remoção das partículas finas pelo fluxo superficial.

A perda de argila em superfície implica sérios problemas em escala pedológica e de funcionamento dos ecossistemas, uma vez que a perda de partículas coloidais resulta em perdas da retenção de cátions essenciais à nutrição das plantas e à retenção de umidade. Essas feições erosivas não ocorrem na área CP, mais uma vez confirmando a importância da vegetação na proteção dos solos contra perdas de material superficial em ambientes semiáridos e, por conseguinte, para o continuado fornecimento de serviços ecossistêmicos essenciais para a manutenção da capacidade produtiva dessas paisagens naturalmente frágeis.

A forte efervescência com HCl 10% no horizonte Cr do P3 confirma a presença de calcita (CaCO_3). Sua formação provavelmente está relacionada com os teores de Ca^{2+} e HCO_3^- , os quais, por meio de fluxo descendente são lixiviados até a zona onde predomina decréscimo na pressão parcial de CO_2 , com consequente precipitação de calcita pedogênica (Ker et al., 2015). Esses minerais encontram-se aleatoriamente disseminados na matriz e em baixas concentrações nos solos, o que é confirmado pelos baixos teores de CaCO_3 encontrados.

A forte efervescência com água oxigenada (H_2O_2) confirma a ocorrência de manganês nos horizontes Bt1 do P1, Cr do P3 e Bt₁ e Bt₂ do P6. Essas evidências indicam condições de oxidação e redução favoráveis formação desses óxidos, o que é confirmado pelo fato de ocorrer sempre associado a mosqueados avermelhados e/ou a alaranjados, que apontam para formas amorfas de óxidos de Fe.

Em adição, deve-se considerar, também, a contribuição via herança do material de origem, confirmado pela forte efervescência desses materiais com H_2O_2 . No material de origem, esses materiais ocorrem associados a minerais máficos facilmente intemperizáveis, indicando gênese relacionada com os processos de formação do segmento melanocrático do gnaisse.

Os Planossolos (P2 e P6) de ambas as áreas estão localizados no terço superior de vertentes convexo-côncavas, posição essa mais elevada quando comparado com os demais solos. Geralmente esses solos ocorrem em áreas mais rebaixadas e aplainadas da paisagem, onde há estagnação sazonal ou periódica de água (Santos et al., 2018).

Nas condições estudadas, a gênese desses solos provavelmente está relacionada com a curvatura côncava do terreno, o que favorece maiores condições para estagnação da água e estabelecimento de condições hidromórficas temporárias. A disposição e maior resistência de parte da litologia gnáissica também está contribuindo para esse regime mais conservador de umidade.

Os horizontes E, Bt1 e Bt2 do P2 da AP apresentam mosqueados (2,5YR 4/8, úmido) e (10YR 4/6, úmido) respectivamente, no qual devem estar relacionados com a formação de lençol suspenso no topo do horizonte Bt, o que pode estar gradualmente contribuindo para a instauração do processo de ferrólise. A identificação de partes do horizonte E no interior do horizonte Bt (transição descontínua) é uma evidência desse processo. Por outro lado, o Planossolo da AD não apresentou mosqueados, sendo seu matiz composto predominantemente por cores acinzentadas (10YR 3/2, úmida). Tal fato aponta para um período mais prolongado de estagnação de água, o que pode ter promovido a redução e a remoção de boa parte do ferro do perfil.

Os maiores valores de ADA nos horizontes subsuperficiais (B texturais) dos perfis P1, P2, P3, P5, P6 e P7 podem estar relacionados com a considerável ocorrência de minerais expansíveis 2:1. Estudos têm mostrado que os processos de bissialitização e monossialitização ocorrem de forma concomitante em Luvisolos e Planossolos da região semiárida, destacando-se a forte influência dos minerais 2:1 beidelita, nontronita (esmectitas) e vermiculita nas propriedades desses solos (Camara et al., 2021). A presença destes minerais aumenta a quantidade de cargas negativas nos solos, causando dispersão dada à repulsão com as cargas negativas de outros filossilicaos e a matéria orgânica. Esse fato pode ser confirmado pelos valores negativos de ΔpH , principalmente nos horizontes Bt, onde o processo de argilização é mais pronunciado.

A análise mineralógica na fração argila dos horizontes diagnósticos dos perfis P1 e P6 constataram a presença de esmectita pela reflexão a 1,923 nm e vermiculita pelo pico a 1,420

após saturação com Mg e solvatação com glicerol. O pico em 1,296 (P6) na amostra de argila natural pode estar relacionado com a ocorrência de esmectitas sódicas (Figura 8).

Os altos teores de percentagem de sódio trocável (PST) dos horizontes E, Bt1 e Bt2 do P2 e Bt1, Bt2 e Cr do P6, provavelmente, também, podem estar contribuindo para os maiores teores de ADA, pois, quando o Na^+ predomina na CTC, há aumento na expansão da dupla camada difusa e, dessa forma, dificulta a aproximação das partículas de argila (Brady e Weil, 2013).

Por outro lado, os elevados valores de ADA do P4 podem ser explicados pela sua natureza arenosa, na qual predominam minerais de baixa reatividade e pelos baixos valores de matéria orgânica, no qual reduzem a capacidade de interação com outras partículas do solo, desfavorecendo o processo de agregação e facilitando a dispersão dos colóides.

A intensa exploração dos recursos naturais e dos solos na AD são os fatores responsáveis pelo avançado estágio de degradação que a área se encontra atualmente (Araújo et al., 2021). Elevados valores de Ds nos horizontes superficiais dos perfis P5, P6 e P7, aliados à estrutura laminar na superfície do P5 e P7 confirmam a atuação da antrossolização nesses solos. Estrutura prismática em horizontes A é comum somente quando a camada superficial do solo sofre uma grande pressão devido ao manejo inadequado, contribuindo para a compactação e posterior desenvolvimento desse tipo de estrutura (Resende et al., 2019).

A ausência de cobertura também pode estar contribuindo para o maior ressecamento das camadas superficiais, promovendo o fendilhamento dos solos e, por conseguinte, a formação gradual da estrutura prismática. Concomitante a isso, a relação silte/argila superior a 1,4 da área aponta para níveis elevados de silte na superfície dos solos, que quando expostos ao salpicamento das gotas de chuva podem estar contribuindo para o encrostamento superficial, feição essa fortemente evidenciada nos perfis localizados na AD. Na área de CP, onde ocorrem as mesmas classes de solos, os valores da relação silte/argila também são elevados. Entretanto, na área não foi encontrada feições de encrostamento, demonstrando a importância da vegetação na proteção dos solos contra os efeitos adversos do impacto das chuvas.

Os valores de ΔpH indicaram predominância de carga líquida negativa na superfície dos coloides de todos os solos. À exceção dos horizontes A e E do Planossolo (P2), todos os demais horizontes são hipereutróficos ($V\% > 75\%$) (Oliveira, 2007). Esses elevados valores de

V% é comum em solos do semiárido, uma vez que as condições climáticas dessa região favorecem a manutenção dos cátions básicos devido às reduzidas taxas de lixiviação. (Ferreira et al., 2015; Camara et al., 2021).

Essas bases são oriundas da considerável contribuição de mineiras primários facilmente intemperizáveis, tais como biotitas, anfibólios e feldspatos, liberados ao longo do intemperismo granitos, gnaisses e anfibolitos (Camara et al., 2021). A presença da vegetação contribuiu para os maiores valores de SB, principalmente nos horizontes superficiais, dos solos da AP em relação aos solos da AD, sendo esse fato confirmado pelos maiores valores de COT que a AP possui. Ao contrário do que é observado em solos de regiões tropicais, a disponibilidade dos cátions básicos aumenta em profundidade devido à considerável presença de minerais primários facilmente intemperizáveis, os quais estão constantemente liberando cátions para os solos.

Os maiores teores de potássio (K^+) foram encontrados nos horizontes superficiais de todos os sete perfis. Esses valores podem estar relacionados com a presença de feldspatos e de moscovitas e com a ciclagem de nutrientes advindo da matéria orgânica (Curi et al., 2005). A variação nos teores de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) ao longo dos perfis estudados, possivelmente pode estar relacionada com a liberação desses elementos pelos minerais primários máficos (anfibólio e biotita) (Curi et al., 2005).

Os elevados valores de percentagem de sódio trocável (PST%) dos horizontes diagnósticos do P2 e P6 são suficientes para o enquadramento desses solos como Nátricos. Estes elevados teores de Na^+ são aportados notadamente via intemperismo de plagiocásios sódicos (albita) (Camara et al., 2021). A diminuição do teor de sais, decréscimo nos valores de CE ($<4 \text{ dS m}^{-1}$) e acúmulo de Na^+ contribuem para o processo de sodificação, o qual é acompanhado por elevados valores de pH, podendo ser prejudiciais ao desenvolvimento das plantas (Ker et al., 2012).

Os baixos valores de condutividade elétrica (CE) nos perfis evidenciam baixas concentrações de sais solúveis na solução dos solos e, conseqüentemente, condições adequadas para o desenvolvimento vegetal.

A retirada da vegetação aliada ao sobrepastoreio intensificaram os processos erosivos e a conseqüente degradação dos solos na AD (Araújo et al., 2021). Além do fato da degradação da área em contribuir com os menores sequestros de C e N no sistema, esses

menores aportes podem ser influenciados, de forma bem menos intensa, pela presença de rebanhos de caprinos e ovinos, os quais comem as poucas folhas secas que caem da vegetação arbórea de algumas das poucas espécies presentes na área a partir do início da estação seca (Araujo filho, 2013). Tal fato acarretou em perdas significativas nos teores de COT e NT quando comparados com os solos sob vegetação. Esses impactos foram mais pronunciados nos horizontes superficiais, dada à exposição aos agentes erosivos. O continuado aumento dessa exposição promoveu a perda da qualidade física e química desses horizontes superficiais, que combinado com a baixa permeabilidade dos horizontes subsuperficiais argilosos, intensificou as perdas de carbono e nitrogênio do sistema (Costa et al., 2016).

A matéria orgânica em solos com cobertura vegetal permanece mais estável, enquanto em áreas onde os solos estão degradados ocorre uma redução acentuada no seu conteúdo (Chen et al., 2004). Esta redução acarreta consideráveis perdas de nutrientes, redução na estabilidade de agregados e menor retenção de água, tonando os solos mais vulneráveis aos processos erosivos. Esses processos são potencializados em solos arenosos e/ou textura média, como é o caso dos horizontes superficiais dos solos das duas áreas estudadas e do Neossolo Regolítico (Tabelas 3 e 4), pois os baixos teores de argila diminuem a possibilidade de formação de complexos organominerais que conferem maior estabilidade ao carbono nitrogênio (Solins et al., 1996; Anjos et al., 2008).

De fato, a textura do solo é um dos fatores que contribuem para acelerar a decomposição da MOS pelos microrganismos e, conseqüentemente, liberar CO₂ para a atmosfera, em que solos argilosos tendem a proteger de forma eficiente COT do que solos arenosos em condições semelhantes (Lal et al., 2015). Os solos da CP estão sob vegetação de caatinga preservada, onde a partir da constante deposição de resíduos vegetais e a ausente pressão antrópica contribuiu para maiores aportes de C e N e, por conseguinte, em maior sequestro desses elementos nos solos. Por outro lado, a supressão da vegetação proporciona perda na ciclagem de nutrientes, redução no aporte de C e N e indiretamente contribui para o aumento na emissão de CO₂, visto que o solo exposto se encontra mais susceptível a radiação solar, acelerando a atividade microbiana e a decomposição da MOS.

Esses dados confirmam observações anteriores no sentido de que em áreas de caatinga com vegetação preservada os teores de C e N são maiores do que em áreas onde os solos se encontram degradados (Galindo et al., 2008). Nossos dados também indicam que os solos do

Cariri apresentam teores de COT e NT superiores ou inferiores a outros solos de Caatinga preservada (Traoré et al., 2015; Santana et al., 2019; Neves et al., 2020).

Como esperado, os maiores teores de COT e NT foram encontrados nos horizontes superficiais, notadamente nos solos da CP. Tal fato é devido a maior proximidade dessas camadas com a vegetação de caatinga densa, que além de disponibilizar nutrientes ao solo e contribuir para formação de serapilheira, formada pelo acúmulo de material vegetal (raízes, galhos, caules, folhas e frutos), exerce uma importante proteção contra a ação direta das gotas da chuva (Anjos et al., 2008). Tal fato assume ainda mais importância nas regiões semiáridas devido às chuvas concentradas no início do período chuvoso, quando a vegetação caducifólia se encontra sem folhas devido ao longo período de estiagem (Lopes et al., 2009).

Os valores mais elevados de ECOT e ENT em profundidade, em relação aos horizontes superficiais, são devido a maior espessura dos horizontes diagnósticos. Dessa forma, foi constatado que apesar dos baixos teores de C em subsuperfície, a maioria dos horizontes subsuperficiais contribuiu com mais da metade dos estoques totais de C do solo, sendo, dessa forma, importe considera-los no ciclo global desse elemento (Rumpel e Kögel-Knabner, 2011).

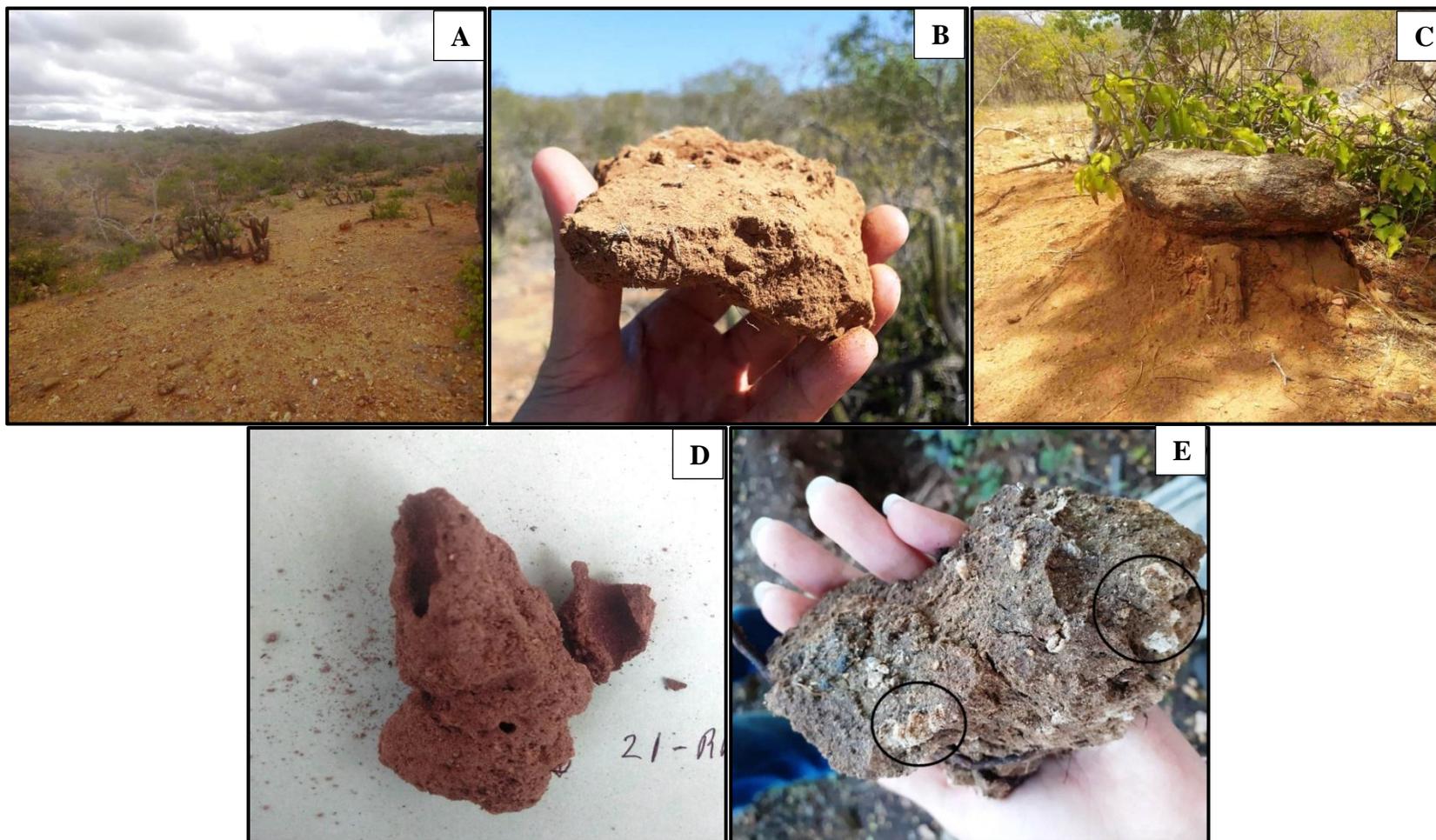
Os estoques de COT e NT têm como principais controladores o clima e as condições de cobertura do solo (Yigini; Panagos, 2016). É entendido que em um solo compactado a porosidade total é reduzida, acarretando em um aumento na densidade do solo, o que causa a redução na infiltração de água, aumento do escoamento superficial (Rabot et al., 2018) e, como consequência, contribuir para as perdas nos teores e estoques de COT e NT nesses solos. Normalmente, as regiões desertificadas apresentam baixos estoques de carbono por unidade de área, sendo que a extensão dessas regiões fornece uma alta capacidade de armazenamento (LI et al., 2019).

Os baixos valores de ECOT e ENT do P7 da AD (Tabela 9) em relação aos outros dois solos dessa área, podem ser explicados pelo fato desse solo se encontrar em um ponto em que a degradação está em um nível mais intenso, contribuindo para esses valores mais baixos em relação ao P5 e P6. O P2 da AD obteve valores muito superiores nos ECOT e ENT aos obtidos pelo P6 presente na área degradada da EESCJ.

À semelhança, foram encontrados estoques de CT em Planossolos de área degradada e preservada no Estado de Pernambuco de 60 Mg ha^{-1} e 31 Mg ha^{-1} , respectivamente (Neves et

al., 2021). Esses autores também encontraram estoques de NT de $3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $3,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ em área degradada e preservada, respectivamente.

Figura 9 - a) área degradada onde se situam os perfis P5, P6 e P7; b) estrutura laminar do horizonte A do P7; c) Ocorrência de “demoiselles” na área degradada; d) estrutura biogênica encontrada no P1 e e) carbonato de cálcio (CaCO_3) no horizonte Bt do P2.



4 CONCLUSÕES

Os processos que resultaram na degradação da área da EESJC (AD) impactaram na capacidade dos solos de sequestrar e estocar C e N quando comparados aos solos das mesmas classes da AP.

A intensa exploração dos recursos naturais impactou os SE de suporte dos solos da EESJC (AD), que é a base para todos os outros serviços. O selamento superficial, que acomete esses solos, afetou negativamente nas suas funções naturais, podendo ter causado a perda ou redução dos serviços de regulação.

O processo de degradação dos solos da CD influenciou nos atributos morfológicos, químicos e, principalmente, os físicos quando comparado com as mesmas classes de solos da AP.

Rubeificação, argilização, elutriação, pedalização e sodificação se mostraram os principais processos pedogenéticos específicos atuantes na gênese dos solos estudados.

REFERÊNCIAS

- ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M.G.; FONTANA, A. Matéria orgânica e pedogênese. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. Q. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2 ed. Porto Alegre: Metropole, 2008. p. 65–86.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L., SENTELHAS; P.C., GONÇALVES, J.L.M.; Sparovek, G Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologisc e eitsc rift** Vol. 22, No. 6, p711–728, 2013.
- ARAÚJO FILHO, J.A., 2013. Caracterização física do Semiárido Nordeste. Manejo pastoril sustentável da Caatinga. **Projeto Dom Helder Câmara**, Recife-PE.
- ARAUJO, H. F., MACHADO, C. C., PAREYN, F. G., DO NASCIMENTO, N. F., ARAÚJO, L. D., DE AP BORGES, L. A., DA SILVA, J. M. C. A sustainable agricultural landscape model for tropical drylands. **Land Use Policy**, v. 100, p. 104913, 2021.
- BARBOSA M.R.V., PAREYN F.G.V. & LIMA J.R. 2015. Plano de Manejo – **Reserva Particular do Patrimônio Natural Fazenda Almas**. Recife, Associação Plantas do Nordeste – APNE.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 704p.
- BRASIL. Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba. Rio de Janeiro: **Ministério da Agricultura/Sudene**, 1972.
- BUOL, S.W., WEED, S.B., 1991. Saprolite-soil transformations in the Piedmont and mountains of North Carolina. **Geoderma** 51, 15–28.
- 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 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.
- CHEN, C. R.; XU, Z. H.; MATHERS, N. J. Soil carbon pools in adjacent natural and plantation forests of subtropical Australia. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 1, p. 282-291, 2004.
- COSTA, T.L., SAMPAIO, E.V.S.B., ACCIOLY, L.J.O., ALTHOFF, T.D., PAREYN, F.G.C., ALBUQUERQUE, E.R.G.M., MENEZES, R.S.C., 2014. Root and shoot biomasses in the tropical dry forest of semi-arid Northeast Brazil. **Plant Soil** 378, 113–123.
- DE SOUSA, J. E. S., DOS SANTOS, J. C. B., CORRÊA, M. M., DO NASCIMENTO, A. F., SCHULZE, S. M. B. B., FERREIRA, T. O., ... & DE SOUZA JÚNIOR, V. S. Mineralogy and genesis of Planosols under a semi-arid climate, Borborema Plateau, NE Brazil. **Catena**, v. 184, p. 104260, 2020.
- DOS 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.

- GALINDO, I. C. D. L., RIBEIRO, M. R., SANTOS, M. D. F. D. A. V., LIMA, J. F. W. F., & FERREIRA, R. F. D. A. Relações solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no município de Jataúba, PE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1283-1296, 2008.
- FERREIRA, J. T. P., RIBEIRO, M. R., SOUZA, V. S. D., BITTAR, S. M. B., & SANTOS, R. G. D. Planosols developed in different geoenvironmental conditions in northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016.
- JACKSON, M.L. Soil chemical analysis: a advanced course. 2 ed. Madison: Wisconsin, 2005. 930p
- JACOMINE, P.K.T.; MELO FILHO, H.F.R.; MONTENEGRO, J.O.; RIBEIRO; M.R. & SILVA, A.P. Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado da Paraíba. II. Interpretação para uso agrícola dos solos do Estado da Paraíba. **Embrapa Solos - Séries anteriores (INFOTECA-E)**, 1972.
- KÄMPF, N. & CURTI, N. Formação e evolução do solo (Pedogênese). In: KER, J.C.; CURTI, N.; SCHAEFER, C.E.; VIDAL-TORRADO, P. (Eds.) **Pedologia: Fundamentos. Soc. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, 2012, p. 207-302.
- KER, J. C., CURTI, N., SCHAEFER, C. E. G. R., & VIDAL-TORRADO, P **Pedologia: fundamentos**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.
- LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v. 304, p.1623-1627, 2004.
- LAL, R., NEGASSA, W., & LORENZ, K. Carbon sequestration in soil. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 15, p. 79-86, 2015.
- LI, Q., YANG, D., JIA, Z., ZHANG, L., ZHANG, Y., FENG, L., ... & ZHAO, X. Changes in soil organic carbon and total nitrogen stocks along a chronosequence of Caragana intermedia plantations in alpine sandy land. **Ecological Engineering**, v. 133, p. 53-59, 2019.
- LOPES, J. F. B.; ANDRADE, E. M.; LOBATO, F. A. O.; PALÁCIO H. A. Q.; ARRAES, F. D.D. Deposição e decomposição de serapilheira em área da Caatinga. **Revista 75 Agro@mbiente on-line-line**, v. 3, n. 2, p. 72-79, 2009.
- MEHRA, O.P., JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clay by dithionite citrate system buffered with soil bicarbonate. *Clay Clay Miner.* 7:317-327, 1960.
- TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., & TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, **Embrapa**. 573p, 2017.
- NEVES, LAÉRCIO VIEIRA DE MELO WANDERLEY et al. Microbial abundance and C and N stocks in tropical degraded Planosols from semiarid northeastern Brazil. **Catena**, v. 196, p. 104931, 2021.
- OLIVEIRA, VA de. Manual técnico de pedologia. **Rio de Janeiro: IBGE**, 2007.
- OLIVEIRA, L.B., FONTES, M.P.F., RIBEIRO, M.R., KER, J.C., 2008. Micromorfologia e gênese de Luvisolos e Planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas no semiárido brasileiro. **Rev. Bras. Cienc Solo** 32, 2407–2423.

- PAES-SILVA, A. P.; CHAVES, I. B.; SAMPAIO, E. V. S. B. Cobertura vegetal da bacia hidrográfica do açude namorado no cariri oriental paraibano. **Revista Agropecuária Técnica**. Areia, v.24, n.1, p., 2003.
- RABOT, E., WIESMEIER, M., SCHLÜTER, S., & VOGEL, H. J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122-137, 2018.
- RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J.C.; RESENDE, S.B. **Mineralogia de solos brasileiros: interpretação e aplicações**. 1ed. Lavras: UFLA, 2005. 192p.
- RESENDE, M; CURI, N; POGGERE, G.C; BARBOSA, J.Z; POZZA, A.A.A. **Pedologia, Água, e Planta**. Editora UFLA, 2019.
- RUMPEL, C., & KÖGEL-KNABNER, I. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. **Plant and soil**, v. 338, n. 1, p. 143-158, 2011.
- SOLLINS, P., HOMANN, P., & CALDWELL, B. A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, v. 74, n. 1-2, p. 65-105, 1996.
- SANTOS, E.J.; FERREIRA, C.A.; SILVA JR., J.M.F. (2002). (Org.). **Geologia e recursos minerais do Estado da Paraíba**. Recife: CPRM, 142p.
- SILVA SANTANA, MÔNICA et al. Carbon and nitrogen stocks of soils under different land uses in Pernambuco state, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 16, p. e00205, 2019.
- TRAVASSOS, IBRAHIM SOARES; SOUZA, B. Desmatamento e desertificação no cariri paraibano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 01, p. 103-116, 2014
- TRAORÉ, S., OUATTARA, K., ILSTEDT, U., SCHMIDT, M., THIOMBIANO, A., MALMER, A., & NYBERG, G. Effect of land degradation on carbon and nitrogen pools in two soil types of a semi-arid landscape in West Africa. **Geoderma**, v. 241, p. 330-338, 2015.
- YEOMANS, Jane C.; BREMNER, John Michael. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.
- YIGINI, Y., & PANAGOS, P. Assessment of soil organic carbon stocks under future climate and land cover changes in Europe. **Science of the Total Environment**, v. 557, p. 838-850, 2016.

CAPÍTULO II

VARIABILIDADE LATERAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE SOLOS EM CAATINGA PRESERVADA E DEGRADADA NO CARIRI DA PARAÍBA

RESUMO

A variabilidade dos atributos em um solo está estritamente relacionada com diversos fatores, sobretudo com os processos pedogenéticos gerais e específicos. Estudos focados em compreender a variabilidade de determinados atributos em nível de perfil do solo são escassos principalmente no cariri paraibano. O objetivo deste estudo foi empregar a técnica da geoestatística para identificar a variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos de Luvisolos do semiárido paraibano sob vegetação em regeneração e sob avançado processo de degradação. A geoestatística aliada à krigagem é capaz de identificar e mapear zonas em que é possível mostrar o grau de dependência espacial e interpolação de dados sem tendência em pontos não amostrados para confecções de mapas de isolinhas. Foram selecionados dois perfis de Luvisolos Crômicos em áreas distintas para detecção da variabilidade espacial dos atributos estudados, um sob caatinga preservada (P1) e o outro sob caatinga degradada (P2). Foi avaliada a variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , SB, C, N, areia, silte e argila. A partir da interpolação dos valores utilizando a geoestatística foi possível detectar que o P1 apresentou seus maiores teores de P disponível no horizonte A, enquanto que no P2 os maiores teores se concentraram no horizonte Cr. Os maiores valores de soma de bases (SB) no P1 estão situados no horizonte A, enquanto que no P2 esses valores vão aumentando à medida que se aprofunda no perfil. No P1 os maiores teores de COT MOS estão situados no horizonte A, enquanto que no P2 os maiores valores estão situados em uma zona mais intermediária do perfil horizonte Bt. Os atributos estudados se mostraram mais variáveis no P2 sob CD.

Palavras-Chave: Semiárido; variabilidade espacial; Luvisolos.

ABSTRACT

The variability of attributes in a soil is strictly related to several factors, especially with general and specific pedogenetic processes. Studies focused on understanding the variability of certain attributes at the soil profile level are scarce, especially in Cariri, Paraíba. The objective of this study was to use the technique of geostatistics to identify the spatial variability of chemical and physical attributes of Luvisols in the semiarid region of Paraíba, under regenerating vegetation and under advanced degradation process. Geostatistics allied to kriging is able to identify and map zones in which it is possible to show the degree of spatial dependence and interpolation of data without trend at unsampled points for making isoline maps. Two profiles of Chromic Luvisols were selected in different areas to detect the spatial variability of the attributes studied, one under preserved caatinga (P1) and the other under degraded caatinga (P2). The spatial variability of chemical and physical attributes Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , SB, C, N, sand, silt and clay were evaluated. From the interpolation of values using geostatistics, it was possible to detect that P1 presented its highest levels of available P in the A horizon, while in P2 the highest levels were concentrated in the Cr horizon. The highest values of sum of bases (SB) in P1 are located in the A horizon, while in P2 these values increase as the profile goes deeper. In P1, the highest TOC MOS contents are located in the A horizon, while in P2 the highest values are located in a more intermediate zone of the Bt horizon profile. The attributes studied were more variable in P2 under CD.

Keywords: semiarid; spatial variability; Luvisols.

1 INTRODUÇÃO

As terras secas cobrem aproximadamente 29,8% da superfície da terra e dentro dessa região estão localizados os ecossistemas áridos e semiáridos (Wang et al., 2014) No Brasil, esses ecossistemas são encontrados na região semiárida brasileira (SAB), caracterizada pelos baixos índices pluviométricos, baixa umidade relativa do ar, chuvas concentradas em determinada época do ano e solos susceptíveis à erosão e à salinidade (Correia et al., 2011; Macedo et al., 2021).

No SAB encontra-se a microrregião do Cariri paraibano (Cariris Velhos), que apresenta os menores índices pluviométricos do bioma caatinga, temperaturas médias elevadas (cerca de 27°C), déficit hídrico acentuado e solos altamente susceptíveis aos processos erosivos. Além disso, nessa região os níveis de degradação atingiram níveis acentuados e, por vezes, irreversíveis, ao ponto de ser considerado um Núcleo de Desertificação (Souza et al., 2009).

A variabilidade dos atributos dos solos está associada à complexa interação dos fatores de formação (Ferreira et al., 2015). O conhecimento da variabilidade dos atributos químicos e físicos do solo assume importância por contribuir para adoção de formas de manejo mais adequadas. No Cariri, essa avaliação pode ainda identificar os atributos pedológicos diretamente alterados pelos processos de degradação e/ou desertificação, e que podem ser utilizados em estudos de indicadores desses processos nessa região de reconhecida vulnerabilidade ambiental.

A geoestatística tornou-se uma ferramenta fácil e rápida para especializar a variabilidade dos atributos dos solos (Vieira et al., 2002) A técnica mais amplamente utilizada para avaliar e caracterizar a variabilidade espacial e temporal dos atributos dos solos é a partir da análise de semivariogramas (Santos et al., 2012). Outros estudos dessa natureza têm avaliado a variabilidade espacial do carbono orgânico do solo e nutrientes disponíveis sob diferentes topografias e usos do solo, estabelecido a distribuição espacial para adequada visualização do perfil do solo e verificado o efeito do fogo no comportamento e na variabilidade espacial dos atributos químicos do solo sob mata (Tao et al., 2018; Mesquita et al., 2020; Sun et al., 2020).

Apesar do exposto, a maioria dos estudos que utiliza a geoestatística para verificar a variabilidade espacial dos atributos do solo concentram as pesquisas na avaliação da parte

superficial do solo (Silva et al., 2019). Ainda, estudos de variabilidade de solos em ambientes semiáridos ainda são raros (Alves, 2019), notadamente quando se refere aos efeitos da degradação dos solos comparativamente com áreas em regeneração. Nesse sentido, buscou-se avaliar os efeitos da degradação na dinâmica dos solos da região semiárida e seus impactos na prestação de serviços ecossistêmicos locais. Para isso testou-se a hipótese que os impactos negativos à qualidade física e química dos solos pelo processo de antrossolização podem ser detectados com a utilização da técnica de geoestatística por meio de malhas amostrais de curtas distâncias.

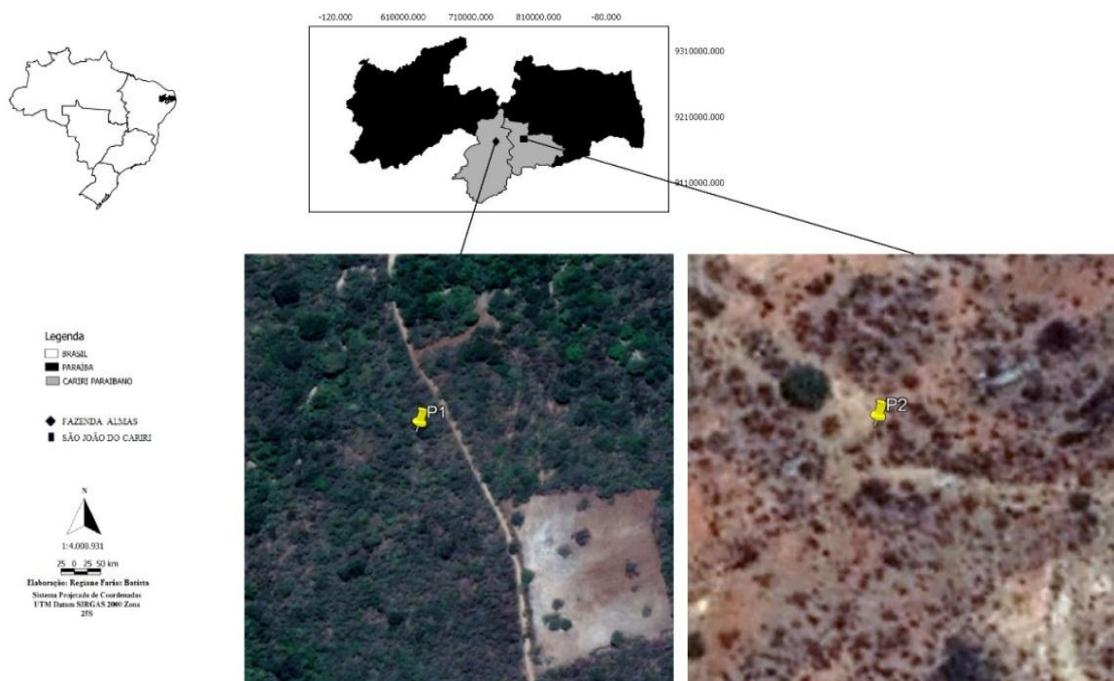
O objetivo desta pesquisa foi empregar a técnica da geoestatística para identificar a variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos de Luvisolos do semiárido paraibano sob vegetação preservada e sob avançado processo de degradação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição das áreas estudadas

O trabalho foi realizado em duas localidades na microrregião do Cariri Paraibano. A primeira área é a Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN), inserida na Fazenda Almas, localizada no município de São José dos Cordeiros - PB. Nessa Reserva, os recursos naturais encontram-se preservados há aproximadamente 40 anos. A segunda área está inserida na Estação Experimental da Universidade Federal da Paraíba, Campus II – CCA, localizada no município de São João do Cariri – PB. Essa área possui 70% do território em avançado estágio de degradação, constituindo um núcleo de desertificação. Detalhes da caracterização biótica e abiótica das áreas estão relatados no capítulo anterior.

Figura 10 - Mapa do Brasil, estado da Paraíba e localização de São João do Cariri e São José dos Cordeiros no.

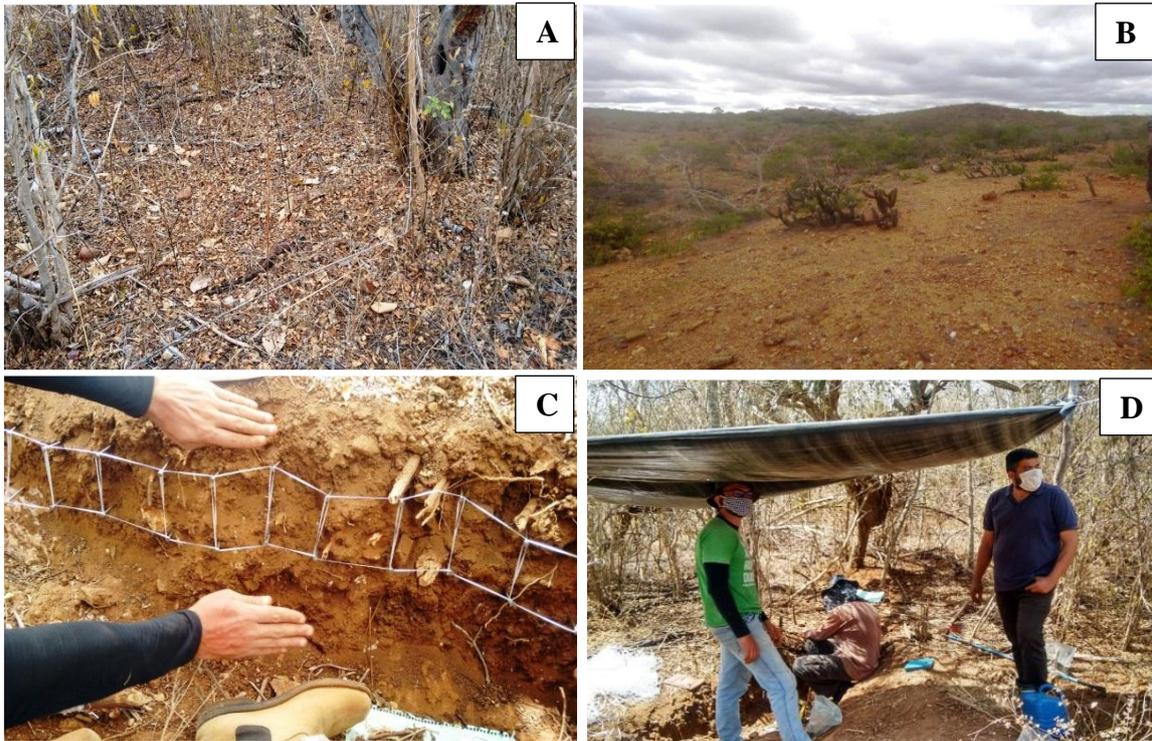


2.2 Determinação dos grids nos perfis dos solos

Foi constatado o predomínio de Luvisolos Crômicos a partir da identificação em campo das principais unidades de solo nas duas paisagens. Essa etapa envolveu

caminhamento livre, avaliações solo-paisagem e tradagens na área. Em ambos os locais, foi aberta uma trincheira com o objetivo de estudar a variabilidade dos atributos dos solos. Os solos aqui estudados correspondem ao P1 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico lítico (P1) e o P2 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico vertissólico (P7) apresentados no Capítulo I.

Figura 11 - A) área do P1; B) área do P2 e C) e D) determinação dos grids amostrais em campo.



Dado os diferentes níveis de desenvolvimento pedogenéticos dos solos, as profundidades das trincheiras foram alteradas. Na Fazenda Almas a trincheira teve 1,80 m de largura e 0,4 m de profundidade, enquanto na EESJC a dimensão da trincheira foi de 1,8 de comprimento e 0,5 m de profundidade.

Em ambos os perfis uma malha regular foi estabelecida. A amostragem foi do tipo sistemática e realizada em pontos equidistantes a cada 20 cm, com cada cédula apresentando 20 cm x 10 cm (200 cm²). A amostragem foi realizada em 40 pontos no P1 (Figura 13) e 50 pontos no P2 (Figura 14). O solo foi coletado no centro de cada cédula das malhas. Em seguida, as amostras foram identificadas e transportadas para o DSER-UFPB e o INSA, onde foram secos ao ar e submetidos a análises físicas e químicas.

Figura 12 - Grid estabelecido no perfil do solo (P2) para posterior coleta e determinação da variabilidade espacial dos atributos.



Figura 13 - Esquema de amostragem sistemática utilizado no P1 para determinação do grid.

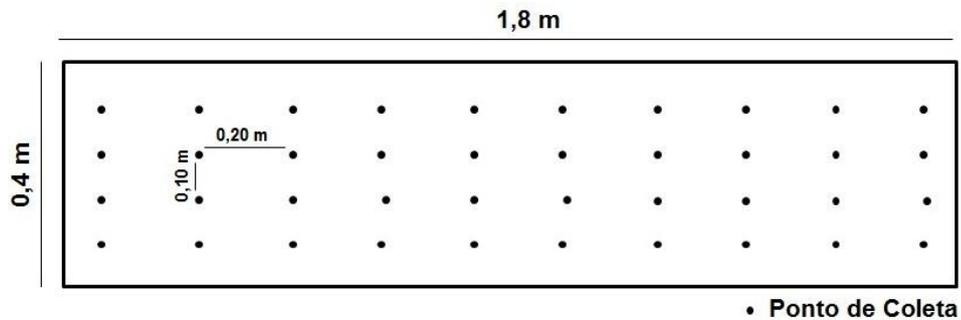
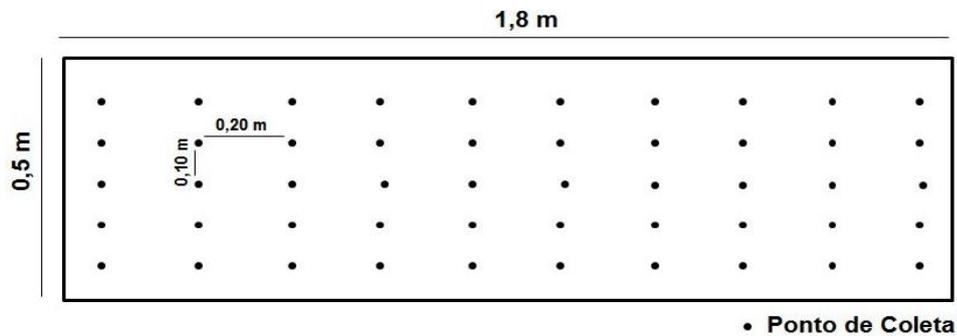


Figura 14 - Esquema de amostragem sistemática utilizado no P2 para determinação do grid.



Os parâmetros físicos e químicos avaliados foram teores de areia, silte e argila, pH (H₂O), matéria orgânica do solo, carbono orgânico total (COT), P, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺ e os físicos foram: areia, silte e argila. Detalhes dos procedimentos metodológicos para determinação dessas variáveis estão descritas no capítulo I.

A matéria orgânica foi determinada pelo método da mufla e a partir dos valores obtidos da matéria orgânica do solo foi estimado os teores de carbono orgânico (CO) do solo pela metodologia baseada em Pribyl (2010) usando-se o fator de conversão CO= MO/1,95.

2.3 Estatística descritiva, geoestatística e multivariada (ACP)

Antes da realização da análise geoestatística, os dados foram submetidos à análise exploratória por meio da estatística descritiva, sendo calculados os parâmetros média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, valor máximo, valor mínimo, assimetria, curtose e coeficiente de variação. A análise de distribuição de frequência dos dados para verificar a sua normalidade foi realizada a partir do emprego do teste de Shapiro-Wilk $p < 0,05$ por meio do software Past 3.

O início da análise geoestatística foi realizado pela construção dos semivariogramas de modo a permitir verificação da dependência espacial dos atributos do solo. A análise da dependência espacial foi realizada utilizando-se o software GS+ Versão 7 (Gamma Design Software, 2004), o qual faz cálculos de semivariâncias amostrais conform expressão abaixo (Vieira et al., 2000).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z_{(xi+h)} - Z_{(xi)}]^2$$

Em que:

$N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ são separados por uma distância h (Vieira, 2000). O semivariograma é representado pelo gráfico $\gamma(h)$, versus h . Os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (o efeito pepita, C_0 ; patamar, C_0+C_1 ; e o alcance, a).

Para o ajuste dos modelos teóricos dos semivariogramas foi utilizado o método da tentativa e erro. Esse método é baseado no ajuste manual dos semivariogramas até a obtenção do melhor ajuste, levando-se em conta a menor soma de quadrado dos resíduos (SQR) e o maior valor de coeficiente de determinação R^2 .

Os modelos de semivariogramas considerados foram o esférico, exponencial e o gaussiano. Para a análise geoestatística e com a finalidade de se obter os melhores ajustes dos modelos, os valores considerados “outliers” foram retirados das bases de dados. Após a definição dos modelos de semivariogramas teóricos, os parâmetros dos modelos ajustados foram utilizados para se obter estimativas em locais não amostrados, por meio da “cross-

validation” ou validação cruzada, a qual avalia a qualidade da estimativa realizada pela krigagem.

Para analisar o grau da dependência espacial (GDE) dos atributos estudados, calculado a partir da relação entre o efeito pepita (C0) e o patamar (C + C0), foi utilizado a classificação de Cambardella et al (1994). Foi considerado GDE forte quando a razão é $\leq 25\%$; GDE moderado quando a razão está entre 25-75%- e GDE fraco quando a relação é $\geq 75\%$.

Para verificar a distribuição da variabilidade das variáveis estudadas, foi realizada a construção de mapas dos atributos do solo, sendo empregada a técnica da krigagem na construção dos mapas de isolinhas. O software utilizado para elaboração dos mapas foi o Surfer 15.0 (Golden Software, 1999). Os dados foram submetidos à análise de componentes principais (PCA), realizada com o software R versão 4.05.

Depois do ajuste dos semivariogramas, os modelos ajustados foram utilizados para realização da interpolação por krigagem e depois a construção dos mapas de isolinhas relacionados aos atributos estudados de ambos os perfis, permitindo, assim, uma visualização da variabilidade espacial desses atributos nos perfis por completo e entre horizontes. A partir dos mapas foi possível observar isolinhas, ou contornos gerados pela interpolação após a utilização da técnica da krigagem ordinária.

Para uma melhor compreensão da variabilidade e distribuição dos atributos observados nos mapas de isolinhas, foram construídos gráficos box-plot para todos os atributos estudados, esses gráficos mostrarão a distribuição dos valores em profundidade nos perfis dos solos. Os gráficos de blox-plots junto com os mapas de isolinhas permitiram uma melhor compreensão das suas variabilidades nos eixos horizontais e verticais dos perfis.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise exploratória descritiva referente aos atributos físicos e químicos dos perfis P1 e P7 são apresentados na Tabela 9.

Tabela 10 - Estatística descritiva dos atributos químicos e físicos do P1 e do P2.

Atrib ¹ .	Unid ²	Min ³	Máx ⁴	Média	Med ⁵	DP ⁶	CV (%) ⁷	Assim ⁸	Curt ⁹	W ¹⁰
P1 - sob Caatinga preservada										
pH	---	6,53	8,41	7,64	7,63	0,37	4,84	-0,94	2,35	ns
CT	g kg ⁻¹	14,38	49,42	22,64	20,89	6,67	29,46	2,40	6,58	ns
MOS	g kg ⁻¹	28,05	75,25	43,37	40,70	10,51	24,23	1,70	2,63	ns
P	mg kg ⁻¹	3,88	15,41	7,89	7,29	3,30	41,88	0,56	-0,76	ns
Ca²⁺	cmol _c kg ⁻¹	2,80	5,90	3,70	3,41	0,77	20,81	1,41	1,43	ns
Mg²⁺	cmol _c kg ⁻¹	0,50	3,30	1,54	1,60	0,52	33,77	0,93	2,59	ns
Na⁺	cmol _c kg ⁻¹	0,09	0,24	0,14	0,13	0,04	26,24	1,20	0,55	ns
K⁺	cmol _c kg ⁻¹	0,27	1,56	0,76	0,48	0,47	61,28	0,48	-1,51	ns
SB	cmol _c kg ⁻¹	4,08	10,46	7,32	7,38	1,69	23,13	-0,12	-0,85	ns
Areia	g kg ⁻¹	413	821	643,20	645,5	57,98	9,01	-0,79	7,30	ns
Silte	g kg ⁻¹	79	327	138,96	139	39,83	28,67	2,63	12,21	ns
Argila	g kg ⁻¹	160	300	222,88	220	36,49	16,37	0,18	-0,44	ns
P7 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico vertissólico										
pH	---	7,03	7,88	7,52	7,57	0,22	2,92	-0,45	-0,78	ns
CT	g kg ⁻¹	9,15	20,78	14,53	14,68	2,15	14,80	0,11	1,46	*
MOS	g kg ⁻¹	17,85	40,53	28,33	28,61	4,20	14,82	0,11	1,46	*
P	mg kg ⁻¹	0,22	39,80	7,61	2,77	10,02	131,68	1,82	2,40	ns
Ca	cmol _c kg ⁻¹	2,00	5,50	3,73	3,65	0,84	22,52	0,00	-0,16	*
Mg	cmol _c kg ⁻¹	1,00	5,80	2,92	2,60	1,24	42,47	0,74	-0,09	ns
Na	cmol _c kg ⁻¹	0,00	0,62	0,44	0,47	0,14	30,68	-0,94	0,68	ns
K	cmol _c kg ⁻¹	0,03	0,54	0,23	0,19	0,11	49,56	1,55	1,54	ns
SB	cmol _c kg ⁻¹	4,57	8,10	6,15	5,89	0,97	15,71	0,63	-0,52	*
Areia	g kg ⁻¹	510	779	597	588	63,28	10,6	1,07	0,93	ns
Silte	g kg ⁻¹	24	245	168,42	181	44,01	26,13	-1,27	1,79	ns
Argila	g kg ⁻¹	120	340	234,6	240	49,04	20,90	-0,32	-0,26	*

¹atributos; ²unidades; ³mínimo; ⁴máximo; ⁵média; ⁶desvio padrão; ⁷coeficiente de variação; ⁸assimetria; ⁹curtose; ¹⁰shapiro-Wilki.

Foi observado semelhança nas medidas de tendência central (média e mediana) dos atributos químicos e físicos dos solos. Em relação aos valores de assimetria, os atributos pH, areia e SB do P1 e os atributos pH, Na, silte e argila do P2 apresentaram valores negativos. Por outro lado, os atributos CT, MOS, P, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , silte e argila do P1 e o CT, MOS, P, Mg^{2+} , K, SB e areia do P2 apresentaram valores de assimetria positivo.

No P1 os atributos areia e pH apresentaram baixo CV, K^+ e P alto e os demais atributos moderado. No P2, o pH apresentou baixo CV, o P, alto e o restante dos atributos moderados. Foi observado aumento gradativo do CV no sentido areia-argila-silte de ambos os perfis. Os cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} predominam em ambos os perfis, com valores médios de 3,70 e 1,54 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, respectivamente no P1 e de 3,73 e 2,92 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, respectivamente no P2. Os teores médios de K^+ e Na^+ são baixos em ambos os perfis. Os valores médios de COT 22,64 g kg^{-1} e MOS 43,77 g kg^{-1} do P1 são maiores que os teores de CT 14,53 g kg^{-1} e MOS 28,33 g kg^{-1} e encontrados no P2. O P1 apresentou maior valor médio de SB em comparação ao P2.

Os modelos que atenderam aos critérios maior valor para o coeficiente de determinação (R^2), menor valor de soma de quadrado dos resíduos (SQR), menor valor para o efeito pepita e menor valor de erro padrão (SE) na validação cruzada durante o ajuste dos semivariogramas são apresentados na Tabela 12.

Todos os atributos de ambos os perfis apresentaram dependência espacial, ajustando-se a algum modelo de semivariograma. Não foi identificado efeito pepita puro para nenhum dos atributos. À exceção da SB, no P1, o modelo gaussiano foi o que se ajustou para 100% dos parâmetros. No P2, predominou ajuste do modelo esférico (58,33%) em relação ao gaussiano (41,66%). O GDE foi classificado como forte para 100% dos atributos em ambos os perfis ($\text{GDE} < 25\%$).

Tabela 11 - Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas para os atributos utilizados dos perfis P1 e P2.

Atrib ¹	Mod ²	Co ³	Co+C ⁴	A ⁵ (m)	Co/(Co+C) ⁶ (%)	GDE ⁷	N ⁸	SQR ⁹	R ² (%)	SE ¹⁰
P1 LUVISSOLO CRÔMICO - Fazenda Almas (RPPN)										
pH	Gaus.	0,00	0,13	0,39	0,07	Forte	40	9.998.10 ⁻⁰⁴	86,4	0,08
COT	Gaus.	0,01	9,95	0,31	0,10	Forte	34	10,2	64,8	0,15
MOS	Gaus.	0,10	37,86	0,32	0,26	Mod.	34	160	62,4	0,14
P	Gaus.	0,01	8,89	0,35	1,12	Forte	37	10,80	70,1	0,11
Ca²⁺	Gaus.	0,05	0,55	0,29	8,20	Forte	36	0,012	73,1	0,24
Mg²⁺	Gaus.	0,02	0,10	0,24	17,07	Forte	34	2.92.10 ⁻⁰⁴	53,8	0,27
Na⁺	Gaus.	0,00	0,00	0,29	5,43	Forte	39	2.63.10 ⁻⁰⁸	85,6	0,14
K⁺	Gaus.	0,00	0,21	0,32	0,05	Forte	39	2.78.10 ⁻⁰³	72,7	0,12
SB	Esf.	0,00	0,86	0,25	0,12	Forte	37	0,0145	57,5	0,33
Areia	Gaus.	13,00	1129,33	0,29	1,15	Forte	36	15427	92,5	0,17
Silte	Gaus.	1,00	725,79	0,33	0,14	Forte	39	24255	90,7	0,16
Argila	Gaus.	1,00	1219	0,35	0,08	Forte	38	96105	78,3	0,11
P2 LUVISSOLO CRÔMICO Órtico vertissólico										
pH	Esf.	0,00	0,05	0,32	0,20	Forte	50	1.385.10 ⁻⁰⁴	85,5	0,51
COT	Esf.	0,01	4,67	0,23	0,21	Forte	46	0,543	60,7	0,22
MOS	Esf.	0,15	15,82	0,27	0,95	Forte	46	1,73	87,8	0,11
P	Esf.	5,86	81,60	0,36	7,18	Forte	49	11,3	98,8	0,11
Ca²⁺	Esf.	0,00	0,54	0,30	0,18	Forte	46	9.428.10 ⁻⁰³	69,2	0,09
Mg²⁺	Gaus.	0,00	1,63	0,30	0,06	Forte	37	0,0829	89,2	0,40
Na⁺	Esf.	0,00	0,02	0,37	1,33	Forte	50	1.207.10 ⁻⁰⁵	81,0	0,36
K⁺	Gaus.	0,00	0,01	0,38	0,08	Forte	50	8.448.10 ⁻⁰⁶	86,5	0,58
SB	Gaus.	0,00	2,86	0,28	0,03	Forte	50	0,21	87,1	0,11
Areia	Esf.	10,00	3948	0,34	0,25	Forte	50	172662	91,7	0,56
Silte	Esf.	44,00	1321	0,45	3,33	Forte	48	23955	93,7	0,35
Argila	Gaus.	156,00	2498	0,31	6,24	Forte	46	373507	72,3	0,29

¹ atributos; ² modelos; ³ efeito pepita; ⁴ patamar; ⁵ alcance; ⁶ depedência espacial; ⁷ grau de dependência espacial; ⁸ número de pontos; ⁹ soma de quadrado do resíduo; ¹⁰ erro padrão.

No P1, os valores de alcance variaram de 0,24 a 0,39 m, sendo o menor e maior alcance obtido para o Mg²⁺ e pH, respectivamente. No P2, o alcance variou de 0,23 a 0,45 m, sendo o silte e o COT os atributos que apresentaram o maior e menor alcance respectivamente. Os valores de coeficiente de determinação para ambos os perfis variaram de 0,538 a 0,944. Os valores de erro padrão (SE) em ambos os perfis variaram de 0,07 a 0,26.

3.1 Solo sob Caatinga preservada (CP)

Resultados

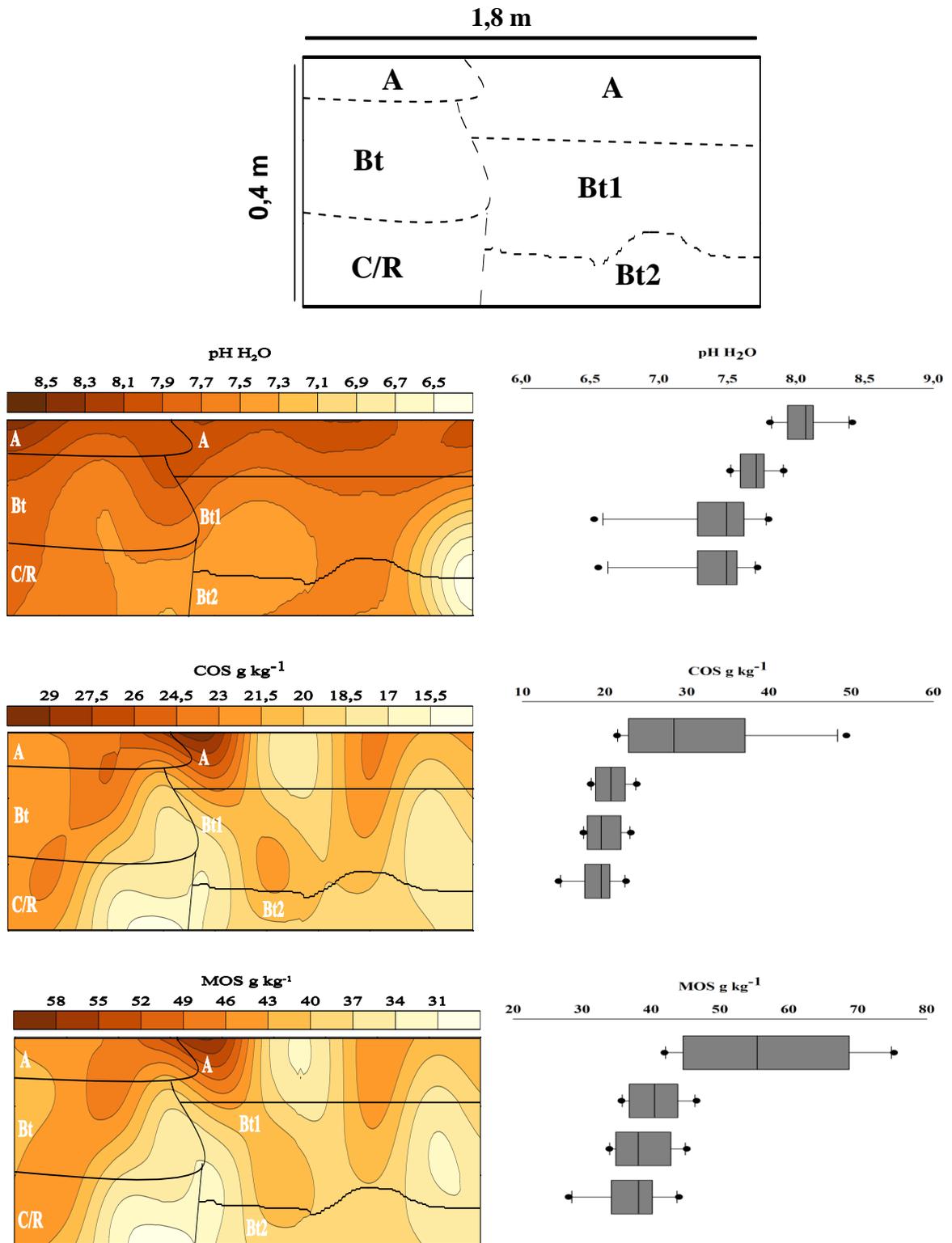
Os mapas temáticos e os gráficos de box-plot do Luvissole Crômico (P1) da CP são apresentados na Figura 15.

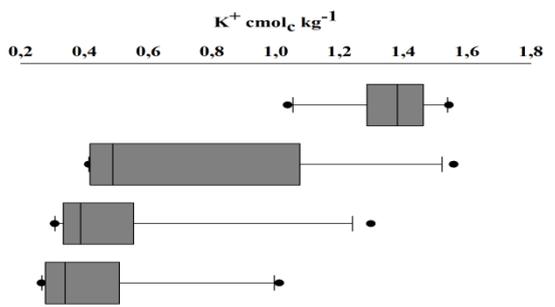
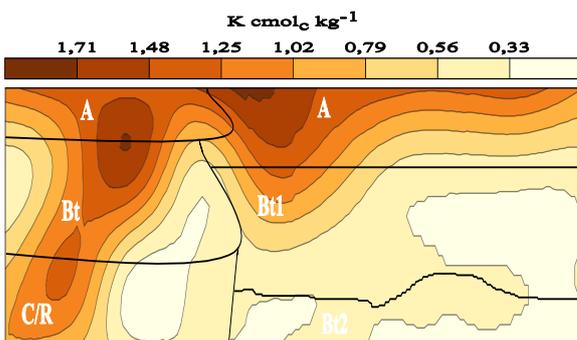
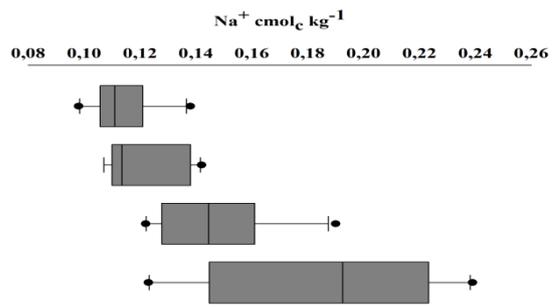
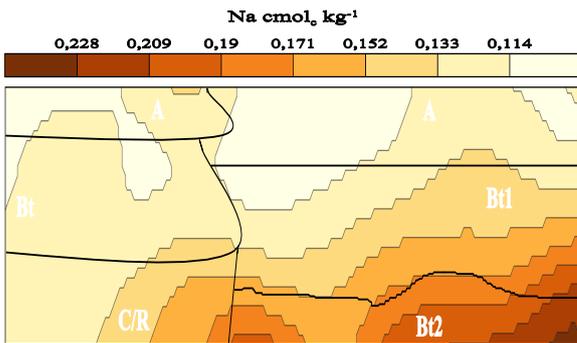
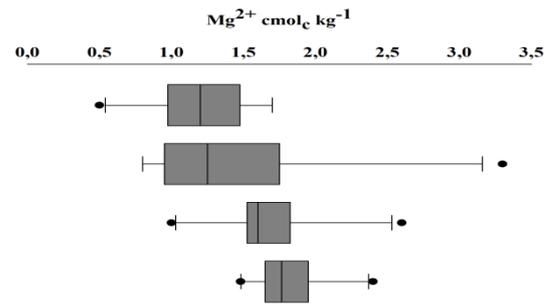
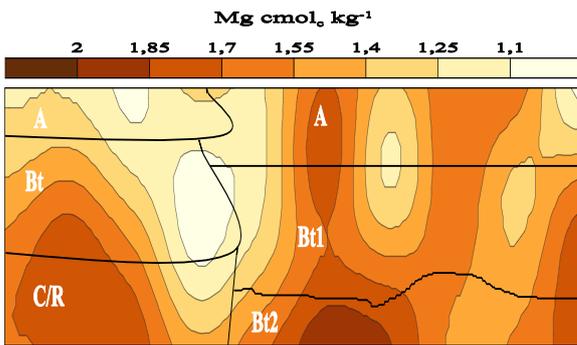
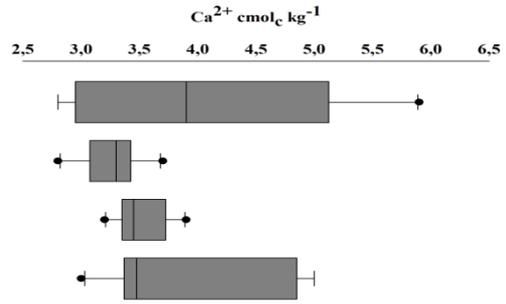
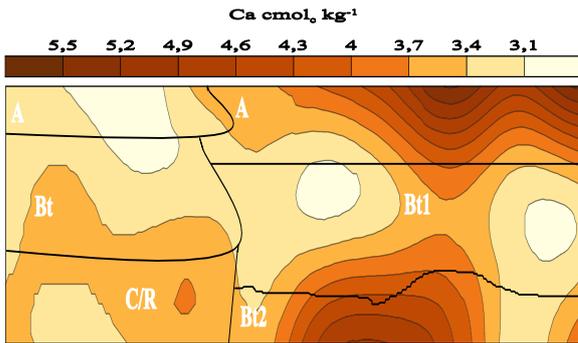
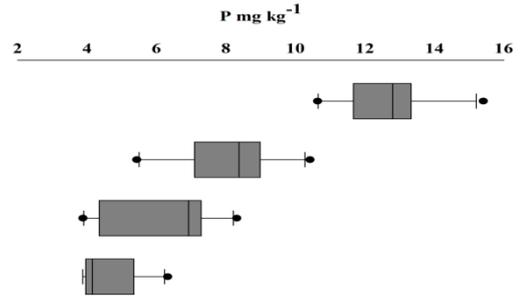
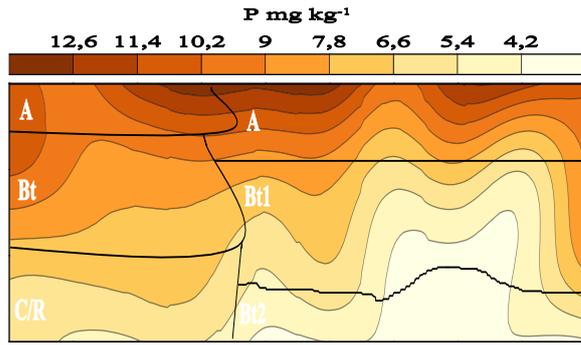
Os valores de pH apresentaram pouca variação ao longo do perfil. Estes valores encontram-se na faixa considerada praticamente neutro a fortemente alcalino. Os maiores valores de pH foram interpolados nos horizontes A com tendência a redução em profundidade no perfil, proporcionando pequena variabilidade para esse atributo. Os atributos MOS e COT apresentam similaridades, sendo os maiores teores encontrados nos primeiros centímetros do solo, com valores MOS e COT variaram de 43,2 a 75,2 e 21,5 a 49,4, respectivamente, as quais tendem a reduzir em profundidade. Tal fato também pode ser observado nos gráficos box-plots desses atributos.

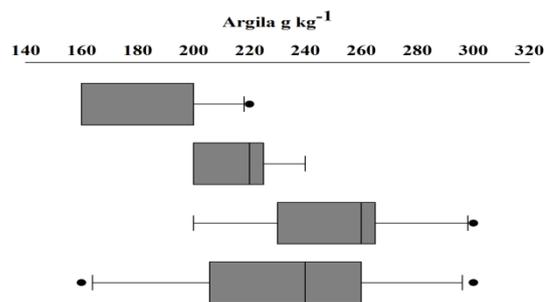
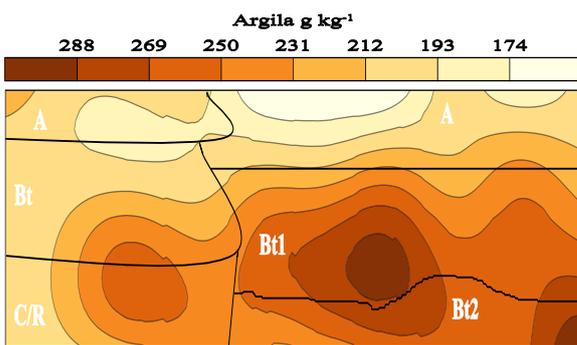
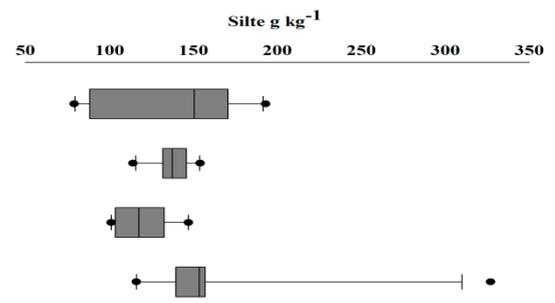
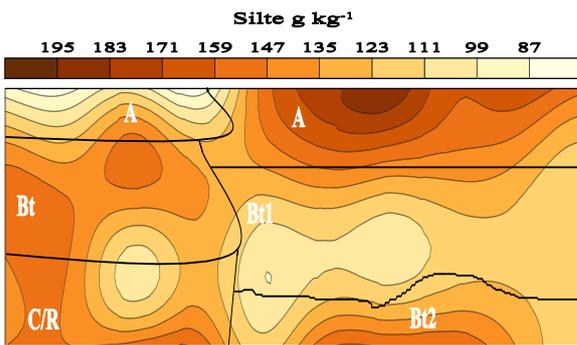
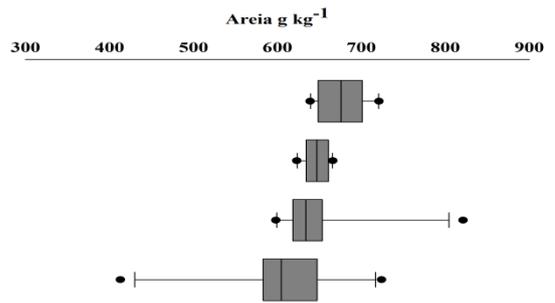
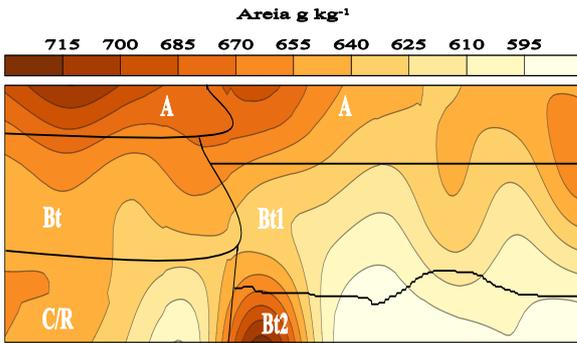
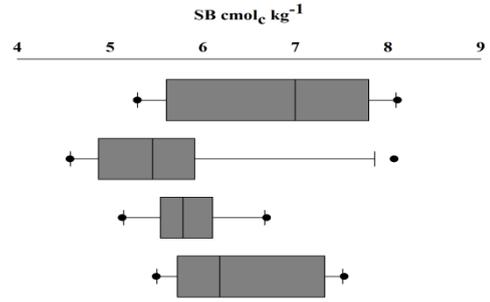
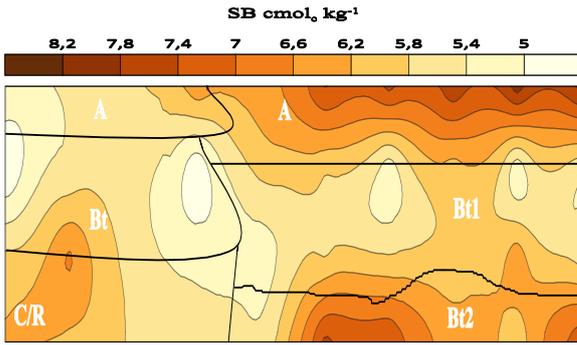
De forma semelhante, os maiores teores de P foram observados nos primeiros centímetros do solo. Os teores de Ca^{2+} são elevados em superfície, com variação de 2,8 a 5,9 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, e em partes do horizonte Bt_2 e Cr, alcançando teores de 3,39 a 5,0 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$. Em geral, foi observada tendência de aumento dos teores de Mg^{2+} em direção aos horizontes Cr e Bt_2 . Esse aumento apresentou maior variabilidade espacial quando comparado com os teores de Ca^{2+} . Ao se observar o gráfico blox-plot, percebe-se que a maior variação nos teores de Mg^{2+} foi encontrada na profundidade de 20 cm.

Os teores de Na^+ aumentam gradualmente em profundidade, alcançando valores máximos no contato lítico fragmentário. Esses teores encontram-se mais distribuídos em 40 cm, em que os teores variam de 0,12 a 0,24 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$. Os teores de K^+ são mais elevados em superfície, com valores variando e 1,0 a 1,5 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$. Os maiores teores de areia ocorrem na parte superficial do perfil, enquanto os teores de argila são mais elevados no horizonte Bt. O silte apresentou maior variabilidade entre as frações granulométricas com tendência de concentração na parte superficial.

Figura 15 - Mapas de Krigagem e gráficos box-plots para os atributos a) pH; b) COS; c) MOS; d) Ca²⁺; e) Mg²⁺; f) Na⁺; g) K⁺; h) Areia; i) Silte e J) Argila do LUVISSOLO CRÔMICO (P1) da Fazenda Almas.







3.2 Solo sob área degradada (AD)

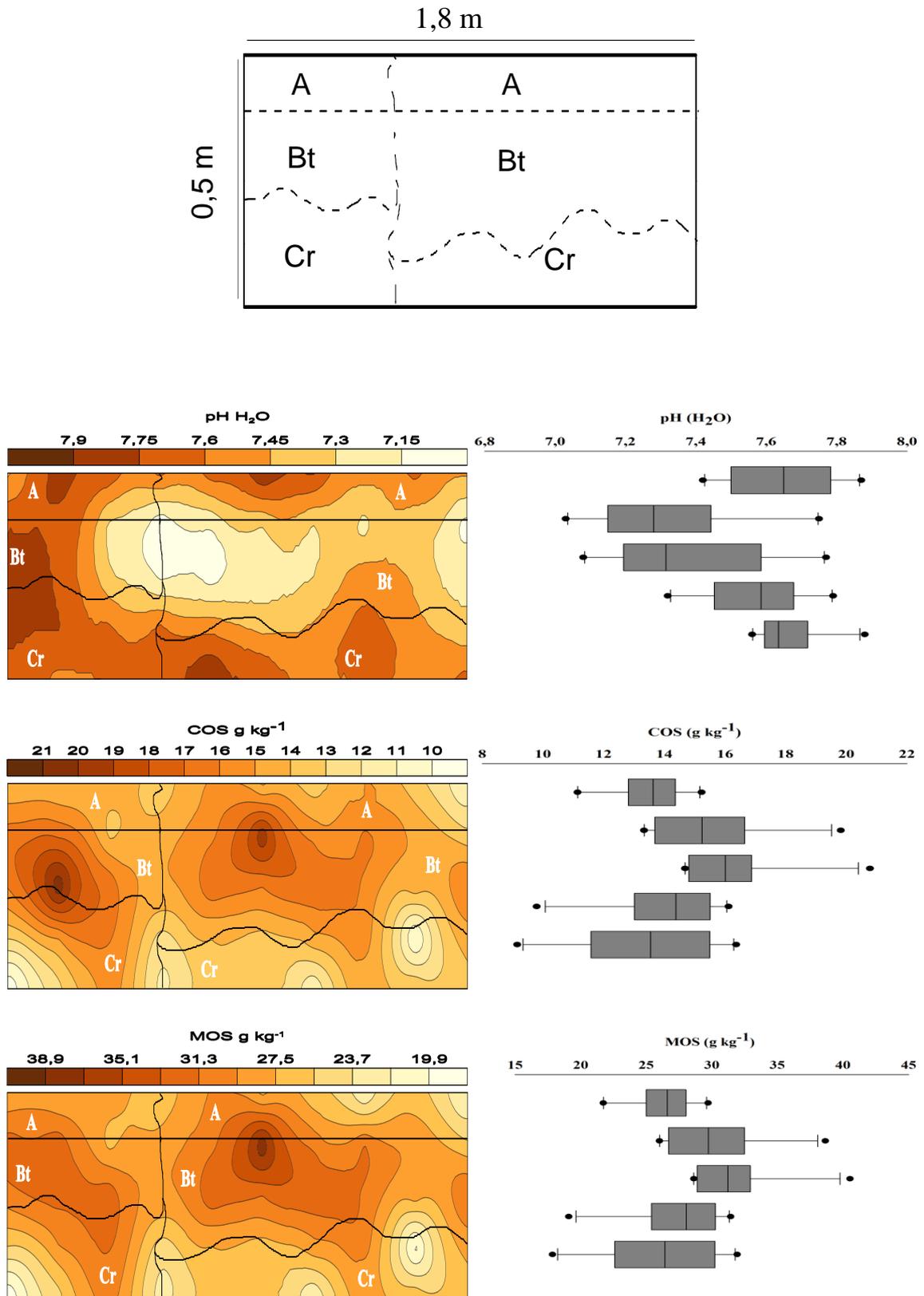
Resultados

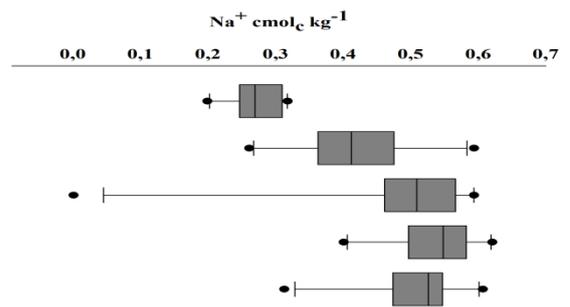
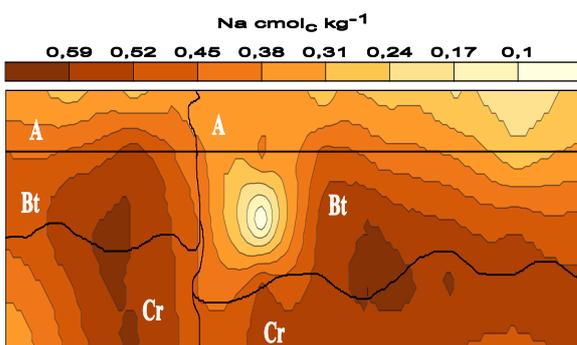
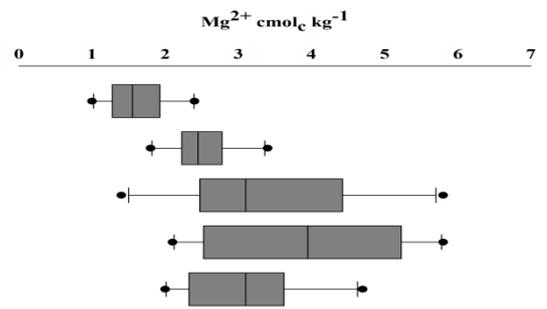
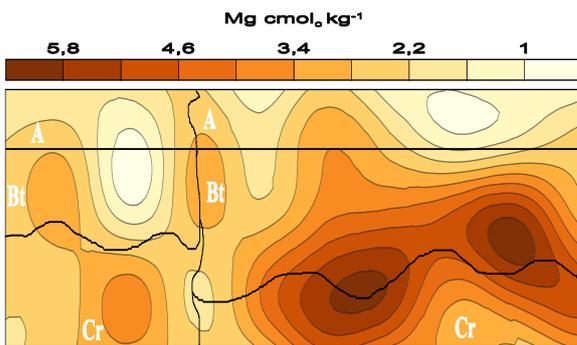
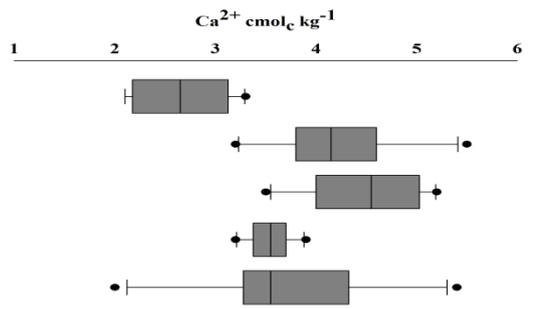
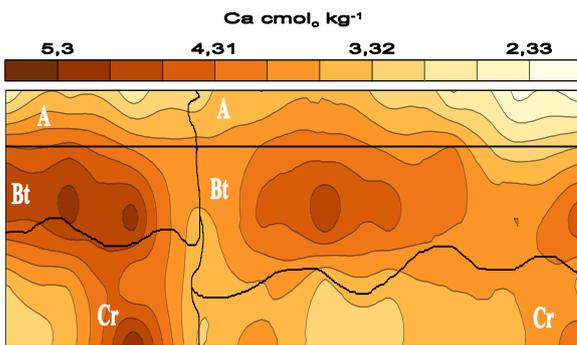
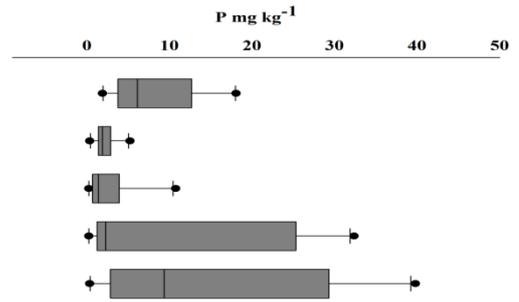
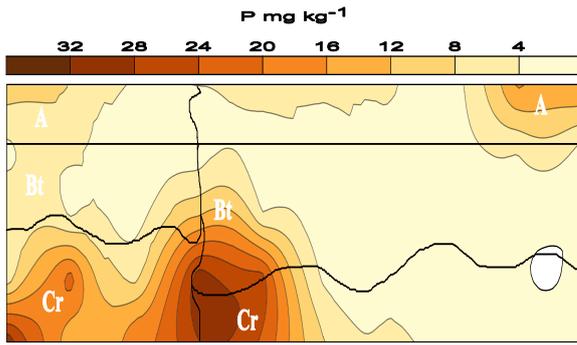
Os mapas temáticos e os gráficos blox-plot do Luvissole Crômico (P2) da AD são apresentados na Figura 16.

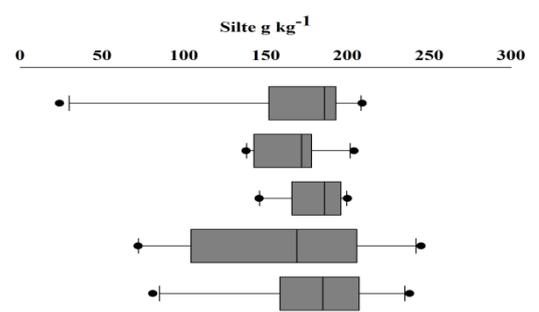
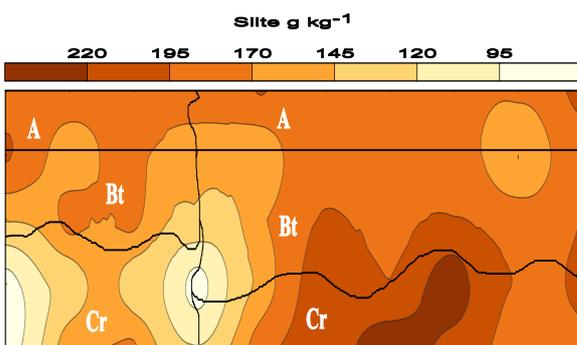
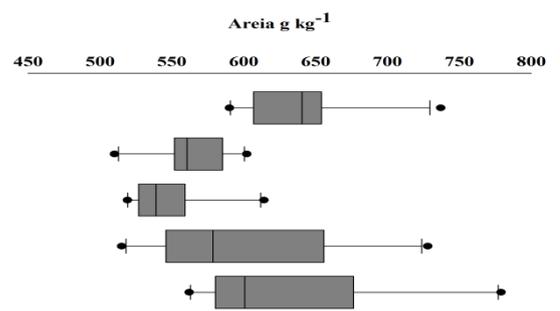
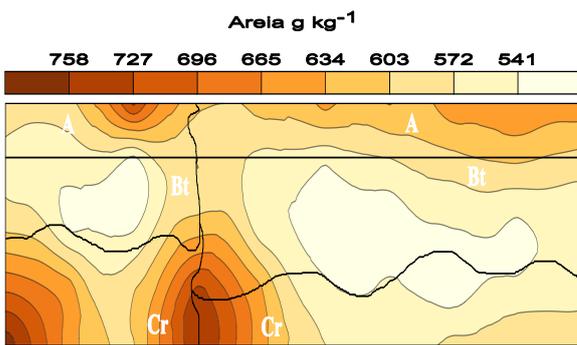
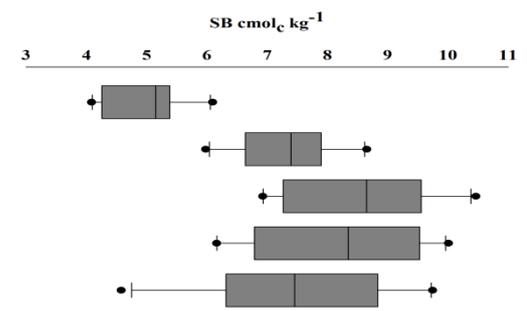
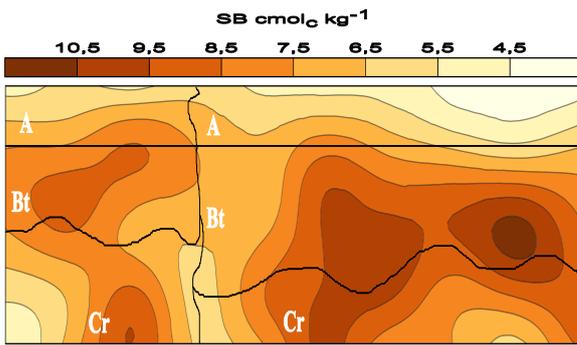
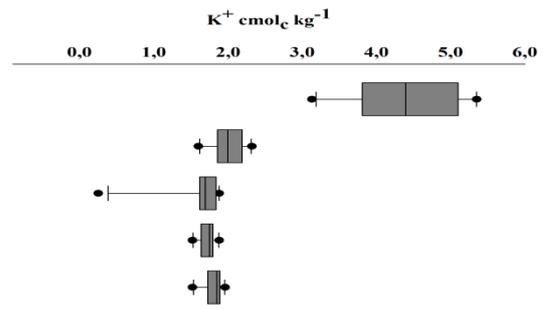
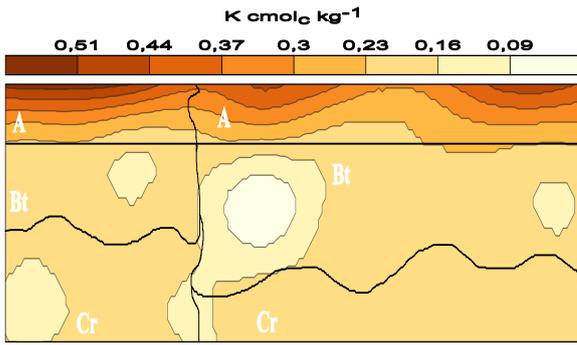
O pH nesse solo apresentou-se maior quando comparado com o P1. Os valores variaram de 7,03 a 7,88, sendo classificados nas faixas de praticamente neutro a alcalino. Os maiores valores ocorrem nos primeiros 10 cm e nos últimos 50 cm. Diferentemente do P1, os teores mais elevados de COT e MOS no P2 foram encontrados em 20-30 cm. Nessa profundidade teores de COT variaram de 14,7 a 20,1 g kg⁻¹, e a MOS de 28,6 a 40,5 g kg⁻¹. O teor de Ca²⁺ apresentou maior variabilidade quando comparado com P1, estando os maiores teores concentrados na parte intermediária do perfil. Os maiores teores de Mg²⁺ ocorrem nos últimos 30 cm, enquanto os menores valores foram encontrados nos primeiros 10 cm. O mapa de isolinhas mostra maior concentração desse elemento na parte inferior direita do perfil. À semelhança, os teores de Na⁺ aumentam em profundidade e são reduzidos nos primeiros 10 cm. O K⁺ é o cátion com menor variabilidade, claramente concentrado nos primeiros 10 cm.

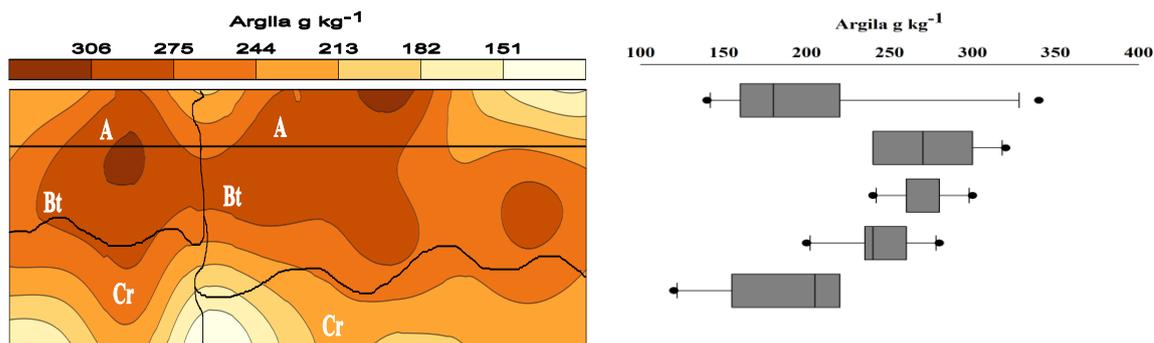
Os mapas de isolinhas mostram que dentre as frações granulométricas a areia apresentou a maior variabilidade, concentrando os maiores teores entre 10-20 cm. O silte apresentou baixa variabilidade, apresentando comportamento relativamente homogêneo em todo o perfil e maiores teores nos primeiros 10 cm. Por último, os maiores teores de argila concentra-se no horizonte Bt.

Figura 16 - Mapas de Krigagem e gráficos box-plots para os atributos a) pH; b) COS; c) MOS; d) Ca²⁺; e) Mg²⁺; f) Na⁺; g) K⁺; h) Areia; i) Silte e J) Argila do LUVISSOLO CRÔMICO sob área degradada na Estação Experimental São João do Cariri.









3.3 Discussão

A estatística descritiva é uma etapa necessária que antecede a análise geoestatística, tendo em vista que ela é utilizada para resumir os dados, controlar a qualidade, identificar as populações significativas e os valores extremos (outliers) (Outeiro et al., 2008). A semelhança nos resultados dos valores de média e mediana indica uma tendência de normalidade dos dados. Porém, a maioria dos valores de assimetria e curtose está distante de zero, o que denota uma assimetria acentuada dos dados e consequente anormalidade.

Assimetria e curtose são valores que indicam a distribuição dos dados, sendo indicadores mais sensíveis a valores extremos quando comparado com a média e a mediana. Quando próximos de zero alertam para normalidade dos dados e, consequentemente, contribuem para um melhor ajuste dos semivariogramas (Alho et al., 2016). O teste de Shapiro-Wilk a $p < 0,05$ comprovou a não normalidade dos dados, em que 100% dos atributos do P1 e 62% do P2 apresentaram anormalidade nos seus dados. Para posterior utilização da geoestatística, a normalidade dos dados não é um fator preponderante para se avaliar a dependência espacial de dados obtidos na natureza; no entanto, dados não normais, durante o ajuste dos semivariogramas, podem apresentar caldas alongadas e patamares não definidos (Camargo et al., 2008).

Os valores do coeficiente de assimetria negativos indicaram predominância dos valores maiores que a média, ao passo que os valores positivos indicaram valores menores que a média. O coeficiente de variação (CV) é uma medida utilizada para verificar a variabilidade dos dados em relação à média. Dessa forma, elevados valores de CV podem ser considerados como um indício de heterogeneidade dos dados. A alta amplitude entre os valores máximo e mínimo de CV dos teores de K^+ e P revela a elevada variabilidade desses atributos em ambos os perfis.

Os baixos valores de CV para o atributo pH em ambos os perfis podem ser atribuídos ao fato de que seus valores no solo são expressos em escala logarítmica e, portanto, espera-se variações mínimas, principalmente, em uma área relativamente pequena como as dos perfis estudados. A ocorrência de minerais facilmente intemperizáveis na fração silte pode ser um dos fatores que resultou nos elevados valores de CV para esse atributo. Em nenhum dos atributos foi identificado efeito pepita puro, indicando distribuição aleatória e independência espacial (Vieira, 2000). O modelo gaussiano se ajustou para quase 100% dos atributos no P1, enquanto o P2 houve o ajuste dos modelos gaussiano e esférico.

Os modelos esférico, exponencial e gaussiano são os que melhor se ajustam em estudos agronômicos, principalmente, relacionados a solo e planta (Vieira, 2000). Esses modelos também foram ajustados em prévios estudos relacionados à variação dos atributos do solo (Sibaldelli et al., 2015; Santos et al., 2017). Apesar do ambiente heterogêneo que é o solo, a curta distância existente entre as cédulas das malhas contribuiu para o forte grau de dependência espacial de todos os atributos. Os valores de alcance tiveram uma pequena variação. O alcance faz referência à distância em que os pontos das amostragens estão espacialmente correlacionados (Landim, 2006). Pode se dizer que os atributos que obtiveram maiores valores de alcance também apresentam menor variabilidade e uma maior continuidade espacial, o que acarreta melhor precisão nas estimativas dos valores em locais não amostrados. Dessa forma, a geoestatística é uma ferramenta capaz de ser utilizada para mapear a variabilidade espacial de atributos em escalas que variam de centímetros até quilômetros (Vieira et al., 2000).

Os valores de R^2 mostraram que 53,8 a 94,4% da variabilidade dos atributos avaliados podem ser explicados a partir dos modelos ajustados. Já os baixos valores de erro permitiram ter a obtenção de uma boa confiabilidade no ajuste dos modelos. Esses valores, quanto mais próximos de zero, são indicativos de um menor erro ao se estimar as variáveis usando a krigagem, dessa forma, indicando maior confiabilidade das estimativas dos valores para locais não amostrados. Nos mapas de isolinhas, a presença de linhas fechadas e próximas caracterizam regiões com maior variabilidade, ao passo que a presença de linhas espaçadas caracteriza regiões com menor variabilidade (Matias et al., 2015).

Análises morfométricas e com perspectiva espacial visualmente são muito divergentes das análises pontuais, e, por isso, proporcionam melhor entendimento da variabilidade dos atributos dentro em um perfil de solo (Silva et al., 2018). A partir da visualização dos

resultados neste estudo, foi possível perceber como os atributos variam entre e dentro de um mesmo horizonte. Também foi possível perceber padrões diferentes de comportamento, p, ex., diminuição dos valores de pH em profundidade e aumento nos teores de Na^+ no P1 e maiores teores de K^+ na camada de 10 cm e de COT na zona intermediária (horizontes A e Bt, respectivamente) do P2. Isso confirma que a estratégia de amostragem utilizada aliada à geoestatística são úteis na espacialização vertical e horizontal dos atributos dos solos e na identificação de diferenças entre áreas com diferentes históricos de uso da terra.

Os maiores valores nos teores de COT nos primeiros 10 cm do P1 são devido ao maior aporte de material vegetal, oriundos da vegetação de caatinga preservada. E dentro dessa vegetação de caatinga preservada ocorrem árvores de maiores portes – caatinga arbustiva - as quais, conseqüentemente, possuem maiores copas e, uma maior capacidade de deposição vegetal, resultando posteriormente em maior acúmulo de MOS no solo a partir dos mecanismos de mineralização e estabilização desses compostos orgânicos (Anjos et al., 2008). Por outro lado, os menores valores de COT em profundidade podem estar relacionados com a decomposição de raízes de diâmetros variados e que passam pelo processo de decomposição, constituindo um dos principais processos de deposição de MO em subsolos.

O solo sob Caatinga degradada apresentou menores valores nos teores de COT quando comparados ao solo sob Caatinga preservada. A supressão da vegetação é preponderante nesse processo, tanto pela redução drástica no aporte de carbono como pela maior exposição dos solos aos agentes erosivos. Entretanto, vale ressaltar que nessa área degradada os maiores teores de COT encontrados entre 20-40 cm provavelmente indicam contribuição de complexos organominerais no processo de sequestro de carbono nesses sistemas. Nessa zona do perfil também estão os maiores teores de Ca^{2+} , o que pode ter também contribuído para a proteção e estabilização do COT. O Ca^{2+} tem considerável capacidade de proteger a MOS da mineralização e, conseqüentemente, estabilizá-la via complexação a partir de fortes associações organo-minerais (Baldock e Skjemstad, 2000), é provável, também, que a MO nos horizontes do subsolo contenha uma alta proporção de compostos C estabilizados por interações minerais, principalmente, por meio de formas amorfas de Fe (Rumpel e Kogel-Kanbner, 2010).

Nas condições estudadas também se deve considerar as hipóteses de uma camada relacionada com a antiga ocorrência de vegetação com considerável contribuição de raízes, ou ainda, a contribuição dos processos de bioturbação e pedoturbação na criação de um ambiente

favorável ao transporte de MOS para maiores profundidades. Os maiores teores de P disponível nos primeiros dez centímetros provavelmente está relacionado com a ciclagem do P orgânico oriundo da MOS, sendo essa disponibilidade potencializada pela ação dos microrganismos do solo (Pereira et al., 2010). A alta disponibilidade de Ca^{2+} e Mg^{2+} em ambos os perfis está relacionada com a presença de minerais primários facilmente intemperizáveis como, por exemplo, feldspatos, biotita e anfibólio (Figura 7), os quais possuem esses elementos na sua estrutura e estão constantemente os liberando para o meio (Curi et al., 2005).

Os maiores teores de Ca^{2+} , situados na zona intermediária do P2, podem estar tendo relação com a fração orgânica na forma de ligações organo-metálicas, uma vez que é nessa profundidade em que se concentram os maiores teores de MOS nesse perfil. Os altos valores de Na^+ , notadamente concentrados próximo ao contato lítico, estão relacionados com o intemperismo de minerais do grupo dos plagioclásios, notadamente a albita. Alterações de plagioclásios, biotita, e anfibólio influenciaram na liberação de nutrientes como o Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ (Camara et al., 2021). O predomínio de minerais primários como anfibólios que são fontes de magnésio, e plagioclásios que são fontes de cálcio e sódio no material de origem, aliados ao ambiente semiárido, promovem a liberação gradual desses elementos, contribuindo para as altas concentrações dessas bases trocáveis em Luvisolos e imprimindo-lhes o caráter eutróficos e até mesmo hipereutrófico. A análise mineralógica realizada na fração areia do horizonte diagnóstico do P1 confirma a presença desses minerais primários (Figura 7).

Os maiores teores de areia em superfície e de argila em subsuperfície refletem a gênese dos Luvisolos, que apresentam horizonte B com acúmulo de argila, geralmente acompanhado de mudança de textura abrupta entre o horizonte A e o Bt. Vários estudos têm enfatizado que o processo de argilização é o principal mecanismo responsável pela formação desse horizonte subsuperficial argiloso, notadamente via intemperismo de minerais como biotita, feldspatos e anfibólios (Ferreira et al., 2015; Sousa et al., 2020; Camara et al., 2021).

O gráfico de isolinhas do P2 mostra uma tendência de altas concentrações de argila nos primeiros centímetros do perfil, o que é explicado pelo fato desse solo se encontrar em uma área de intensa erosão, em que houve redução da espessura do horizonte A e conseqüentemente do *sólum* (A+B) e, por vezes, exumando o horizonte Bt em superfície. Isso comprova que a antrossolização, a partir do truncamento dos solos (Macedo et al., 2021), pode acarretar perdas de serviços ecossistêmicos associados ao horizonte A, tais como

sequestro de carbono e retenção de nutrientes e de água. Esse é um dos fatores que fortemente contribuem para a redução da capacidade produtiva dessas áreas e as tornam paisagens com baixa capacidade de resiliência e de suporte para serviços ecossistêmicos.

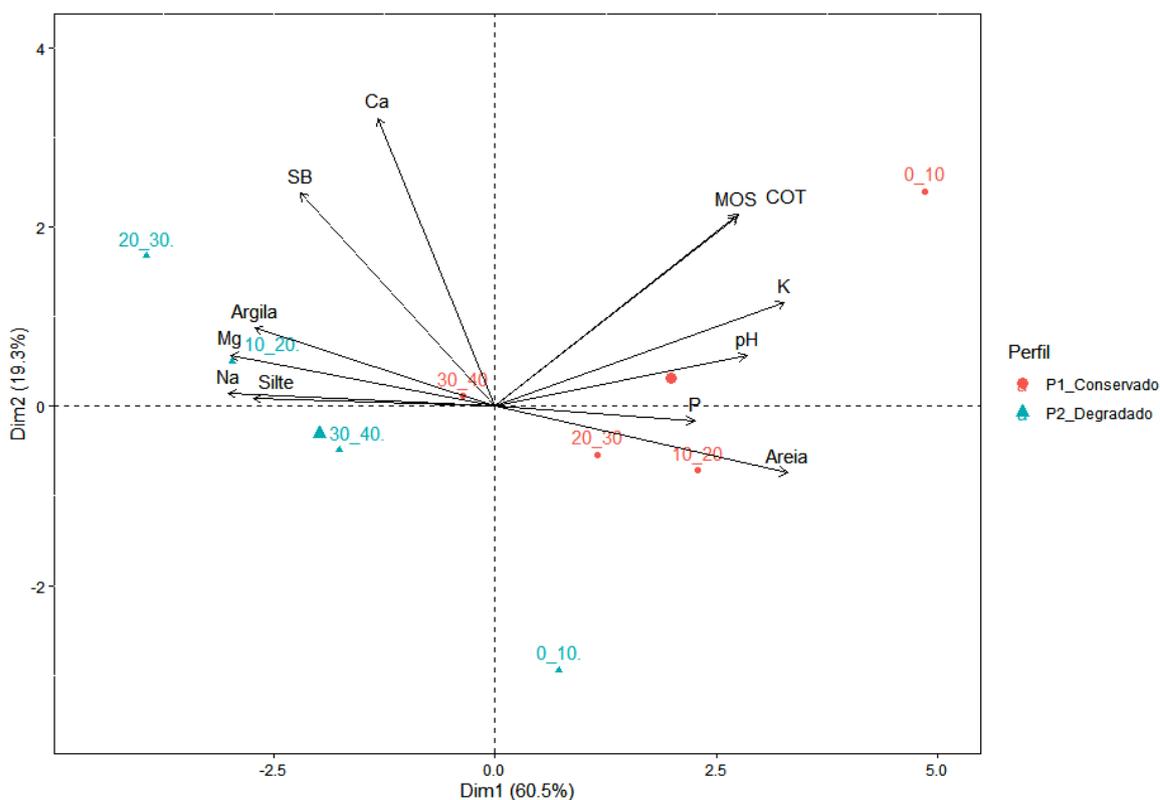
3.4 Análise de Componentes Principais

A análise de componentes principais (ACP) revelou que aproximadamente 79,8% da variação encontrada no presente estudo pode ser explicada pelos atributos químicos e granulométricos dos solos. A primeira componente principal (PC1) explicou 60,5% da variabilidade dos dados, discriminando no quadrante positivo os atributos MOS, COT, pH e Areia, as quais estão relacionados com o solo da AP, enquanto que no quadrante negativo foram discriminados os demais atributos, relacionados com os solos da AD. A segunda componente (PC2) explicou 19,3% da variação dos dados, discriminando no quadrante positivo os atributos argila, silte, Ca, Mg, Na e SB e no quadrante negativo os demais atributos.

A ACP foi útil em separar as áreas com diferentes usos da terra com base na granulometria e nos atributos químicos dos solos. A área preservada, dada à presença da vegetação, está relacionada com os maiores teores de MOS/COT e nutrientes associados, tais como P e K, notadamente em superfície. Isso confirma o papel da manutenção da cobertura vegetal em aportar carbono e nutrientes aos solos, que por sua vez passam a prover serviços ecossistêmicos de regulação e suporte, os quais são essenciais para a manutenção dessas paisagens de alta complexidade.

Na área degradada, os teores de argila e de elementos relacionados com o intemperismo mineral demonstram que os processos ocorrentes em subsuperfície são majoritários. Isso reforça o fato de que a ocorrência de processos relacionados com a degradação dos solos, além de deteriorarem a qualidade química e a espessura dos horizontes superficiais, também contribuem para realçar os atributos dos horizontes subsuperficiais e, por vezes, até expondo-os em superfície.

Figura 17 - Análise de componentes principais das variáveis dos solos nos ambientes estudados da região do cariri paraibano (P1: perfil localizado em ambiente de caatinga preservada; P2: perfil localizado em área sob estágio avançado de degradação).



4 CONCLUSÕES

As malhas amostrais adotadas foram eficientes para a detecção da variação espacial dos atributos em ambos os perfis de solos estudados.

A partir das análises morfométricas aplicadas à técnica de geoestatística foi possível detectar que os maiores valores de COT e MOS no solo sob área degradada estão situados na zona intermediária do perfil e foi eficiente ao fornecer informações a respeito do comportamento dos variados atributos estudados dentro e entre os horizontes dos dois perfis dos dois solos avaliados.

REFERÊNCIAS

- ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; MANTOVANELLI, B. C.; SILVA, D. M. P.; SOUZA, Z. M.; CUNHA, J. M.; SOARES, M. D. R. Physical and geospatial attributes of inceptisols and ultisols under native vegetation in Humaitá, AM, Brazil. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 2, p. 422-430, 2016.
- ALVES, Marco Aurélio Barbosa et al. Variabilidade espaço-sazonal de atributos químicos físicos e biológicos em toposequência no Cariri Paraibano. 2019.
- ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M.G.; FONTANA, A. Matéria orgânica e pedogênese. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. Q. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2 ed. Porto Alegre: Metropole, 2008. p. 65–86.
- BALDOCK, J. A.; SKJEMSTAD, J. O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. **Organic geochemistry**, v. 31, n. 7-8, p. 697-710, 2000.
- CAMARGO, L. A; MARQUES J. R., J.; PEREIRA, G.T; HORVAT, R.A. (2008). Variabilidade espacial de Atributos mineralógicos de um Latossolo Diferentes Formas de relevo. I - Mineralogia da Fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do solo Solo**. v.32:2269- 2277pp.
- 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 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.
- CORREIA, REBERT COELHO et al. A região semiárida brasileira. Embrapa Semiárido- **Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2011.
- DE SOUSA, J. E. S., DOS SANTOS, J. C. B., CORRÊA, M. M., DO NASCIMENTO, A. F., SCHULZE, S. M. B. B., FERREIRA, T. O., ... & DE SOUZA JÚNIOR, V. S. Mineralogy and genesis of Planosols under a semi-arid climate, Borborema Plateau, NE Brazil. **Catena**, v. 184, p. 104260, 2020.
- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2018). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª.ed. Brasília. 590p.
- FERREIRA, J. T. P., RIBEIRO, M. R., SOUZA, V. S. D., BITTAR, S. M. B., & SANTOS, R. G. D. Planosols developed in different geoenvironmental conditions in northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016.
- FERREIRA, V.; PANAGOPOULOS, T.; ANDRADE, R.; GUERREIRO, C.; LOURES, L. Spatial variability of soil properties and soil erodibility in the Alqueva reservoir watershed. **Solid Earth**, v.6, p.383–392, 2015
- GAMMA DESIGN SOFTWARE. (2004) Geostatistics for the environmental sciences (version 7.0 for windows). **Michigan**: 1 CD.

GOLDEN SOFTWARE INC. (1999). (Golden, Estados Unidos). Surfer for windows: realese 7.0, contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers user's guide. 619p.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. *Terra e Didática*, v.2, p.19-33, 2006.

MACEDO, R. S., BEIRIGO, R. M., MEDEIROS, B. M., FELIX, V. J. L., da Silva Souza, R. F., & de Bakker, A. P. PROCESSOS PEDOGENÉTICOS E SUSCEPTIBILIDADE DOS SOLOS À DEGRADAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. *Caminhos de Geografia*, v. 22, n. 81, p. 176-195, 2021.

MATIAS, S. S. R., NÓBREGA, J. C. A., NÓBREGA, R. S. A., ANDRADE, F. R., & BAPTISTEL, A. C. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo cultivado de modo convencional com soja no cerrado piauiense. *Revista Agro@ mbiente* On-line, v. 9, n. 1, p. 17-26, 2015.

MESQUITA, GLAUCIA MACHADO; DOS SANTOS, FELIPE CORRÊA VELOSO; CORRECHEL, VLADIA. Efeito do fogo no comportamento e na variabilidade espacial dos atributos químicos do solo sob mata, no jardim botânico, Goiânia-GO. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 11, p. 91253-91267, 2020.

OUTEIRO, L., ÁSPERO, F.; ÚBEDA, X. Geostatistical methods to study spatial variability of soil cations after a prescribed fire and rainfall. *Catena*, v.74, p.310-320, 2008.

Pereira, M. G., Loss, A., Beutler, S. J., & Torres, J. L. R. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v. 45, p. 508-514, 2010.

PRIBYL, D. W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*, 156(3-4), 75–83.

R core Team (2021) version 4.0.5 R: A Language and Environment for Statistical Computing.

RUMPEL, C., & KÖGEL-KNABNER, I. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and soil*, v. 338, n. 1, p. 143-158, 2011.

SANTOS, K. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, B. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANDRADE, T. S. & FONTES JÚNIOR, R.V. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.8, p.828–835, 2012.

SANTOS, R. O.; FRANCO, L. B.; SILVA, S. A.; SODRÉ, G. A.; MENEZES, A. A. Spatial variability of soil fertility and its relation with cocoa yield. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 21, p.88-93, 2017.

SIBALDELLI, R. N. B.; CARVALHO, J. F. C.; OLIVEIRA, M. C. N. Uso de geoestatística no estudo da variabilidade espacial da capacidade de troca de cátions do solo. *Global Science Technology*, Rio Verde, v.8, p.141 – 156, 2015.

SILVA, S. H. G., HARTEMINK, A. E., DOS SANTOS TEIXEIRA, A. F., INDA, A. V., GUILHERME, L. R. G., & CURI, N. Soil weathering analysis using a portable X-ray fluorescence (PXRF) spectrometer in an Inceptisol from the Brazilian Cerrado. *Applied Clay Science*, v. 162, p. 27-37, 2018.

SILVA, F. M., WEINDORF, D. C., SILVA, S. H. G., SILVA, E. A., RIBEIRO, B. T., GUILHERME, L. R. G., & CURI, N. Tropical soil toposequence characterization via pXRF spectrometry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, n. 4, p. 1153-1166, 2019.

SOUZA, B. I.; SUERTEGARAY, D. M. A.; DE LIMA, E. R. V. **Desertificação e seus efeitos na vegetação e solos do cariri paraibano**, v. 8, n. 16, p. 217 a 232-217 a 232, 2009.

SUN, FUJUN et al. Enhanced soil profile visualization using portable X-ray fluorescence (PXRF) spectrometry. **Geoderma**, v. 358, p. 113997, 2020.

TAO, DAVID LONGPANI; SINGH, NAOREM JANAKI; GOSWAMI, CHANDAN. Spatial variability of soil organic carbon and available nutrients under different topography and land uses in Meghalaya, India. **International Journal of Plant and Soil Science**, v. 21, n. 4, p. 1-16, 2018.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; Alvares, V. H.; Schaefer, C. E. G. R. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000.

VIEIRA, S. R. et al. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data, In: Alvarez, V. V. H. et al. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 1-45, 2002.

WANG, C., WANG, X.B., LIU, D.W., WU, H.H., LU, X.T., FANG, Y.T., CHENG, W.X., LUO, W.T., JIANG, P., SHI, J.S., YIN, H.Q., ZHOU, J.Z., HAN, X.G., BAI, E., 2014. Aridity threshold in controlling ecosystem nitrogen cycling in arid and semi-arid grasslands. **Nat. Commun.** 5, 47–99.