

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

NARA NÚBIA DE LIMA CRUZ

**GÊNESE DE HORIZONTES CIMENTADOS EM SOLOS DE TABULEIROS
COSTEIROS DO ESTADO DA PARAÍBA**

**RECIFE
2022**

Nara Núbia de Lima Cruz
Engenheira Agrônoma

**Gênese de Horizontes Cimentados em Solos de Tabuleiros Costeiros do Estado da
Paraíba**

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

Orientador: Prof. Dr. Valdomiro Severino de
Souza Júnior

Coorientador: Prof. Dr. José Coelho de Araújo
Filho

**Recife
2022**

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

N177gg

Cruz , Nara Nubia de Lima
GÊNESE DE HORIZONTES CIMENTADOS EM SOLOS DE TABULEIROS COSTEIROS DO ESTADO DA
PARAÍBA / Nara Nubia de Lima Cruz . - 2021.
91 f. : il.

Orientador: Valdomiro Severino de Souza .
Coorientador: Jose Coelho de Araujo Filho.
Inclui referências, apêndice(s) e anexo(s).

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

1. Caratér Dúrico. 2. Fragipã . 3. Podzolização. I. , Valdomiro Severino de Souza, orient. II. Filho, Jose Coelho de
Araujo, coorient. III. Título

CDD 631.4

NARA NÚBIA DE LIMA CRUZ

**Gênese de Horizontes Cimentados em Solos de Tabuleiros Costeiros do Estado da
Paraíba**

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

Aprovada em 17 de Dezembro de 2021

Prof. Dr. Valdomiro Severino de Souza Júnior
Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco (DEPA)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Tiago Osório Ferreira
Universidade de São Paulo (ESALQ/USP)

Dr. José Coelho de Araújo Filho
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)

Profa Dra. Caroline Delpulpo Souza
Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG)

Dra. Jane Kelly Araujo Silva
PNPD-CAPES

Dedico...

Aos meus amados pai e mãe Anísio e Sandra Cruz, meu esposo amado Bueno Abreu, meu irmão Anísio Filho e minha saudosa avó Isabel Pereira da Cruz (In memoriam).

AGRADECIMENTOS

A Deus e Nossa Senhora Aparecida que me sustentaram em toda essa jornada, me concedendo bênçãos e sempre me guiando pelo caminho do bem.

Aos meus queridos pais Anísio Cruz e Sandra Cruz que tanto fizeram e fazem por mim, que sempre me apoiaram tanto em busca dos meus sonhos e me conduziram pra que eu me tornasse a mulher que sou hoje, gratidão pelos ensinamentos e tanto amor que a mim sempre foi dado. Ao meu irmão Anísio Filho que sempre me apoiou com lindas palavras de força pra que eu nunca desistisse.

Ao meu esposo Bueno Abreu, obrigada pela companhia nas madrugadas de estudo, pelos debates e por todo apoio que me deste, obrigada por segurar na minha mão e nunca soltar por maior que fosse a dificuldade, sem você eu não teria conseguido essa vitória.

A minha grande amiga-irmã Marilya Gabryella que tanto me auxiliou com um ombro amigo, conselhos, parcerias nos estudos, as conversas sobre gênese e mineralogia, sobre outros mil assuntos que sempre tivemos afinidade, os plantões nos laboratório de mineralogia, obrigada sempre por fazer parte da minha vida.

A Isamor Gomes por todo o apoio e incentivo e por possuir os melhores conselhos, e Artur Nascimento (Artuzinho) pela fofura de ser e com naturalidade tornando o trabalho feliz e prazeroso. A Pedro Gabriel pelo apoio nas leituras dos elementos e por ser um grande amigo com quem eu posso contar e dividir minhas felicidades e frustrações.

Ao meu querido Orientador e Amigo Valdomiro Souza Júnior por todo conhecimento repassado, por toda disponibilidade em ensinar e em compartilhar sua sabedoria e por me ensinar que com dedicação e força de vontade eu posso chegar onde quiser.

A minha amiga Jane Kelly, por toda doçura e carinho transmitido, regado de muita sabedoria e inteligência, a minha querida amiga Neila Araújo por todo apoio, força e amizade nesse momento.

Aos integrantes do laboratório de gênese e mineralogia: Marilya Gabryella, Isamor Gomes, Marlon Ribas, Juliet Emilia, Laercio Neves, Rayana Jacques e Gabriel Paes, pela risadas, companheirismo e cumplicidade.

Aos professores: José Coelho, Marcelo Metri, Ygor Jacques, Caroline Delpupo que tanto contribuíram para a realização desse trabalho A minha querida Socorrinho que sempre esteve com um abraço quentinho pronto para me aquecer quando fosse preciso.

A UFRPE (universidade que me orgulho de concluir meu doutoramento) e ao CNPQ pela bolsa concedida. **Meu muito obrigada a cada um de vocês, essa conquista é nossa!**

*“Lembre-se de Deus em tudo que você fizer
e ele te mostrará o caminho certo”*

Provérbios 3:6

Gênese de Horizontes Cimentados em Solos de Tabuleiros Costeiros do Estado da Paraíba

RESUMO

O processo de cimentação ocorre em diferentes ordens de solos, desde Argissolos a Espodosolos, em virtude do acúmulo de elementos como: ferro, alumínio ou silício apresentando horizontes com aspecto endurecido de formas extremas ou seja uma forte cimentação. Esses horizontes podem ser nomeados de Fragipã, Duripã, Horizonte plácico, orstein, e em situações em que o alumínio consiste no agente cimentante, são nomeados de caráter dúrico. Estudos sobre a Pedogênese desses horizontes ressaltam diferentes teorias quanto a sua formação, entretanto se faz necessário uma explicação precisa das ações desses agentes cimentantes no desenvolvimento desses horizontes. Assim o seguinte trabalho objetivou-se em: Avaliar as alterações nos horizontes dos solos estudados, em especial os que passaram por processo de cimentação, e originaram um caráter dúrico, assim como avaliar os principais agentes cimentantes envolvidos no processo desenvolvido com fins de compreender sua gênese e evolução e ao longo do tempo presente em solos formados por sedimentos terciários/quaternários (Grupo Barreiras) na região litorânea do Nordeste do Brasil. O trabalho foi realizado no município de Mataraca – PB, com três perfis com diferentes escalas de cimentação ao longo da paisagem, sendo classificados como Argissolo Amarelo, Espodosolo Ferri-Humilúvico, Espodosolo Humilúvico. Em campo realizaram-se descrições morfológicas e foram coletadas amostras para o processamento em laboratório, onde foram avaliados atributos físicos, químicos, mineralógicos e análises orgânicas e posteriormente realizado um tratamento de dados para análise de componentes principais-PCA e correlações que foram aplicadas nos resultados obtidos. Os atributos físicos e químicos refletem os sedimentos que formaram esses solos, sendo oriundos da formação barreiras, ou seja, esses solos se desenvolveram sobre sedimentos que já foram intemperizados, justificando assim a textura predominante arenosa em grande parte dos horizontes, assim como a química pobre em nutrientes, acidez e a alta saturação por alumínio encontrada. Dentre as extrações seletivas, o alumínio foi o elemento que se destacou em relação ao ferro ($8,26 \text{ g/kg}^{-1}$) e silício ($6,86 \text{ g/kg}^{-1}$), tendo o alumínio ligado a formas orgânicas extraído com pirofosfato de sódio ($52,80 \text{ g/kg}^{-1}$) apresentando a maior seletividade em relação aos demais. Para as análises mineralógicas da fração argila, tanto quanto para a difração de raio-X, como para análise térmica diferencial apresentaram a mesma composição com o quartzo como mineral primário dominante, seguido da presença de caulinita, anatásio, e feldspato-k e Gibsita. A composição da matéria orgânica apresentou uma predominância de Humina e ácidos fúlvicos, assim como no fracionamento do carbono oxidável as formas que apresentam maior recalcitrância se sobressaíram em relação às formas mais lábeis. Para a composição estrutural do carbono, para os horizontes cimentados são mais enriquecidos quando comparados com os que não houveram cimentação, assim como diferenças em sua composição estrutural. Com a aplicação da análise estatística a PCA, foi possível explicar 68% da variabilidade total dos dados, onde a PCA, agrupando horizontes cimentados versus horizontes não cimentados, e suas variáveis relevantes. Assim foi possível concluir que o elemento cimentante foi o alumínio juntamente com os complexos orgânicos, tendo o processo de podzolização se desenvolvendo concomitante com a cimentação.

Palavras-chave: Caráter Dúrico. Duripã. Fragipã. Podzolização

Genesis of Cemented Horizons in Coastal Tablelands Soils in the State of Paraíba

ABSTRACT

The cementation process occurs in different soil orders, from Argisols to Spodosols, due to the accumulation of elements such as: iron, aluminum or silicon presenting horizons with an extreme hardened aspect, that is, a strong cementation. These horizons can be named Fragipan, Duripã, Pláic horizon, orstein, and in situations where aluminum is the cementing agent, they are named duric character. Studies on the Pedogenesis of these horizons highlight different theories regarding their formation, however, a precise explanation of the actions of these cementing agents in the development of these horizons is necessary. Thus, the following work aimed to: Evaluate the changes in the horizons of the studied soils, especially those that underwent a cementing process, and gave rise to a duric character, as well as to evaluate the main cementing agents involved in the process developed in order to understand their genesis and evolution and over time present in soils formed by tertiary/quaternary sediments (Grupo Barreiras) in the coastal region of northeastern Brazil. The work was carried out in the municipality of Mataraca - PB, with three profiles with different scales of cementation along the landscape, being classified as Yellow Argisol, Ferri-Humiluvic Spodosol, Humiluvic Spodosol. In the field, morphological descriptions were carried out and samples were collected for processing in the laboratory, where physical, chemical, mineralogical and organic analyzes were evaluated and subsequently a data treatment for analysis of principal components - PCA and correlations that were applied to the results obtained. Among the selective extractions, aluminum was the element that stood out in relation to iron (8.26 g/kg - 1) and silicon (6.86 g/kg - 1), with aluminum bound to organic forms extracted with pyrophosphate of sodium (52.80 g/kg-1) showing the highest selectivity in relation to the others. For the mineralogical analysis of the clay fraction, as for the X-ray diffraction, as for the differential thermal analysis, they showed the same composition with quartz as the dominant primary mineral, followed by the presence of kaolinite, anatase, and k-feldspar and gibbsite. The composition of organic matter showed a predominance of humin and fulvic acids, as well as in the fractionation of oxidizable carbon, the forms that present greater recalcitrance stood out in relation to the more labile forms. For the structural composition of carbon, the cemented horizons are more enriched when compared to those that were not cemented, as well as differences in their structural composition. With the application of statistical analysis to PCA, it was possible to explain 68% of the total variability of the data, where the PCA, grouping cemented horizons versus uncemented horizons, and its relevant variables. Thus, it was possible to conclude that the cementing element was aluminum together with the organic complexes, with the podzolization process developing concomitantly with cementation.

Keywords: Duric character. Duripan. Fragipan. Podzolization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Localização da Área	29
Figura 2. Localização dos perfis com cobertura geológica (Fonte da Máscara: CPRM);	30
Figura 3. Processo de secagem para preparo das amostras no galpão	31
Figura 4. ARGISSOLO AMARELO distrófico fragipânico espodossólico	37
Figura 5. ESPODOSSOLO FERRI-HUMILÚVICO órtico dúrico	38
Figura 6. ESPODOSSOLO HUMILÚVICO órtico dúrico	38
Figura 7. Processo de cimentação em horizontes com caráter dúrico na região da Paraíba	39
Figura 8. Valores de pH em água, e pH em cloreto de potássio para os solos estudados	45
Figura 9. Extração de Ferro, Alumínio e Silício nos extratos de ditionito citrato-bicarbonato (DCB), oxalato (Oxa) e Pirofosfato (pi) para os 03 perfis estudados avaliando os horizontes cimentados e não cimentados	47
Figura 10. Relação Fe oxalato (Feox/FeDCB) Fe ditionito x Relação Al oxalato (Al oxa/Al dcb) Al ditionito	51
Figura 11. Difrátogramas de raios-X da fração argila dos perfis estudados, Ct: caulinita, Gb: Gibsita, Qz=Quartzo, Fd= Feldspato	55
Figura 12. Análise térmica diferencial para o perfil 01	59
Figura 13. Análise térmica diferencial para o perfil 02	60
Figura 14. Análise térmica diferencial para o perfil 03	61
Figura 15. FTIR para os perfis estudados	71
Figura 16. Análise de componentes principais para os perfis estudados	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atributos morfológicos dos perfis estudados	40
Tabela 2. Atributos Físicos dos solos estudados	43
Tabela 3. Atributos químicos dos perfis estudados	46
Tabela 4. Composição de elementos totais obtidos por fluorescência de raio-X, para os solos estudados	53
Tabela 5. Estimativa dos teores de minerais nas amostras obtidas através de modelagem pelo método Rietveld	58
Tabela 6. Caracterização da Matéria Orgânica nos Perfis estudados.	63
Tabela 7. Fracionamento para carbono orgânico oxidável	66
Tabela 8. Análise de correlação de Pearson do fracionamento do carbono orgânico oxidável, com as frações de carbono orgânico para substâncias húmicas.	67
Tabela 9. Relação entre metal e compartimentos orgânicos	68

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	13
1.1 Hipóteses	14
1.2 Objetivo	15
1.2.1 <i>Objetivo geral</i>	15
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Horizontes cimentados	17
2.2 Gênese de horizontes cimentados.....	20
2.3 Porque estudar horizontes cimentados abordando uma escala global e a luz da zona crítica?	25
2.4 Podzolização em ambientes de Tabuleiro Costeiro.....	27
3 METODOLOGIA	29
3.1 Caracterizações da Área de Estudo	29
3.2 Coletas das Amostras e Classificação do Solo.....	30
3.3 Caracterizações Física e Química.....	32
3.4 Extrações Seletivas.....	32
3.5 Análises mineralógicas.....	33
3.6 Análises Micromorfológicas	34
3.7 Caracterizações da Matéria orgânica.....	34
3.7.1 <i>Carbono Orgânico Total</i>	34
3.7.2 <i>Carbono Orgânico Oxidável</i>	34
3.7.3 <i>Carbono solúvel em água</i>	35
3.7.4 <i>Substâncias húmicas</i>	35
3.7.5 <i>Composição estrutural do COS com oxidação com H₂O₂ e suas características espectroscópicas</i>	35
4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 Atributos morfológicos.....	37
5.2 Atributos Físicos.....	41
5.3 Atributos Químicos	45
5.4 Extrações seletivas para Ferro, Alumínio e Silício.	46
5.4 Relação Oxa/DCB	50

5.5 Fluorescência de raio-X – FRX	52
5.6 Difrações de Raios-x DRX; e Análise Térmica Diferencial-ATD	54
6 Composições da Matéria Orgânica.....	62
6.1 Compartimentos da matéria orgânica e sua interação com metais	67
6.2 Composições estruturais do COS antes e após oxidação com H ₂ O ₂ como revelado por análise de FTIR.....	69
8 Análises de componentes principais-PCA.....	72
9 CONCLUSÃO.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
Apêndice A.....	82

1 INTRODUÇÃO GERAL

Horizontes cimentados originam-se de um acúmulo endurecido de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e ou óxido de ferro (Fe_2O_3), em diferentes proporções. Esses horizontes não representam formas de relevo, mas representam a alteração química das partes superiores das planícies e outras características geralmente em partes baixas do relevo. Em virtude da ocorrência desses horizontes, geralmente são solos com restrição a permeabilidade e desenvolvimento de raízes, podendo ser encontrado em solos com diferentes níveis de evolução.

O processo de formação que origina esses horizontes pode ocorrer nas mais diferentes regiões do mundo, desde que as condições para o desenvolvimento do processo ocorram. No Brasil ocorre com maior ênfase na região dos Tabuleiros Costeiros (conhecidos também como Platô Terciário) que correspondem a um relevo plano, com colinas de topos suaves e grau de dissecação de médio a baixo, platôs de origem sedimentar, que apresentam grau de entalhamento variável, ora com vales estreitos e encostas abruptas, ora abertos com encostas suaves e fundos com amplas várzeas, associados à Formação Barreiras.

Baseado na literatura sobre horizontes cimentados pode-se afirmar que sua formação é dada pela combinação de óxidos de ferro, alumínio e ou silício que se acumulam de forma excessiva, tornando o material endurecido, onde a presença desse agente determina a fragilidade do horizonte ali formado, como consequência uma restrição ao desenvolvimento de raízes, afetando o crescimento das plantas.

Diante do conceito de formação de horizontes cimentados, diferentes nomenclaturas cada uma com suas peculiaridades apresentam-se nos distintos sistemas de classificação de solos desde: Fragipã, Duripã, Caráter dúrico, horizonte petrodúrico, *orstein*, horizonte plácico.

Existem diferentes estudos que abordam a formação de horizontes cimentados e por distintas regiões no Brasil, ocorrendo sempre em áreas que tenham a ocorrência de tabuleiro costeiro, geralmente na região Nordeste o agente cimentante encontrado com frequência nos estudos realizados é o silício, entretanto isso não é regra, há regiões onde o alumínio se destaca em suas diferentes formas, sendo a presença de horizontes com o alumínio como agente cimentante nomeado como caráter dúrico.

Por definição, o caráter dúrico ocorre associada a uma cimentação forte em um ou mais horizontes dentro do perfil, incluindo-se solos com presença de duripã, ortstein, plácico e horizontes litoplíntico, concrecionário e petrocálcico.

Contudo apesar da existência de diversos estudos, sejam em níveis nacionais e internacionais sobre como ocorre a gênese da cimentação, ainda há uma carência de informações sobre esse tema, com uma série de lacunas a serem preenchidas, ou seja, informações que esclareçam o endurecimento desses horizontes associado a presença de agentes cimentantes.

Além disso, com o esclarecimento da gênese desses solos, será possível fornecer informações que contribuirão com toda a região onde será desenvolvida a pesquisa, tendo em vista que essas áreas ocorrem o cultivo de culturas expressivas economicamente, como cana-de-açúcar e abacaxi. Sendo o cultivo de cana-de-açúcar, uma importante fonte de renda na região em virtude do fornecimento de empregos gerados, e ao longo dos anos vem se expandindo, assim conhecer o manejo correto desses solos, em virtude das limitações que possuem, contribuindo diretamente com o desenvolvimento satisfatório dessas culturas beneficiando a população principalmente através da agricultura familiar com a consequência de uma melhor renda, além do que áreas antes não utilizáveis, podem se tornar produtivas gerando um avanço econômico no Estado da Paraíba.

1.1 Hipóteses

- O processo de cimentação é determinado pelos compostos aluminosos associados aos compostos orgânicos, ocorre em função da quantidade e da forma química dos agentes cimentantes.
- O processo de cimentação no ambiente estudado ocorre anterior ao processo de podzolização, evoluindo de Argissolos à Espodossolos, havendo nesses últimos expressões morfológicas intensas do processo de cimentação.

1.2 Objetivo

1.2.1 *Objetivo geral*

Avaliar as alterações nos horizontes dos solos estudados, em especial os que passaram por processo de cimentação, e originaram um caráter dúrico, assim como avaliar os principais agentes cimentantes envolvidos no processo desenvolvido com fins de compreender sua gênese e evolução e ao longo do tempo presente em solos formados por sedimentos terciários/quaternários (Grupo Barreiras) na região litorânea do Nordeste do Brasil.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Caracterizar frações e a estrutura química de compostos orgânicos de horizontes cimentados a fim de obter informações sobre o mecanismo de cimentação e podzolização.
- Indicar quais frações diferenciam os horizontes cimentados e estão envolvidas na complexação.
- Caracterizar qualitativa e semiquantitativamente os minerais da fração argila por difração de raios X;
- Avaliar o desenvolvimento dos horizontes que apresentam o caráter dúrico, assim evolução pedogenética nas ordens de solos que ocorrem o processo de cimentação;
- Quantificar os minerais presentes no horizonte cimentado em relação ao não cimentado com auxílio da modelagem Ritviold;
- Avaliar a atuação do carbono, assim como a forma predominante do elemento no processo de cimentação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os Tabuleiros Costeiros são ambientes formados por sedimentos do Grupo Barreiras, que formam morros e planaltos dissecado de topo convexo (CINTRA et al., 2009), com a presença de depressões circulares e dispostas no topo dos platô, formados por uma faixa que acompanha todo o litoral brasileiro desde o Rio de Janeiro até o Amapá, com uma largura de 100 a 200 km constituída de platôs sedimentares, cuja altitude varia de 20 a 50 metros em relação ao nível do mar (VILAS BOAS et al., 1996; FERREIRA et al., 2015).

De acordo com a Embrapa (2014), na região Nordeste (Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará), essa formação abrange aproximadamente 8,42 milhões de hectares, compreendendo um relevo de plano a ondulado com altitude média de 50-100m com platôs de origem sedimentar, que apresentam grau de entalhamento variável, ora com vales estreitos e encostas abruptas, ora abertos com encostas suaves e fundos com amplas várzeas.

Sua composição geológica de acordo com Rolim et al. (2016) e Schobbenhaus e Neves (2003) é composta de sedimentos clásticos a fossilíferos em geral friáveis, predominantemente arenosos, com marcante alternância de depósitos pelíticos e psamo-pelíticos e com espessura que varia de poucas a várias dezenas de metros. Além de arenitos esbranquiçados, amarelados e avermelhados, argilosos, finos e grosseiros, mal selecionados, com intercalações de argilitos vermelhos e variegados, quando ocorre associado ao processo de ferrólise intensa surge como crostas ferruginosas (CPRM, 2015).

A formação desses ambientes de tabuleiros costeiros se iniciou no período terciário com a deposição de sedimentos sob clima semiárido, com uma transição para um clima quente e úmido com o término do período pleistoceno. Para o Sudeste e Nordeste a transgressão marinha erodiu os sedimentos compondo as falésias e juntamente com o retrocesso do clima, novamente com retorno das características de aridez, os sedimentos reorganizados ou remontados originaram uma cobertura coluvial que recobre a formação barreiras por toda sua extensão do Rio de Janeiro e Espírito Santo (SUGUIO et al., 1982; SUGUIO et al., 1985; VILAS BOAS et al., 1985), e com a concentração de intensas chuvas, a ausência de vegetação condicionou-se o relevo em forma de tabuleiros com o material fornecido para a sedimentação (VILAS BOAS et al., 1985; DUARTE et al., 2000).

Na região da Paraíba essa unidade de paisagem ocorre na porção leste do estado, associado à bacia sedimentar Pernambuco-Paraíba, sendo recoberta pelos sedimentos do Grupo Barreiras, composto por Arenito conglomerático com matriz caulínica, com lentes e camadas de conglomerados e brechas, e quartzo e/ou feldspato, e intercalações de argilito caulínico silto-arenoso e arenito caulínico. E posteriormente no período quaternário ocorreu uma deposição de sedimentos colúvio – aluvial, apresentando uma espessura que pode alcançar até 10 m, formada por sedimentos arenosos e argiloarenosos com níveis de cascalho, expressando uma coloração de branca a amarelada (BELTRÃO, 2005).

O processo de sedimentação que formou esses ambientes resulta de uma atuação dos fatores de formação sobre embasamento cristalino, como alterações climáticas, oscilação do nível do mar, assim como movimentos tectônicos originados pela separação dos continentes, determinando assim através de uma sequência de eventos na direção do interior do continente.

Os sedimentos decorrentes desse processo são retirados das margens e das vertentes onde são carregados pela força da água acumulando-se em bancos de depósitos aluvionares, posteriormente com a deposição dos sedimentos e uma escassez de água resultará em oxidação (GUERRA et al., 2009) e quanto aos depósitos coluvionares que se localizam no sopé das vertentes, constituindo cones de dejeção (SUGUIO et al., 1998; LAVOR et al., 2016).

Posteriormente a esses processos de formação, estruturas pedológicas importantes se desenvolvem em distintas ordens de solos como: horizontes duricrusts, fragipã, duripã, lateritas hidromórficas, horizontes espódicos, horizontes com caráter dúrico, entre outros, se formam como resultado de sistemas de transformações naturais que envolvem além das interações morfopedogenéticas, fatores tectônicos, sedimentológicos e climáticos, que sofrem variações no tempo e no espaço (JACOMINE, 2001).

2.1 Horizontes cimentados

Horizontes cimentados ocorrem em diversas regiões ao redor do mundo, desde subúmidas a semiáridas, desde o sudeste africano (DILL et al., 2014), Austrália (TAYLOR et al., 2017), Estados Unidos (OBEAR et al., 2014). No Brasil, esses processos de formação do solo ocorrem com ênfase na região Nordeste, com maior intensidade nas áreas da planície costeira (ARAÚJO FILHO, 2004). Tais informações são

confirmadas em mapas de solos (1:100.000) ressaltando a expressão geográfica de tais horizontes nos solos do planalto costeiro é maior do que a representada nos mapas mais generalizados da região (ARAÚJO FILHO et al., 1999; ARAÚJO FILHO, 2003).

Diferentes sistemas de taxonomia de solos contemplam ordens como a presença desses horizontes (SOIL SURVEY STAFF, 2010), sendo nomeados de fragipã (que possuem a gênese menos compreendida) e duripã (que são desenvolvidos de forma pedogenética), *ortstein*, horizontes plácicos, horizonte dúrico, horizonte petrodúrico (SANTOS et al., 2018, FAO, 2015).

De acordo com Santos et al. (2018) o fragipã denomina-se por um horizonte mineral subsuperficial, que se apresenta endurecido quando seco, contínuo ou presente em 50% ou mais do volume de outro horizonte, normalmente de textura média. Estando subjacente a um horizonte B espódico, B textural ou horizonte álbico. Tem conteúdo baixo de matéria orgânica, aparentemente cimentado quando seco, tendo, consistência dura, muito dura ou extremamente dura.

Ainda dentro do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos-SIBCS, o Duripã se conceitua por um horizonte mineral subsuperficial, cimentado, contínuo ou presente em 50% ou mais do volume de outro horizonte com grau variável de cimentação por sílica e podendo ainda conter óxido de ferro e carbonato de cálcio. Apresentam uma consistência muito firme ou extremamente firme e são sempre quebradiços, mesmo depois de prolongado umedecimento, são insolúveis em solução de HCl 1 mol L⁻¹. As raízes e a água não penetram na parte cimentada, a não ser ao longo de fraturas verticais que se distanciam de 10 cm ou mais (SANTOS et al., 2018).

Incluído nas denominações para horizontes com materiais endurecidos o horizonte B espódico pode se apresentar como *Ortstein* – (Bsm, Bhsm ou Bhm). De espessura mínima de 2,5 cm, apresenta-se contínuo ou praticamente contínuo, fortemente cimentado, geralmente por complexos organometálicos. A consistência muito firme ou extremamente firme é geralmente independente do teor de umidade do solo (SANTOS et al., 2018).

O horizonte plácico pode também ocorrer como variação do B espódico. Denomina-se como um horizonte fino, de cor preta a vermelho-escura, que é aparentemente cimentado por ferro (ou ferro e manganês) e matéria orgânica, apresenta-se com forma ondulada e convola (muda de direção) em poucos centímetros (SANTOS et al., 2018). As raízes podem penetrar fissuras verticais espaçadas pelo menos 10 cm (BUOL, 2011).

Quanto a nomenclatura de horizonte dúrico de acordo com o sistema da WRB (WRB, 2015) conceitua-se como um horizonte subsuperficial, fracamente cimentado a nódulos endurecidos ou concreções cimentadas por sílica (SiO₂), presumivelmente na forma de sílica opala e microcristalina (durinodes). Entretanto para o SIBCS o termo dúrico é considerado como caráter em nível de classificação, caracterizando solos que apresentem cimentação forte em um ou mais horizontes dentro da seção de controle que defina a classe, incluindo-se solos com presença de duripã, ortstein, plácico e outros horizontes com cimentação.

O horizonte petrodúrico (FAO, 2015), nomeado de duripan pelo SIBCS, é um horizonte subterrâneo, geralmente de cor avermelhada ou marrom avermelhada, cimentado principalmente por sílica secundária, seus fragmentos secos ao ar não se retraem na água, mesmo após umedecimento prolongado.

Em virtude do clima associado a forma de relevo propício para o acúmulo de sedimento na paisagem, processos pedogenéticos podem ocorrer resultando em materiais do solo conhecidos como Duricrust ou pedocretes (POPE, 2013). Duricrust resultam em sedimentos predominantes por ferro (ferricrete), carbonato de cálcio (calcrete), sulfato de cálcio (gypcrete) e sílica (silcrete), alumínio (alcrete) e na sua maior parte possui sua estrutura endurecida em virtude dos processos pedogenéticos que ocorrerão (NASH; MCLAREN, 2007).

Em virtude do acúmulo de ferro férrico insolúvel em solos e regolitos, se formam ferricretes, que se definem como duricrusts ferruginosas cimentados por óxidos de ferro ocorrendo como crostas contínuas endurecidas nos horizontes ao longo da paisagem (LAMPLUGH, 1902; BOURMAN, 1993). De acordo com Phillips (2000), seguindo Goudie (1985), restringiu o termo ferricrete ao regolito endurecido devido à cimentação por ferro na zona de flutuação do lençol freático.

As origens dessas duricrust ferruginosas foram explicadas pelos movimentos laterais dos óxidos de ferro, tanto como partículas quanto em solução, resultando no preenchimento ou cimentação parcial de antigos vales ou pedons que transportam sedimentos clásticos cimentados com ferro e materiais orgânicos, que pode ser afetado por processos subsequentes de intemperismo (BOURMAN et al., 2020), que se acumulam como um resultado de migração de ferro ao solo ou regolito de fora do perfil (POPE, 2013).

Os processos pedogenéticos envolvidos na formação de ferricrete através de processos de dissolução, lixiviação e precipitação mineral que envolvem ciclos de umedecimento e secagem controlados por flutuações das águas subterrâneas e/ou movimentos fluviais (EZE et al., 2014).

Silcrete consiste em outra variedade de duricrust, formada como um resultado da acumulação perto da superfície da sílica secundário dentro de um solo, sedimento, rocha ou do material desgastado (MILNES; THIRY, 1992; SUMMERFIELD, 1983), onde é comumente encontrado afloramento em associação com superfícies terrestres antigas. Silcrete também ocorre como afloramentos mais limitados espacialmente, como um atraso na superfície ou como pedregulhos isolados em muitas outras áreas, incluindo a Europa Ocidental (NASH; ULLYOTT, 2007).

Para a formação de silcrete ocorre a interação de uma: uma fonte de sílica, transferência de sílica e precipitação de sílica. Os duricrusts siliciosos resultam em uma sucessão de fases de dissolução e recristalização de sílica causada por múltiplos episódios de infiltração e percolação de água (NASH; ULLYOTT, 2016). Evidências vistas na ocorrência frequente de quartzo encrustadas e outros grãos de aluminossilicatos (PARSONS; ABRAHAM, 2009).

Em nível de ordem de solos, desenvolvidos sobre áreas de tabuleiro costeiro Latossolos e Argissolos Amarelos, representam aproximadamente 67,5% e 25%, respectivamente, de todos os solos desta unidade geomorfológica (JACOMINE, 1996). E menos frequente, Espodossolos, Neossolos Quartzarênicos e Plintossolos (BRASIL, 1972).

2.2 Gênese de horizontes cimentados

Quanto à gênese e evolução desses horizontes, algumas teorias são ressaltadas na literatura, entretanto ainda existem muitas dúvidas a serem sancionadas. De acordo com Goudie (1985) a formação desses horizontes é resultado da combinação de sesquióxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) ou silício (Si) ou carbonato de cálcio e magnésio, gipsita e manganês que se acumulam de forma dominante ou substituíram material intemperizado, evoluindo para uma massa endurecida (CAMELO et al., 2018), levando à formação de um horizonte duro e denso, resultando em uma restrição ao desenvolvimento de raízes, afetando o crescimento das plantas.

De acordo com Bockheim e Hamink (2013) revisando essas teorias, a gênese desses fragmentos se agrupam em modelos físicos e químicos. Os modelos físicos enfatizam que essas “panelas duras” são formadas através de descontinuidades litológicas associadas à distribuição do tamanho de poros com fluxo de água que acumulam materiais. Os modelos químicos, por outro lado, apontam para a importância de produtos de intemperismo translocados por água, como a argila e as fases Fe, Al e Si, como agentes de ligação e pontes de partículas mais grosseiras.

A questão que ainda merece mais destaque é como ocorre esse processo de cimentação reversível, ou seja, consistência muito dura no estado seco e consistência quebradiça no estado úmido, de acordo com Wilson et al. (2010) as partículas de solo de textura fina se ligam a partículas mais grosseiras e formam pontes entre grãos, ocasionando uma cimentação.

Entretanto deve-se ressaltar que em solos ácidos, pobres em nutrientes e essencialmente arenosos pode se formar um horizonte endurecido, denominado *ortstein*, (SCHWARTZ, 1988), sua formação está associada a reação de destruição congruente dos argilominerais e a migração da matéria orgânica e dos complexos organometálicos para o subsolo, pois a hidrólise, sendo mais intensa que a dissolução do quartzo, leva a um enriquecimento residual neste mineral (BRAVARD; RIGHI, 1989). A migração de matéria orgânica e complexos organometálicos e sua deposição em materiais menos permeáveis durante períodos de relativa seca, essas reações no solo se associam com o processo de podzolização.

Sua morfologia típica inclui um horizonte O espesso e ácido, um horizonte E (álbico) branqueado e um horizonte B (espódico) enriquecido em compostos orgânicos solúveis, complexos organo-metálicos, alumínio e, às vezes, ferro. Os compostos orgânicos solúveis, produzidos pela decomposição da serapilheira e lixiviado do horizonte O, são os principais responsáveis pela translocação do Fe e Al dos horizontes A e E para o horizonte B (MOKMA et al., 2004). Esses compostos orgânicos podem quelar cátions como Fe^{3+} e Al^{3+} , aumentando sua solubilidade no solo e tornando-os disponíveis para translocação ou absorção subsequente pelas plantas (RANGER; NYS, 1994; VAN BREEMAN; BUURMAN, 1998).

Na região do Nordeste brasileiro, em áreas de tabuleiro costeiro (ambiente frequente de desenvolvimento desses horizontes) os principais agentes cimentantes que estão ligados à ocorrência desse processo de formação do solo são: sílica, óxidos e

hidróxidos de ferro e ou alumínio. Essas cimentações ocorrem como resultado de sucessões de fases de dissolução e recristalização causadas por múltiplos episódios de infiltração e percolação de água (THIRY et al., 2006) e precipitação mineral envolvendo ciclos de molhagem e secagem controlados por flutuações da água subterrânea e ou movimentos fluviais (EZE et al., 2014).

Existem diferentes estudos sobre a gênese de horizontes com a presença de cimentação (MOREAU et al., 2006; CORREA et al., 2008; GOMES et al., 2017), entretanto ainda há discordâncias sobre a gênese desses horizontes, apesar de existir um consenso geral de que o arranjo físico das partículas e a distribuição do tamanho dos poros contribuem diretamente para o desenvolvimento desses horizontes, ou seja, na característica morfológica mais típica. Ainda considerando que uma associação semelhante entre as partículas do solo pode se originar de várias fases minerais do solo, se faz necessário um conjunto de propriedades para identificar horizontes cimentados do ponto de vista químico e mineralógico.

Kendrick e Graham (2004) observando uma análise micromorfológica, verificaram uma interação entre os processos de dissolução e percolação ao longo do perfil, a dissolução e eluviação dominam a parte superior dos perfis, enquanto estruturas iluviais tipificam os horizontes mais baixos.

Entretanto de acordo com Prandel et al. (2014) o tipo de mineral na fração argila é mais importante que a quantidade de argila na promoção da cimentação. A predominância de caulinita em relação ao mineral expansível 2:1 dificulta o desenvolvimento de fissuras estruturais na secagem e favorece a formação de horizontes cimentados.

Em regiões de tabuleiro costeiro, a fração argila é composta essencialmente de minerais 1:1 do tipo caulinita, como também a presença de óxidos de ferro e alumínio, que constituem sedimentos mineralogicamente bastante estáveis e resistentes ao intemperismo (EMBRAPA, 1978; MATTOS, 1979).

A presença desses elementos como caulinita (Ct) e os óxidos de ferro influenciam diretamente a estrutura, consistência, infiltração e retenção de água e reações de troca iônica dos solos, conseqüentemente uma mineralogia predominantemente caulinitica resulta em solos com uma densidade mais elevada, maior proporção de poros pequenos e menor permeabilidade, em razão do ajuste face a face das placas dos minerais da fração argila (FERREIRA et al., 1999) alterando o comportamento hidrológico, bem como interferindo na produtividade dos solos (COELHO et al., 2001).

Um dos estudos precursores sobre solos cimentados na região Nordeste foi realizado por Jacomine (1974) avaliando solos com horizontes do tipo fragipã, no estado de Alagoas e Sergipe com caracterizações físicas, químicas, mineralógicas, constatando que esses solos eram extremamente duros quando secos, consistência firme a extremamente firme, ácidos (pH de 4,6 a 5,5) e saturação de bases extremamente baixa, indicando uma intensa lixiviação, com uma mineralogia predominantemente caulinitica.

Posteriormente, Boulet et al. (1998) realizaram estudos com horizontes do tipo fragipã e duripã, com extrações sequenciais de Fe, Al e Si com H₂O₂, oxalato, tendo o teor de silício em sua forma amorfa responsável pelo processo de cimentação na área estudada.

Romero (2003) avaliando solos com horizontes do tipo Duripã, em ambiente de tabuleiros costeiros, avaliou através de técnicas de extrações seletivas (DCB, oxalato) os elementos responsáveis pela cimentação e como atuavam na gênese desses solos e observou que alumínio e silício nas suas formas de baixa cristalinidade eram responsáveis pela cimentação e em virtude do acúmulo de argila, observou-se uma redução de poros, assim como a porosidade geral.

Araújo Filho (2003) analisando solos das ordens Argissolos Amarelo e Acinzentado e Espodossolos que apresentavam horizontes cimentados, formados sobre Tabuleiro Costeiro, com o objetivo de caracterizar a natureza dos agentes cimentantes envolvidos no processo, com auxílio de extrações seletivas: Tiron, Oxalato e Pirofosfato de sódio, onde foi possível constatar que os compostos aluminosos são responsáveis pelo processo de cimentação.

Moreau et al. (2006) estudando solos cimentados desenvolvidos sobre sedimentos de tabuleiros costeiros na região da Bahia, apresentando feições do tipo fragipã e duripã avaliando Ferro, silício e alumínio extraídos pelo ditionito citrato-bicarbonato e pelo oxalato de amônio, onde constatou os elementos responsáveis pela cimentação, na área estudada eram alumínio e silício.

Correa et al. (2008) estudando solos com cimentação branda do tipo fragipãs, avaliando características físicas, químicas e mineralógica, verificando que esses solos apresentaram uma baixa CTC, em virtude da mineralogia caulinitica, com uma argila de atividade baixa com correlação positiva com carbono orgânico.

Assim, diante de toda morfologia peculiar apresentada por horizontes cimentados é possível aferir que suas diversificações podem afetar significativamente o

comportamento físico-químico dos solos (BATISTA; SANTOS, 1995), e, mais particularmente, esses materiais podem afetar os seguintes atributos dos solos: densidade, capacidade de retenção de água, infiltração, erodibilidade, volume explorado pelas raízes, capacidade de troca catiônica (CTC), textura e estrutura, fatores que influem no comportamento hidrológico, bem como na produtividade dos solos (COELHO et al., 2001).

Em regiões de tabuleiro costeiro, a fração argila é composta essencialmente de minerais 1:1 do tipo caulinita, como também a presença de goethita e hematita. São, portanto, sedimentos mineralogicamente bastante estáveis e resistentes ao intemperismo (EMBRAPA, 1978; MATTOS, 1979).

A caulinita (Ct) e os óxidos de ferro influenciam diretamente a estrutura, consistência, infiltração e retenção de água e reações de troca iônica dos solos, consequentemente uma mineralogia predominantemente caulinitica resulta em solos com uma densidade mais elevada, maior proporção de poros pequenos e menor permeabilidade, em razão do ajuste face a face das placas dos minerais da fração argila (FERREIRA et al., 1999) alterando o comportamento hidrológico, bem como interferindo na produtividade dos solos (COELHO et al., 2001).

Como existem tão poucos estudos que avaliem características cristalográficas e químicas dos minerais presentes na fração argila do tipo 1:1 (caulinita) destes sedimentos, tais como: cristalinidade, composição química, morfologia e tamanho de partículas, etc. Tais estudos são extremamente necessários, tendo em vista que a caulinita formada em solos tropicais, recristaliza-se durante períodos de precipitação intensa, dando origem a uma caulinita neo formada (MATHIAN et al., 2019), entretanto solos desenvolvidos sobre sedimentos do Grupo barreiras, possui mineralogia herdada do material de origem, ou seja, a caulinita presente foi adicionada juntamente com os sedimentos na formação dos solos. Partindo do pressuposto que a caulinita adicionada juntamente com os sedimentos do Grupo Barreiras do Tabuleiro Costeiro é herdada do material de origem adicionado e após a formação desse solo, podem ocorrer processos de dissolução, juntamente com uma recristalização, dando origem a uma caulinita neo-formada, supõe-se que a caulinita presente nos horizontes cimentados se diferencia dos horizontes não cimentados.

De acordo com Balan et al. (2007) avaliando duas amostras de caulinita, uma típica dos horizontes sedimentares subjacentes e outra com maior grau de desordem de empilhamento encontrado nos solos lateríticos, constatou com auxílio de estudos

espectroscópicos uma mistura de dois tipos de caulinita, a ordenada prevalecente nas amostras dominadas por sedimentos e a desordenada sendo específica para o solo laterítico. Tendo em vista que a caulinita desordenada foi formada em virtude das flutuações das condições físico-químicas acarretando em condições transitórias de alta afinidade para a reação de precipitação.

Varajão et al. (2020) avaliando estruturas morfológicas e cristal químicas de caulinitas originadas em depósitos sedimentares do cenozóico, constataram a presença de caulinita pedogenética dominante sobre uma caulinita saprolítica desenvolvida por evolução *in situ*. Entretanto para os sedimentos transportados sobrejacente, apresentou-se uma mistura de caulinitas saprolíticas e pedogenéticas, caracterizando um perfil laterítico inverso.

Mathian et al. (2020) estudando perfis de Acrisoil amarelo e um Ferralsol vermelho, incluindo seus respectivos saprólitos, constatou no Ferralsol uma desordem da caulinita com aumento de ordem em direção ao topo do perfil com estudos com Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e para o Acrisol correspondem a caulinitas bem ordenadas.

2.3 Porque estudar horizontes cimentados abordando uma escala global e a luz da zona crítica?

Horizontes cimentados com suas diferentes características e nomeações ocorrem em todo o planeta, em ambientes com condições de formação do solo similares, entretanto por mais que vários estudos já tenham sido desenvolvidos sobre esse processo de formação é necessário avançar significativamente dentro da gênese de desses horizontes, com estudos que esclareçam a ação dos agentes cimentantes, ou seja, elementos químicos que atuam significativamente nesse processo de cimentação, além de uma pesquisa aplicada com metodologias que permitam conhecer em detalhes em nível microscópico e eletrônico a mineralogia das argilas e sua constituição, pois apesar de existirem muitos estudos, as explicações existentes ainda não são suficientes, se tornando pertinente avanço em pesquisas para evidenciar a gênese desses horizontes.

Sini et al. (2020) na África do Sul, avaliaram duricrusts que possuem como agente cimentante principal o ferro, e com auxílio de técnicas como Difração de raio-X (DRX) e fluorescência de raio-X (FRX), constatou os componentes mineralógicos gibbsita,

caulinita, hematita e quartzo, e que a quantidade desses elementos variou de acordo com a formação das fácies de cada duricrust.

Camelo et al. (2018) realizaram estudos com duricrust com auxílio de caracterizações químicas e mineralógicas associadas a extrações seletivas na verificação da morfologia associado ao acúmulo de ferro nas estruturas, onde constataram que essa face morfológica está associada ao local de formação desses ambientes, que refletem suas características policíclicas e poligênicas.

Wessel et al. (2020) na região meio-atlântica dos EUA, estudou solos com a presença de horizontes cimentados, especificamente hardpans, no intuito de compreender os processos que levam à cimentação com o intuito de contribuir com os gestores da terra que são responsáveis por garantir que o ambiente onde há presença de horizontes cimentados limite seus riscos ambientais associados.

Cocco et al. (2020) estudaram solos com presença de Hardpan na região do sul da Tunísia, com auxílio de levantamentos geomorfológicos e pedológicos, para identificação das áreas, e com caracterizações por análises físicas, mineralógicas, químicas e por observação microscópica. Onde foi possível observar que esses solos se formaram a partir da acumulação de sedimentos soprados pelo vento vindos de uma área próxima dominada por rochas. Além disso, a formação de horizontes se deveu à presença anterior de um lençol freático superficial e rico em sal e aos ciclos de solubilização-reprecipitação.

Além da importância de se estudar em escala global o processo de cimentação dos horizontes do solo, outro ponto que deve ser abordado é a importância em nível de zona crítica. Uma vez que a zona crítica da terra consiste em um ambiente onde ocorrem importantes interações entre rocha, solo, água, ar e organismos vivos, como também a regulação da disponibilidade de recursos que sustentam a vida, sendo o solo um dos principais componentes desse complexo, ressaltando que um das exigências fundamentais para incluir os estudos envolvendo o complexo da zona crítica são as funções do ecossistema e as suas bases para sustentabilidade (BANWART et al., 2013).

Estudos que possuem uma abordagem com um olhar voltado para zona crítica podem ser multidisciplinares, abordando processos específicos do solo como: intemperismo de minerais, percolação da água, enraizamento, decomposição, funções do solo e prestação de serviços ecossistêmicos a partir do sistema- solo Adhikari e Hartemink (2016) incluindo o bem-estar humano (WHITE et al., 2015).

Portanto diante da morfologia peculiar dos horizontes cimentados, é possível aferir que processos que acontecem nesse ambiente envolvem o complexo zona crítica,

pois a presença desses horizontes pode ser limitante para diferentes usos, em virtude dos processos de cimentação ocorrerem em uma profundidade relativamente rasa, e conseqüentemente resultarem em uma menor capacidade de retenção de água e menor profundidade de desenvolvimento de raízes. Horizontes cimentados particularmente os que estão próximos ou na superfície do solo, restringem a infiltração e a drenagem da água, o que pode levar à formação de lagoas e/ou escoamento após os eventos de precipitação, impedindo o desenvolvimento das culturas dificultando o cultivo em solos que possuem esses horizontes.

No entanto, estudos de zona crítica devem estar associados com a interface entre os compartimentos geológicos, hidrológico e atmosférico onde as rochas interagem com o ar, a água e a biota. Assim um dos processos que podem ser evidenciados no complexo Zona Crítica voltado para horizontes cimentados, é a infiltração de água nesses ambientes, pois influencia fortemente os fluxos de água através da Zona Crítica da Terra (CZ), como fluxo superficial, escoamento de águas pluviais, água disponível para plantas e recarga de águas subterrâneas; bem como uma variedade de processos associados, incluindo erosão do solo, geração de riachos, intemperismo de rochas e deslizamentos de terra (LEBEDEVA; BRANTLEY, 2020).

2.4 Podzolização em ambientes de Tabuleiro Costeiro

A região dos tabuleiros costeiros é formada por depressões que desenvolvem diferentes ordens de solo, com uma textura predominantemente arenosa e um hidromorfismo acentuado, com uma frequente presença da ordem dos Espodosolos, apresentando uma baixa fertilidade e uma drenagem variável assim como a presença de horizontes endurecidos.

Uma característica marcante desses solos é a lixiviação completa de todos os elementos do horizonte E eluviado, incluindo Al e Fe. Esses elementos são pouco solúveis nas condições de solução do solo, e a matéria orgânica deve desempenhar um papel fundamental no seu transporte.

A migração de matéria orgânica e a complexação organometálica e sua deposição em materiais menos permeáveis durante períodos relativamente secos pode gerar um horizonte endurecido, denominado *ortstein* húmico, ou faixas de coloração preta (SCHWARTZ, 1988). Diferentes teorias explicam o processo de podzolização, no entanto, a presença de complexos organometálicos (Al e Fe), aluminossilicatos (alofano, imogolita), oxihidróxidos de baixa cristalinidade consiste em um forte indicativo do

processo de podzolização. Entretanto Petersen (1976) justificou a podzolização pela migração de ácidos orgânicos que atuam dissolvendo o ferro e o alumínio presente nos minerais, assim como a imobilização no horizonte iluvial foi atribuída à precipitação/adsorção de complexos de metais orgânicos ou à degradação microbiana de compostos orgânicos (LUNDSTRÖM et al., 2000).

Em regiões de clima temperado a podzolização pode se desenvolver em solos zonais, em distintos tipos de rocha, entretanto em solos tropicais ocorre em ambientes com material de origem em terras baixas em materiais de origem pobres, como sedimentos arenosos de planície costeira ricos em quartzo ou em rochas quartzíticas em várias altitudes (GONZALES-PEREZ et al., 2008).

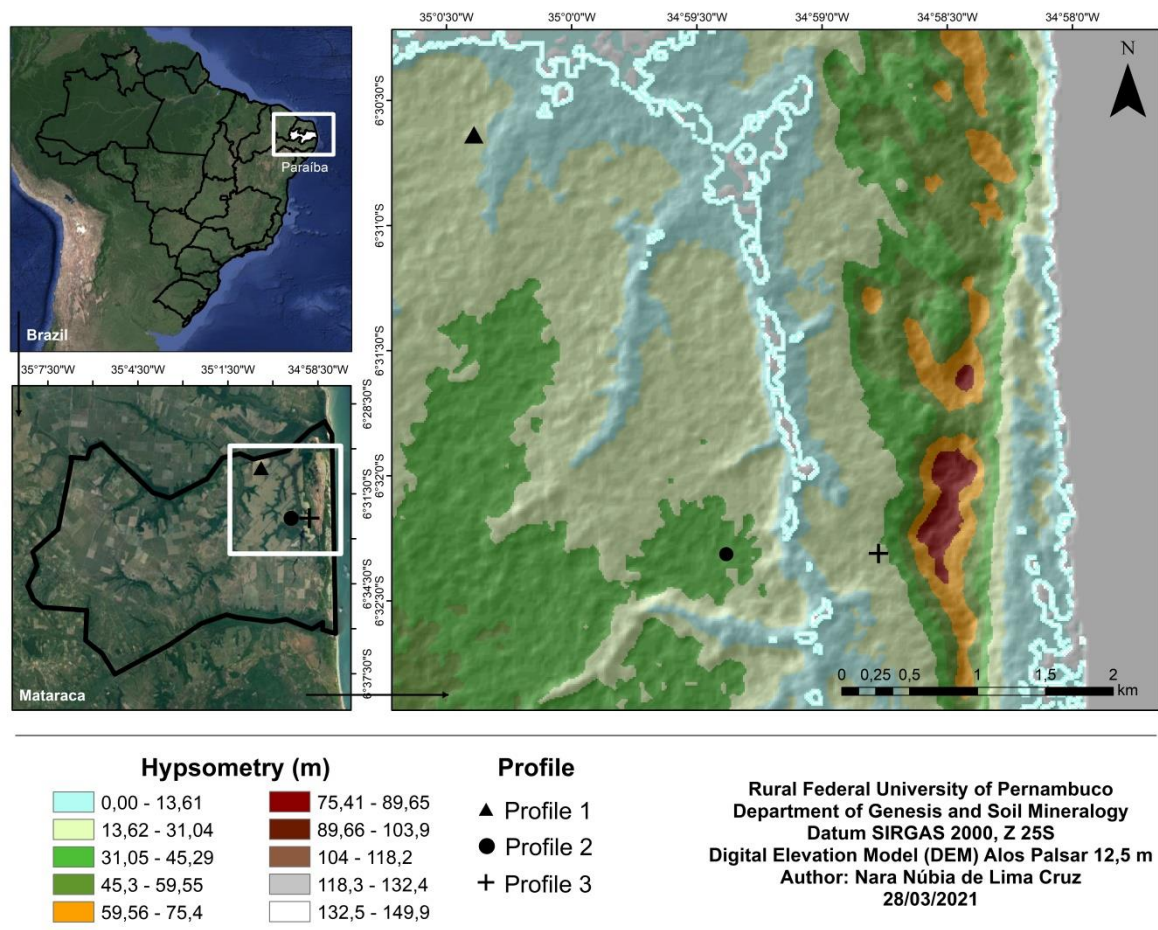
A podzolização em regiões tropicais ocorre geralmente em ambientes hidromórficos, onde a matéria orgânica dissolvida se desloca por horizontes iluviais percorrendo o perfil, o ferro geralmente é reduzido e transportado lateralmente, e o alumínio sendo o cátion dominante, onde a composição dos horizontes B espódico presentes em ambientes tropicais se assemelha a composição da matéria orgânica dissolvida (VAN BREMER E BURMAN 2002). As condições ambientais e os compostos secundários que contribuem com o desenvolvimento da podzolização, justificam a presença de diferentes teorias que explicam o processo, a concentração de cátions contribuem com a regulação da acidez (LOPES-MAZZETTO et al., 2018; LUNDSTRÖM et al., 2000; ROTHSTEIN et al., 2018), assim como o material vegetal contribuindo com a qualidade da matéria orgânica, afetando pH e o alumínio presente (ROTHSTEIN et al., 2018).

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterizações da Área de Estudo

O seguinte trabalho foi realizado no município de Mataraca – PB, localizado na Microrregião Mataraca e na Mesorregião Mata Paraibana, situado no litoral norte do Estado da Paraíba, nordeste brasileiro. A classificação climática da região, de acordo com Köppen, é Às', definida como tropical chuvoso e precipitação anual média 1557 mm. (concentrada no período de março a agosto), com temperatura média anual é de 25,5 °C.

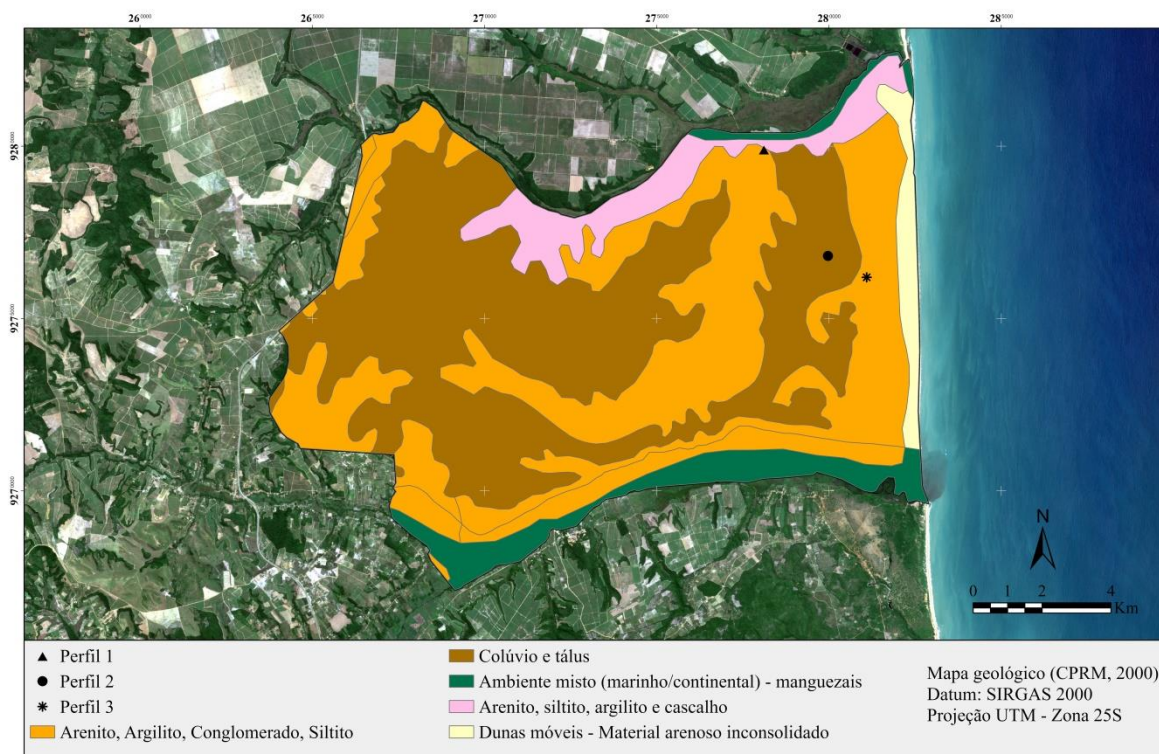
Figura 1. Mapa de Localização da Área



Quanto a sua geologia sendo constituído (CPRM 2005) por sedimentos da era cenozoica do período Neogéno: Depósitos arenosos e areno-argilosos: coberturas

inconsolidadas arenosas a areno-argilosas, com granulometria variando de areia fina a muito grossa e grânulos dispersos; localmente podem apresentar níveis de cascalho se lentes de argila.

Figura 2. Localização dos perfis com cobertura geológica (Fonte da Máscara: CPRM)



Apresenta um relevo suave-ondulado a plano, com uma vegetação composta basicamente por Floresta Subperenifólia trechos de Cerrado Subperenifólio (CPRM, 2005). O uso atual dos perfis que foram selecionados é sob cultivo de cana-de-açúcar, e nos arredores há cultivo de mandioca e abacaxi.

3.2 Coletas das Amostras e Classificação do Solo

Os perfis de amostragem foram delimitados dentro de uma escala de evolução do processo de cimentação, em um transecto litoral-continente. A seleção dos perfis foi executada com auxílios de mapas e um intenso reconhecimento e estudos sobre a área, compondo uma sequência baseada no processo de formação do solo avaliado.

Em seguida os perfis foram descritos de acordo com o Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (SANTOS et al., 2013b) e do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013a), com a descrição morfológica,

evidenciando cor, textura, estrutura, porosidade, consistência, transição entre horizontes e ou camadas. Após a escolha dos perfis e sua classificação, as amostras foram coletadas em todos os horizontes, amostras deformadas e não deformadas preservando a estrutura de campo, e envolvidas “plástico-bolha”, separando-as das amostras vizinhas, com a mínima perturbação possível a fim de evitar que se quebrassem no transporte para o laboratório. Para o início dos procedimentos das análises as amostras foram submetidas a secagem ao ar, no galpão de armazenamento do Departamento de solos, em seguida passadas em peneira de 02 mm para obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA).

Figura 3. Processo de secagem para preparo das amostras no galpão



3.3 Caracterizações Física e Química

A análise granulométrica determinou-se pelo método Densímetro (modelo ASTM no. 152H), adaptado conforme Almeida (2008). Foram utilizadas 40 gramas, posteriormente submetida à dispersão química Calgon (Hexametáfosfato de Sódio e Carbonato de Sódio), e à dispersão física utilizando agitador mecânico tipo Wagner por 16 horas, em 50 rpm.

Após o procedimento da análise, realizaram-se os cálculos de quantificação das frações areia e argila individualizada, e o silte foi obtido por diferença. Identificando assim, a textura dos solos por meio do triângulo textural.

Posteriormente com a mesma metodologia de separação granulométrica foram obtidos os teores de argila dispersa em água (ADA), e de posse dos resultados foram calculados: grau de floculação (%) = $(\text{argila total} - \text{argila em água} / \text{argila total} \times 100)$, relação silte/argila.

A densidade do solo foi avaliada pelo método do “torrão parafinado” segundo (ALMEIDA et al., 2017), quanto a densidade de partículas, o método do balão volumétrico foi utilizado (VIANA et al., 2017), e em seguida realizou-se cálculos de porosidade total do solo (Pt).

Para a verificação da evolução geoquímica e do intemperismo, foram semiquantificados os seguintes elementos: Na^+ , Mg^{2+} , Al^{3+} , Si, P, K^+ , Ca^{2+} , Ti e Fe, onde estes elementos foram verificados nas amostras de TFSA maceradas em 80 mesh, com auxílio do espectrômetro de fluorescência de raios - X.

Para a caracterização química, as análises foram realizadas pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EPARN), em virtude dos pontos coletados estarem inseridos no projeto de Zoneamento pedoclimático da área do Canal das Vertentes Litorâneas da Paraíba.

3.4 Extrações Seletivas

Os elementos Ferro, Alumínio, e Silício foram obtidos através dos métodos de extração do ditionito-citrato-bicarbonato de sódio verificado na TFSA, onde esse método se objetiva em realizar a dissolução seletiva dos óxidos de ferro pedogenéticos de alta e baixa cristalinidade e formas não cristalinas (MEHRA; JACKSON, 1960; HOLMGREN, 1967) e oxalato ácido de amônio no escuro (MCKEAGUE; DAY, 1966) apenas baixa

cristalinidade. No extrato, os teores de Ferro, Alumínio e Silício e os resultados foram obtidos na forma de óxidos. A partir dos resultados dos teores de Fe e Al foi calculada a relação Fe_o/Fed , para verificação do grau de cristalinidade dos óxidos de ferro presentes nas amostras.

Para a determinação de ferro, alumínio, das frações ligadas a complexos orgânicos os elementos foram extraídos com pirofosfato $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, (conforme método descrito por MCKEAGUE et al., 1971) onde se utilizou 0,3 gramas de solo, adicionando-se 30 ml do extrator em tubos falcon de 50 ml, as amostras foram agitadas a 120 rpm por uma noite (16 horas). Após as 16 horas as amostras serão centrifugadas a 2000 rpm por 30 minutos.

Para a determinação adicional do alumínio ligado a matéria orgânica, utilizou-se o extrator Cloreto de cobre a $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 3,0. Utilizou-se 05 g de solo, adicionando 50 ml de solução extratora e agitando por 5 minutos, deixando em repouso por 12 horas, seguida de nova agitação de por 30 minutos, realizou-se a lavagem em papel ácido e posteriormente obteve-se a leitura do extrato (JUO; KAMPRATH, 1979).

A determinação da leitura dos extratos foi realizada em espectroscopia de absorção atômica em um EAA Perkin Elmer modelo AAnalyst 200.

3.5 Análises mineralógicas

Para as análises mineralógicas da fração argila, a obtenção da argila foi através do procedimento de fracionamento das partículas do solo com base na Lei de Stokes. A argila natural foi submetida, posteriormente, a pré-tratamentos para eliminação dos agentes cimentantes, carbonatos, matéria orgânica e óxidos de ferro, utilizando acetato de sódio 1 mol L^{-1} a pH 5,0, peróxido de hidrogênio 15% v/v e solução de ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), respectivamente (JACKSON, 1975).

Após a remoção dos óxidos de ferro cristalinos alíquotas das amostras foram saturadas com $MgCl^2$ 1 mol L^{-1} , irradiadas em difratômetro de raios-X onde utilizou-se um difratômetro Shimadzu XRD 6000, operando com radiação de Cu $K\alpha$ a 40 kV e 30 mA, com monocromador de grafite e, em seguida, saturadas com etileno-glicol para nova irradiação.

Para aperfeiçoar a caracterização e identificação dos minerais presentes, foram realizados, os tratamentos de saturação por K^+ e Mg^{2+} (JACKSON, 1975). As amostras

foram saturadas com K^+ (KCl $1\ mol\ L^{-1}$) e analisadas depois da aplicação de sucessivos tratamentos de aquecimento, inicialmente a $25\ ^\circ C$ e após 3 horas de aquecimento (para cada temperatura), a 110 , 350 e $550\ ^\circ C$. Para a saturação com Mg^{2+} , foi procedida à análise com a temperatura ambiente.

As frações de argila não orientada (argila natural, sem remoção dos óxidos de ferro), na forma de pó, em suporte de alumínio. A avaliação semiquantitativa dos minerais identificados na fração argila será feita com base na intensidade dos picos característicos de cada mineral, mediante cálculos de suas áreas (JOHNS et al., 1954).

Posteriormente procedeu-se tratamento de refinamento na interpretação das amostras com a utilização do método Rietveld assim como a quantificação dos minerais presentes.

3.6 Análises Micromorfológicas

As análises micromorfológicas em seções finas foram descritas segundo recomendações de Stoops et al. (2010); Castro e Cooper (2019) e Stoops (2021), observadas em Microscópio Petrográfico Polarizado Trinocular Laborama com luz transmitida e registradas por câmera LABCS-1001 com adaptador C Mount.

3.7 Caracterizações da Matéria orgânica

3.7.1 Carbono Orgânico Total

Para determinação do carbono orgânico total, as amostras foram maceradas e tamisadas em peneira de 60 mesh, em seguida foram analisadas por meio de analisador elementar com combustão a seco no analisador de modelo LECO CN-2000.

3.7.2 Carbono Orgânico Oxidável

O carbono orgânico Oxidável determinou-se por Mendonça & Matos (2005), em uma adaptação do método proposto por Chan et al. (2001), no qual extraiu-se com 03 concentrações:

Fração 1 ($3\ mol\ L^{-1}\ H_2SO_4$) – Carbono orgânico oxidado com $3\ mol\ L^{-1}$ de H_2SO_4 .

Fração 2 ($6\ mol\ L^{-1} - 3\ mol\ L^{-1}\ H_2SO_4$) – Diferença do carbono orgânico oxidável extraído entre $6\ mol\ L^{-1}$ e $3\ mol\ L^{-1}$ de H_2SO_4 .

Fração 3 ($9 \text{ mol L}^{-1} - 6 \text{ mol L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$) – Diferença do carbono orgânico oxidável extraído entre 9 mol L^{-1} e 6 mol L^{-1} de H_2SO_4 .

Fração 4 ($\text{COT} - 9 \text{ mol L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$) – Diferença entre o carbono orgânico total e o carbono oxidável extraído por solução 12 mol L^{-1} de H_2SO_4 .

3.7.3 Carbono solúvel em água

O carbono solúvel em água é um método de estimativa de formas solúveis de C presentes do solo, e possivelmente, de muito fácil degradação. Utilizou-se 10 g de solo em erlenmeyers de 125 mL e posteriormente adicionado 20 mL de água deionizada. Em seguida as amostras foram agitadas por 15 minutos em agitador horizontal e centrifugadas a 1.500 rpm por 10 minutos e filtradas em papel de filtro quantitativo. Posteriormente procedeu-se a leitura em espectrofotômetro com comprimento de onda de 495 nm.

3.7.4 Substâncias húmicas

As substâncias húmicas foram fracionadas quimicamente. Os procedimentos para extração dos ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) e humina (HUM) do solo foram de acordo com os usualmente utilizados pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (IHSS- International Humic Substances Society) e propostos por Swift (1996) (Adaptado por MENDONÇA; MATOS, 2005).

A TFSA foi submetida a solução de NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$), a solução obtida após centrifugação foi acidificada até pH 2 com H_2SO_4 (20%) para precipitação dos ácidos húmicos, os separando dos ácidos fúlvicos, sendo a humina, presente no resíduo remanescente seca em estufa a $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Posteriormente realizou-se a determinação quantitativa do carbono orgânico em cada fração segundo método proposto por Yeomans e Bremner (1988), por meio de oxidação, utilizando solução de dicromato de potássio a $0,167 \text{ ml L}^{-1}$ e H_2SO_4 concentrado com aquecimento em bloco digestor.

3.7.5 Composição estrutural do COS com oxidação com H_2O_2 e suas características espectroscópicas

Foram tratados 40 g de solo, sendo purificados com ácido fluorídrico (HF) a 10% de acordo com Gonçalves et al. (2003). O tratamento de HF foi realizado adicionando

40mL de HF 10% a 40 g de TFSA. A suspensão foi agitada durante 02h e centrifugada (3000 rpm), o sobrenadante removido. Este procedimento foi repetido 05 vezes (a suspensão foi agitada durante 10 min). As amostras foram então lavadas 06 vezes com água deionizada para remover HF residual e posteriormente secas em estufa (45 ° C).

Para o tratamento com peróxido de hidrogênio (H₂O₂) pesou-se 16 g de solo (devido ao baixo teor de carbono encontrado), para cada g de solo, foram adicionados 2,5 ml de H₂O₂, a 30 % por 15 dias onde era possível observar o fim da queima da matéria orgânica. Após a queima total, as amostras foram aquecidas por 16 horas em estufa por 45 ° graus, em seguida centrifugadas por 10 minutos a 10000 FCR. Em seguida foram lavadas por 05 vezes com água destilada.

Após o tratamento das amostras, foram maceradas e passadas em peneira de 60 mesh, em seguida procedeu-se as leituras no Espectro de Infravermelho Spectrum Two, Perkin-Elmer. Os espectros de infravermelho foram obtidos na faixa de 4000-400 cm⁻¹, utilizando pastilhas com KBr, sendo 100 varreduras por espectro, com resolução de 4 cm⁻¹.

4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Após a obtenção dos resultados, os dados foram submetidos à Análise de Componentes Principais, (SAS INSTITUTE, 2002), juntamente análises de correlação entre as variáveis.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Atributos morfológicos

Os atributos morfológicos estão apresentados na tabela 01, e as descrições detalhadas dessas informações estão apresentadas no apêndice A. De acordo com os critérios do SiBCS (SANTOS, 2018) os perfis estudados foram classificados como: P1 – ARGISSOLO AMARELO distrófico fragipânico espodossólico (figura 04), considerando que o quarto nível categórico foi definido como típico, pois não se encaixava nas outras categorias citadas, assim como não havia categorias para incluir o termo fragipã que está presente no perfil. Para o P2 – ESPODOSSOLO FERRI-HUMILÚVICO Órtico dúrico (figura 05) devido a não ocorrer os sufixos Bs e ou Bsm e para o P3 - ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Órtico dúrico (devido apresentarem o caráter dúrico dentro dos 100 cm de espessura) (Figura 06).

Figura 4. ARGISSOLO AMARELO distrófico fragipânico espodossólico.



Figura 5. ESPODOSSOLO FERRI-HUMILÚVICO Órtico dúrico

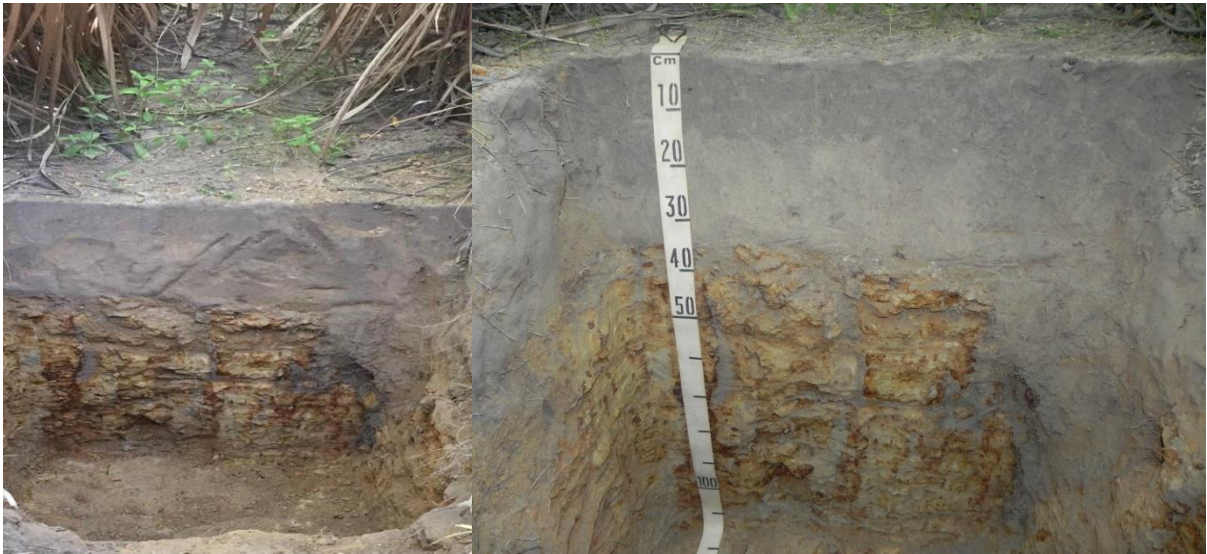
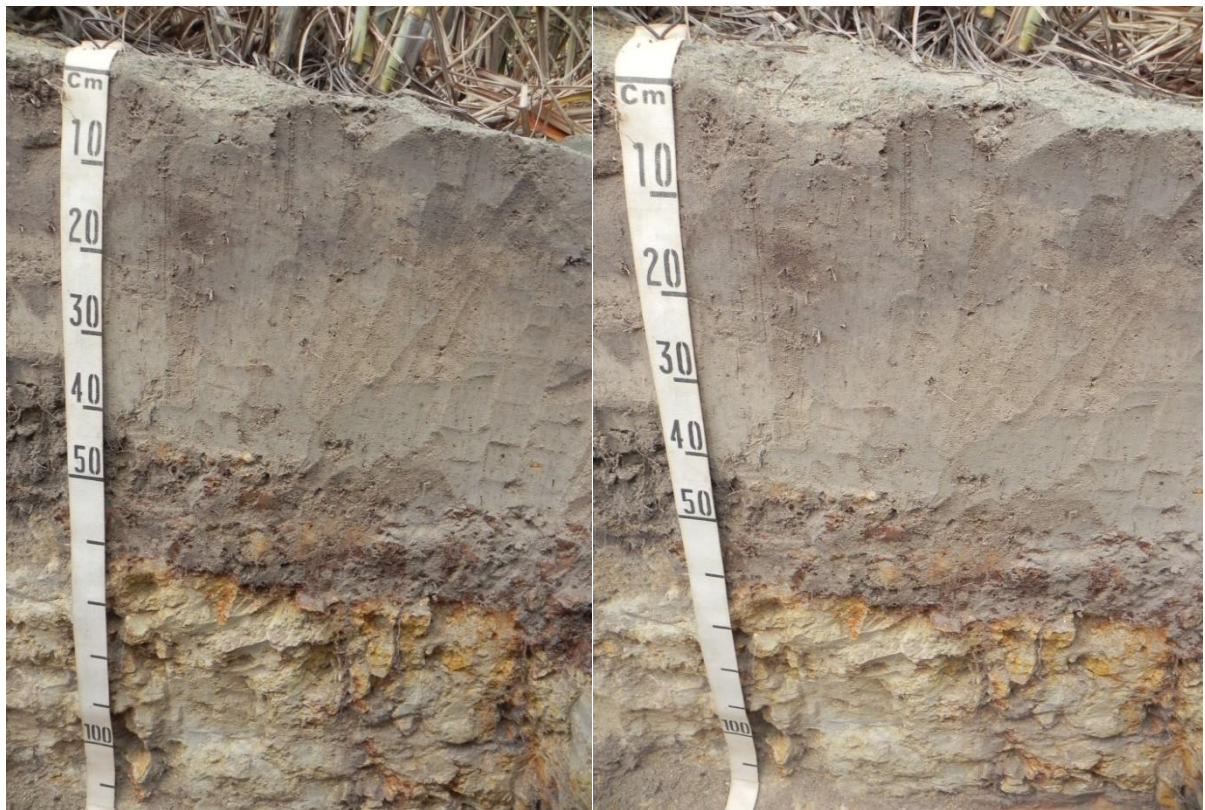


Figura 6. ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Órtico dúrico



Observando a morfologia dos horizontes estudados com auxílio das figuras 05, 06, 07 apresentadas acima é possível verificar através da morfologia a ocorrência do processo de cimentação do solo. Para o perfil 01 a presença de fragipãs com a presença de Btx e

um B'tx que representam horizontes de cimentação mais branda, e para o perfil 02 verificou-se presença do caráter dúrico, com a presença dos horizontes Bm, e para o perfil 03 com a presença do horizonte Bhm/E e Bsm, com cimentação mais acentuada.

Figura 7. Processo de cimentação em horizontes com caráter dúrico na região da Paraíba



Tabela 1. Atributos morfológicos dos perfis estudados

Horizontes	Prof (cm)	Cor Úmida	Mosq. Úmido	Textura	Estrutura	Consistência Úmido	Consistência Molhada	Transição
P1 – ARGISSOLO AMARELO distrófico fragipânico espodossólico								
P1Ap	0-11	10 YR 3/2	-	Franco-Arenoso	Fraca, Pequena a média, granular, bloco subangular	Muito friável	Lig. Plástico Lig. pegajoso	Abrupta ondulada
P1Bt	11-74	7.5 YR 5/4	-	Franco Argilo-arenoso	Fraca, pequena a média, bloco subangular	Friável	Plástico Pegajoso	Abrupta irregular
P1Btx	74-80	10 YR 5/4	5YR 4/6 7.5 YR 5/8	Franco Argilo-arenoso	Maciço a fraco, pequena a média, bloco subangular a bloco angular	Firme	Lig. Plástico Lig. pegajoso	Abrupta irregular
P1Bt/Btx	80-94	10 YR 6/3	5 YR 4/6	Franco Argilo-arenoso	Maciço a fraca, pequeno a media, bloco subangular	Firme	Lig. Plástico Lig. pegajoso	Abrupta irregular
P1B'tx	94-140	10 YR 6/4	5 YR 4/6 2.5 YR 3/6	Franco-Arenoso	Maciço a fraca, pequeno a media, bloco subangular	Firme	Lig. Plástico Lig. pegajoso	-
P2 – ESPODOSSOLO FERRI-HUMILÚVICO Órtico dúrico								
P2Ap	0-15	10 YR 4/2	-	Franco-Arenoso	Fraca, pequena a média, bloco subangular	Muito friável	Lig. Plástico Não pegajoso	Clara e plana
P2E	15-38	10 YR 5/2	-	Areia-Franca	Fraca, pequena a média, bloco subangular	Muito friável	Lig. Plástico Não pegajoso	Abrupta e plana
P2Bm1	38-70	10 YR 6/4	2.5 YR 3/6	Franco-Arenoso	Extremamente maciço coesa, extremamente firme,	Extrem. Firme	Lig. Plástico Lig. pegajoso	Difusa e plana
P2Bm2	70-115	10 YR 6/4	2.5 YR 3/6 7.5 YR 5/8	Franco-Arenoso	Extremamente maciço coesa, extremamente firme	Extrem. Firme	Não Plástico Lig. pegajoso	-
P3 – ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Órtico dúrico								
P3Ap	0-14	10 YR 4/2	-	Franco-arenosa	Fraca, pequena a média, granular a bloco subangular	Muito friável	Lig. Plástico Não pegajoso	Clara e plana
P3E	14-45	10 YR 5/3	-	Franco-arenosa	Fraca, pequena a média, bloco subangular	Muito friável	Lig. Plástico Não pegajoso	Abrupta e Ondulada
P3Bhm/E	45-64	5 YR 2.5/2	-	Franco-arenosa	Muito coeso/fraco, extremamente firme/muito friável	Extrem. firme/ Muito friável	Lig. Plástico Não pegajoso	Abrupta e Ondulada
P3Bsm	64-115	10 YR 6/3	10 YR 6/6 5 YR 5/6	Franco-arenosa	Muito coesa, extremamente firme	Extrem. Firme	Lig. Plástico Não pegajoso	-

- O topo não foi descrito morfológicamente

Para as cores encontradas nos perfis nos horizontes superiores (onde não há endurecimento) predominam cores mais brunadas, variando de bruno-acinzentado-muito-escuro (10 YR 3/2) a bruno acinzentado-escuro (10 YR 4/2). Nos horizontes endurecidos as cores variam desde o (10 YR 6/3) até o amarelo (10 YR 6/4) e amarelo avermelhado (2.5 YR 3/6) para as áreas onde apresenta um mosqueado.

Quanto as estruturas encontradas para o P1- a estrutura apresentou-se como fraca (horizontes friáveis) e maciça (para os horizontes cimentados) se desfazendo em blocos subangulares, já para o P2 e P3 as estruturas se apresentaram como fraca (horizontes friáveis) se desfazendo como blocos subangulares e variando de extremamente maciço a muito coeso.

As ordens de solos avaliadas no estudo representam um sequência de evolução de solos que se encontra nos tabuleiros costeiros presentes na região Nordeste do Brasil corroborada por Araújo Filho et al. (2001), de Argissolos a Espodossolos. Geralmente essa sequência ocorre associada a tabuleiros que possuam depressões fechadas, com zonas que direcionam o fluxo hídrico na mesma direção ocasionando uma degradação das argilas e arenizando as bordas das depressões acarretando na formação de um Espodossolo (FORTUNATO et al., 2004).

Além da forma da paisagem, o processo de acidólise contribui diretamente com o desenvolvimento desses solos, em virtude da convergência de fluxos associado ao acúmulo de ácidos orgânicos acarretando na destruição de argila e migração desses ácidos complexando e removendo metais, principalmente Fe e Al, dos horizontes superficiais sendo translocados e precipitados nos horizontes subsuperficiais, contribuindo com o desenvolvimento desses solos (CHAUVEL, 1982; KAMPF; CURI, 2012).

5.2 Atributos Físicos

Os solos estudados apresentaram a textura predominantemente arenosa, para o perfil 01, onde há ocorrência de fragipã a textura variou entre (franco-arenosa e franca argilo-arenosa) e para os perfis 02 e 03 a textura variou entre (franco-arenosa e areia franca) (tabela 02), onde para os teores de argila, os maiores valores foram encontrados no Argissolo Amarelo (Perfil 01), a textura encontrada já era esperada pelo conhecimento prévio do material de origem desses solos, visto que esses solos foram desenvolvidos a partir dos sedimentos do Grupo Barreiras (MOREAU et al., 2006).

Os teores de silte se apresentaram elevados quando comparados com os horizontes cimentados com os que não ocorreram cimentação principalmente no P3, entretanto esses valores podem ser justificados em virtude dos solos estudados terem sido desenvolvidos através de sedimentos intemperizados, ou seja após a deposição dos sedimentos para formação desses solos, a fração silte não sofreu intenso intemperismo a ponto de alterar a granulometria desses solos.

A relação silte/argila que apresenta baixos valores sendo indicativo de solos intemperizados, entretanto na situação do seguinte estudo essa relação não é representativa, em virtude dos solos serem originados com depósitos de sedimentos pré – intemperizados, portanto essa relação representa o desenvolvimento do material de origem do solo que já se depositou com o seguinte desenvolvimento pedogenético.

Para os valores de densidade do solo é possível observar que os maiores valores são encontrados nos horizontes onde ocorre o processo de cimentação (tabela 02). Esses valores encontrados nos horizontes cimentados podem ser resultado do empacotamento dos componentes desses horizontes, ocasionando uma maior retenção de água, assim como um acúmulo de elementos de cimentação (SILVA et al., 2019).

Para a argila dispersa em água (ADA), observa-se que os maiores valores encontram-se nos horizontes não cimentados quando comparado aos que ocorreram o processo de cimentação, esses teores estão associados a presença de matéria orgânica que ocorre nesses horizontes superficiais, contribuindo para diminuição do PCZ e ocasionando uma dispersão da argila em água.

Tabela 2. Atributos Físicos dos solos estudados

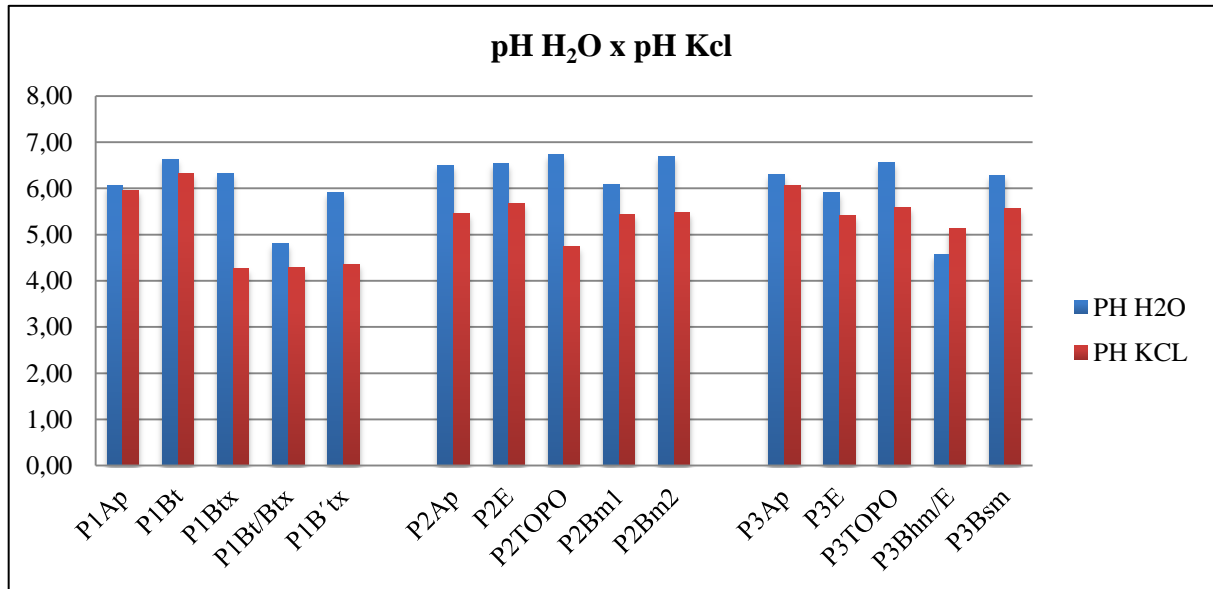
Horizontes	Prof (cm)	Areia (2,0-0,05mm)	Silte (0,05-0,002 mm)	Argila (< 0,002 mm)	Textura	Ds	Dp	ADA	Pt	Relação Silte/Arg
P1 – ARGISSOLO AMARELO distrófico fragipânico espodossólico										
P1Ap	0-11	790,29	57,00	152,50	FrancoArenosa	1,67	2,56	217,65	0,35	0,22
P1Bt	11-74	721,32	65,00	213,70	Franco Argilo-arenosa	1,65	2,50	266,67	0,34	0,20
P1Btx	74-80	573,14	91,00	336,30	Franco Argilo-arenosa	1,74	1,64	70,59	0,32	0,20
P1Bt/Btx	80-94	604,46	108,00	287,30	Franco Argilo-arenosa	1,83	2,60	119,61	0,29	0,27
P1B'tx	94-140	539,12	125,00	336,30	FrancoArenosa	1,64	2,11	70,59	0,38	0,28
P2 – ESPODOSSOLO FERRI-HUMILÚVICO Órtico dúrico										
P2Ap	0-15	830,88	61,00	94,70	FrancoArenosa	1,28	2,65	119,61	0,52	0,30
P2E	15-38	855,15	184,00	70,20	Areia Franca	1,44	2,52	119,61	0,43	1,04
P2TOPO	ND	650,74	160,00	160,00	FrancoArenosa	-	2,49	70,59	ND	0,43
P2Bm1	38-70	705,83	121,00	187,80	FrancoArenosa	2,11	2,53	70,59	0,17	0,41
P2Bm2	70-115	678,14	141,00	178,00	FrancoArenosa	1,89	2,53	119,61	0,26	0,50
P3 – ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Órtico dúrico										
P3Ap	0-14	795,58	124,00	80,00	Francoarenosa	1,39	2,52	119,61	0,45	0,67
P3E	14-45	748,00	197,00	55,50	Francoarenosa	1,43	2,55	119,61	0,44	1,22
P3TOPO	ND	577,80	223,00	111,00	Francoarenosa	ND	2,22	119,61	ND	0,99
P3Bhm/E	45-64	654,18	321,00	101,20	Francoarenosa	1,11	2,45	70,59	0,55	0,68
P3Bsm	64-115	666,06	225,00	120,80	Francoarenosa	1,94	2,33	70,59	0,17	0,69

Horizontes	Prof (cm)	AMG (g/kg ⁻¹)	AG (g/kg ⁻¹)	AM (g/kg ⁻¹)	AF (g/kg ⁻¹)	AMF (g/kg ⁻¹)
P1 – ARGISSOLO AMARELO distrófico fragipânico espodossólico						
P1Ap	0-11	43,80	72,55	147,75	264,33	91,00
P1Bt	11-74	51,30	81,00	141,10	344,75	95,85
P1Btx	74-80	38,00	98,10	163,20	197,00	49,00
P1Bt/Btx	80-94	32,85	98,80	162,90	210,15	68,75
P1B'tx	94-140	29,10	86,45	139,15	183,00	63,35
P2 – ESPODOSSOLO FERRILÚVICO Órtico dúrico						
P2Ap	0-15	25,45	81,85	197,80	321,40	158,00
P2E	15-38	38,45	96,95	360,55	306,90	56,20
P2TOPO	ND	159,00	130,35	126,10	139,00	64,30
P2Bm1	38-70	211,85	138,05	132,85	140,95	58,20
P2Bm2	70-115	228,00	143,85	120,40	125,45	63,10
P3 – ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Órtico dúrico						
P3Ap	0-14	27,65	75,85	188,40	319,55	158,65
P3E	14-45	34,70	74,00	184,45	341,15	166,90
P3TOPO	ND	42,40	78,20	137,40	205,70	99,30
P3Bhm/E	45-64	164,60	141,30	121,15	148,50	81,95
P3Bsm	64-115	179,95	126,55	116,35	145,00	81,30

*Ds: Densidade do solo, Dp: Densidade de partículas, ADA: Argila dispersa em água, Pt: Porosidade total, AMG: Areia Muito Grossa, AG: Areia grossa, AM: Areia média, AF: Areia fina e AMF: Areia muito fina.

5.3 Atributos Químicos

Figura 8. Valores de pH em água e pH em cloreto de potássio para os solos estudados



De forma geral os valores obtidos para pH em água se mantiveram próximo da neutralidade variando de (4,57 a 6,51), com ênfase nos horizontes P1 Bt/Btx e no P3 Bhm apresentaram os valores mais ácidos (4,81 e 4,57) respectivamente, esses valores provavelmente são decorrentes da presença de ácidos orgânicos elevados em comparação aos demais horizontes do seguinte estudo. Para os valores de pH em KCl, todos os horizontes apresentaram valores menores que o pH em água, constituindo assim um ApH negativo, indicando carga líquida negativa nesses solos

Os demais resultados obtidos para os atributos químicos estão descritos na tabela 03, ressaltando que essas análises são oriundas dos perfis inseridos no Zoneamento pedoclimático da área do Canal das Vertentes Litorâneas da Paraíba, assim é possível observar que os 03 perfis estudados apresentam acidez, baixa CTC, alta saturação por Al^{3+} . A baixa CTC apresentada nesses solos está associada diretamente ao material de origem desses solos que naturalmente apresentam baixos teores de nutrientes. Devido ao desenvolvimento dos solos avaliados estarem associados a materiais previamente alterados e com avançado estado de intemperismo.

Solos desenvolvidos sobre sedimentos dos tabuleiros costeiros são compostos basicamente de caulinita e óxidos e assim como a textura arenosa é resultado de uma

composição de quartzo e feldspato encontrado nessas frações, permitindo uma compreensão dos atributos químicos de Argissolos e Espodossolos. (SILVA, 2019).

Tabela 3. Atributos químicos dos perfis estudados

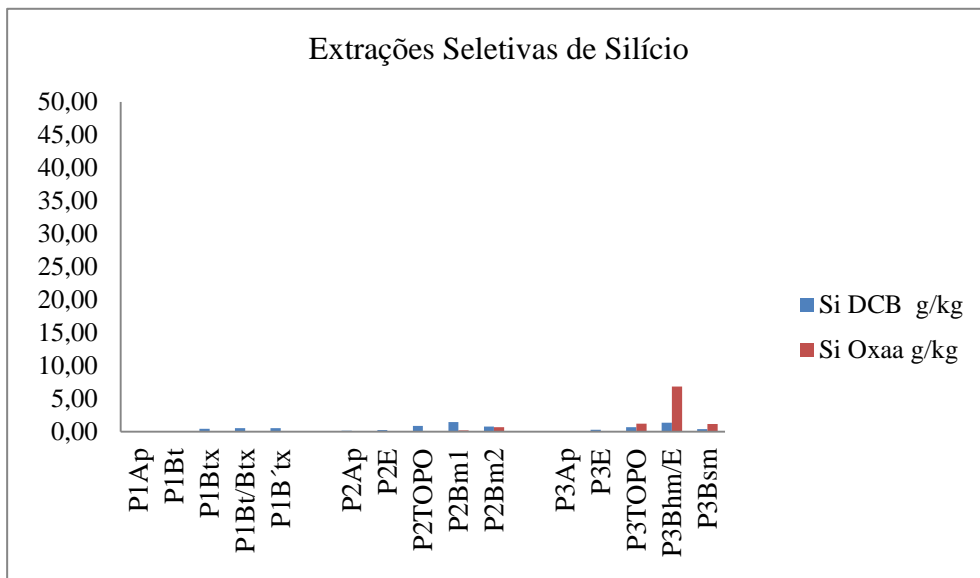
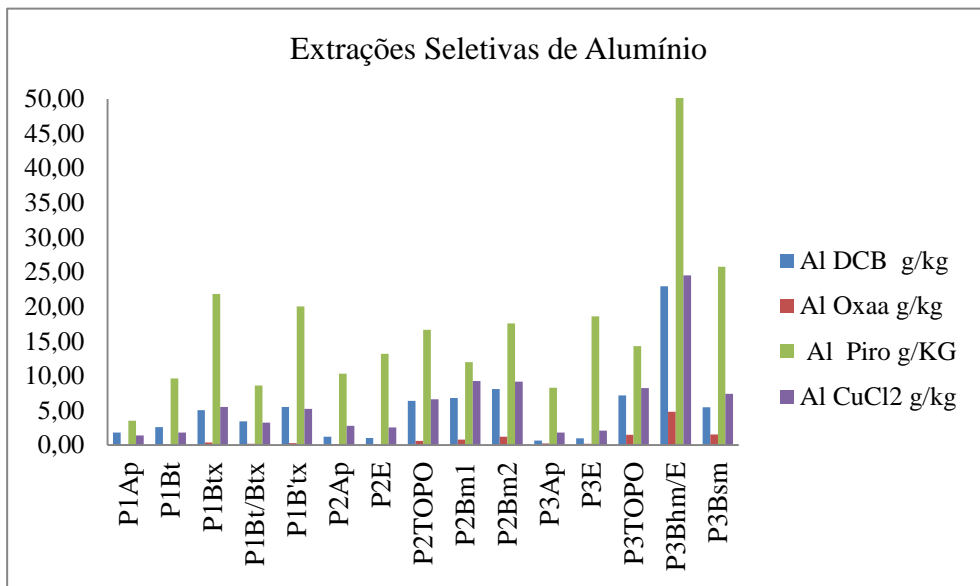
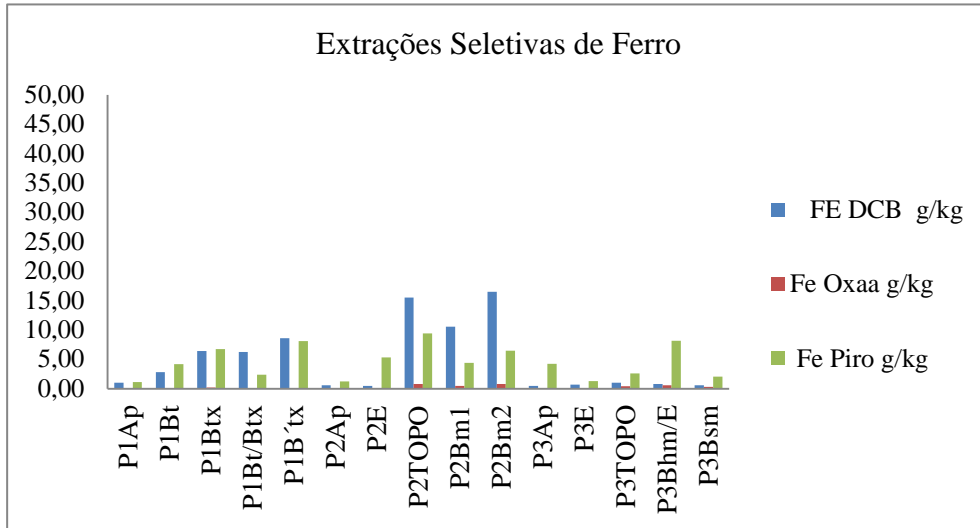
Horizontes	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S	Al ³⁺	H ⁺ + Al ³⁺	Valor T	Valor V%	Sat. Al ³⁺ %	P mg kg ⁻¹
P1 – ARGISSOLO AMARELO distófico fragipânico espodossólico											
A	2,15	1,37	0,14	0,07	3,83	0,00	1,16	4,99	76,75	0,00	26,00
Bt	0,37	0,11	0,06	0,05	0,59	0,15	1,49	2,08	28,33	7,22	1,00
Btx	0,59	0,36	0,07	0,07	1,09	0,05	1,98	3,07	35,49	1,63	3,00
P2 – ESPODOSSOLO FERRI-HUMILÚVICO Órtico dúrico											
Ap	1,77	0,65	0,12	0,07	2,61	0,00	1,49	4,10	63,66	0,00	21,00
E	0,54	0,2	0,09	0,07	0,90	0,25	2,31	3,21	28,13	7,78	11,00
Bm	0,52	0,22	0,06	0,13	0,93	0,10	4,79	5,72	16,27	1,75	3,00
P3 – ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Órtico dúrico											
Ap	0,46	0,12	0,09	0,07	0,74	0,40	3,63	4,37	17,01	9,14	17,00
E	0,32	0,04	0,06	0,06	0,49	0,45	3,05	3,54	13,73	12,73	3,00
Bhx/E	0,35	0,08	0,05	0,05	0,53	0,30	6,93	7,46	7,15	4,02	6,00
Bsm	0,46	0,22	0,06	0,13	0,87	0,20	4,21	5,08	17,14	3,94	3,00

5.4 Extrações seletivas para Ferro, Alumínio e Silício.

Observando a figura 09 é possível avaliar o comportamento de ferro, alumínio e silício em diferentes extratos, para verificar a atuação desses elementos nos horizontes cimentados contrastando nos horizontes onde não ocorreu a cimentação, é possível verificar que tanto para o Ferro como para o Alumínio os valores foram acrescidos nos horizontes onde ocorreu cimentação, com exceção para o silício que não houve diferença ao longo dos perfis estudados.

Em relação às formas de ferro avaliadas, o ditionito (fe dcb) apresentou uma extração mais seletiva, quando comparados as outras extrações variando de (0,48 a 16,50) ressaltando que no P2 evidenciou os maiores teores para Fe dcb, nos horizontes (topo Bm, Bm1, Bm2), que representa os horizontes cimentados do seguinte perfil, pode-se afirmar o acúmulo de ferro nesses horizontes ocorreu possivelmente devido a processo de laterização que ocorre nesses ambientes, ocasionado pelo intemperismo em ambiente tropical, visto que o ferro tende a ter um acúmulo relativo com o tempo devido a sua baixa mobilidade.

Figura 9. Extração de Ferro, Alumínio e Silício nos extratos de ditionito citrato-bicarbonato (DCB), oxalato (Oxa) e Pirofosfato (pi) para os 03 perfis estudados avaliando os horizontes cimentados e não cimentados



Ainda observando as formas de ferro extraídas, verifica-se que os teores das extrações decrescem significativamente no perfil 03 quando comparados com os demais, a menor concentração de ferro encontrada no P3 pode estar associada aos processos de hidromorfismo exercidos com maior intensidade em relação aos demais, devido sua posição geográfica na paisagem, justificando o fato do Ferro sofrer o processo de redução em ambientes anóxicos, tornando o apto a movimentar-se e sair do sistema (OLIVEIRA et al., 2010).

Para as extrações seletivas de silício, nas formas de Si dcb e Si oxaa, não foi apresentado acúmulo desse elemento, tanto quanto não houve diferenciação quando comparados os horizontes cimentados com os não cimentados. De acordo com Dress et al. (1989), em ambientes onde ocorrem a quimiosorção com íons como Al^{3+} , Fe, as taxas de dissolução de sílica são reduzidas em virtude de revestimentos de silicatos que são formados e que são parcialmente insolúveis, com atenção especial a presença de alumínio encontrado nesses solos, sendo o elemento um dos mais atuantes na interferência na taxa de dissolução de sílica, além disso outro fator que controla a solubilidade da sílica é o pH, nos solos onde os limites de pH ocorrem de 2 a 8,5 a sílica apresenta uma constância na sua solubilidade, apresentando um aumento notável se eles valores se elevarem, entretanto nos 03 perfis estudados, o pH se mantém dentro de uma faixa entre 5,0 e 6,0 justificando assim sua baixa solubilidade.

Para as extrações seletivas de alumínio, é possível observar que os teores obtidos foram elevados, quando comparados com os trabalhos existentes na literatura (SILVA et al., 2019; CORRÊA et al., 2015) avaliando extrações de alumínio em horizontes cimentados. Para o P3 no horizonte Bhm/E na extração de pirofosfato que se apresentou a mais efetiva, obteve-se valores de 52,80 g/kg, além disso, os teores se elevaram nos horizontes cimentados quando comparados com os que não houveram cimentação.

Dentro das extrações, o alumínio pirofosfato (Al pi) (que extrai a forma do elemento ligado a material orgânico) foi a mais seletiva, prosseguida do alumínio DCB (que extrai as formas cristalinas e não cristalinas), tendo o alumínio oxalato (al oxaa) (que extrai em formas amorfas) apresentado os menores teores, ainda quando comparado com o ferro de forma geral, os valores apresentados para o alumínio foram semelhantes, principalmente na extração de ditionito-citrato.

Entretanto, apesar da extração de alumínio pirofosfato (al pi), ter mostrado a maior seletividade em extrair o alumínio ligado a complexos orgânicos, deve-se ressaltar que esse método de extração seletiva foi desenvolvido para regiões de clima temperado e regiões

vulcânicas (GARCIA-RODEJA et al., 2004), que apresentam um funcionamento do solo diferente de ambientes tropicais.

A discussão sobre a seletividade do pirofosfato na extração com metais já vem sendo corroborada com trabalhos (JEANROY et al., 1981; HIGASHI et al., 1981; PATERSON et al., 1993; COELHO et al., 2011) ressaltando que além do metal complexado com formas orgânicas, formas de baixa cristalinidade do elemento podem ser alcançadas pelo extrator, como também a gibsitita com a dissolução alcalina e à peptização de hidróxidos de Al atrelados ao material orgânico adsorvido.

Ainda dentro do debate sobre a extração com pirofosfato, Coelho et al. (2011) avaliando alternativas de reagentes que atuassem na dissolução do alumínio ligado a matéria orgânica, em Espodosolos e Neossolos Quartzarênicos, utilizando o CuCl_2 como tamponante nessas extrações, foi possível afirmar sua maior eficácia em relação ao pirofosfato como extrator, considerando que o CuCl_2 extraiu mais alumínio que o pirofosfato.

Baseado nos seguintes fatos, para este trabalho a extração de alumínio ligado a complexos orgânicos, que alcança os reais valores foi para CuCl_2 , considerando que diferentes autores utilizam essa forma de extração seletiva para o alumínio ligado a matéria orgânica (EIMIL-FRAGA et al., 2015; LI et al., 2016; GU et al., 2017). Para a extração de CuCl_2 , os valores obtidos variaram entre 1,39 a 24,52, ressaltando que os teores mais elevados ocorreram nos horizontes cimentados quando comparados com os que não houveram cimentação.

Avaliando os teores dos elementos estudados das extrações seletivas realizadas para os teores de Ferro, Alumínio e Silício, pode-se observar que para o perfil 02, o elemento que se concentrou de forma significativa foi o ferro, e para o perfil 01 e 03 o elemento foi o alumínio, sugerindo a participação desses elementos como os responsáveis pela cimentação nos perfis, entretanto o teor elevado de ferro em comparação ao alumínio e silício encontrado no perfil 02, não é suficiente para definir o ferro como agente cimentante nos horizontes onde o processo se desenvolveu e em que mostrou teores elevados de ferro quando comparado aos demais horizontes, propondo assim que o alumínio nos 03 perfis estudados foi o elemento responsável pela cimentação.

No processo de cimentação o ferro pode sim atuar como agente cimentante, preenchendo proporções significativas dos poros entre as partículas, ocasionando partículas de diferentes tamanhos e com diferentes concentrações. Entretanto, a natureza do óxido de ferro

contribuiu significativamente para a cimentação de acordo com Schwertmann e Taylor (1989), óxidos de ferro de baixa cristalinidade como ferrihidrita e lepidocrocita possui uma maior eficácia na agregação, porém no perfil 02 as formas de ferro que ocorrem no perfil são de alta cristalinidade como hematita e goethita, diminuindo assim as chances de cimentação dessas partículas pelo ferro, para as formas amorfas independentemente do tamanho da partícula que podem ser encontrada em tamanho muito pequeno porém altamente carregados sendo eficaz na ligação das partículas.

Entretanto, o alumínio que ocorre nos horizontes cimentados dos solos estudados está na forma de polímeros (Al-OH), sendo possível reagir com as partículas de argilas nas superfícies externas, ocasionando a cimentação. Esses polímeros Al-OH reagem também com partículas de argila em suas superfícies externas ocasionando a cimentação (HSU, 1989).

As cargas positivas que ocorrem nos polímeros são distribuídas nas bordas, quando uma partícula de argila reage com essas cargas elas tendem a se ligar se agregando resultando em uma cimentação. Levando em conta que apesar da interferência do pH nas cargas desses polímeros ou até mesmo alteração de tamanho, o êxito na cimentação constitui o mesmo. Em princípio, o Al (OH)₃ bem cristalizado também pode atuar como um agente de cimentação em meio ácido, mas sua magnitude pode ser desprezível em comparação com o material não cristalino.

5.4 Relação Oxa/DCB

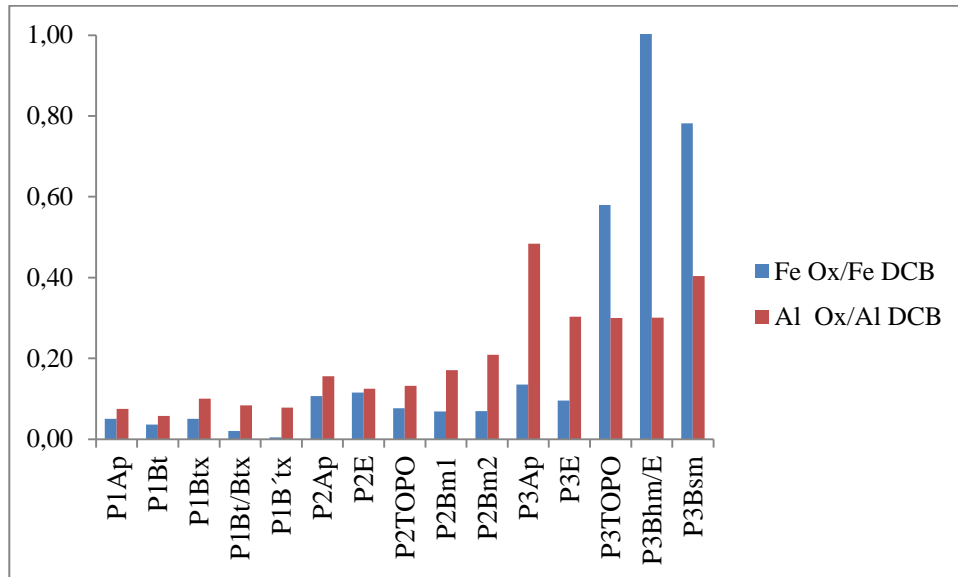
A figura 05 expressa a relação Feo /Fed e Alo/ Ald para ferro e alumínio, sendo essa relação responsável por indicar as formas dos elementos predominantes no solo. Para o perfil 01 que consiste em um Argissolo Amarelo com a presença de horizontes cimentados do tipo fragipã, apresentou valores que variaram de (0,02 a 0,05) para o ferro e (0,06 a 0,10) para o alumínio, indicando assim um predomínio de óxidos de Fe de maior cristalinidade, confirmado pela baixa relação, sendo menor que 0,05 (KÄMPF et al., 1988; Melo et al., 2001).

Para o perfil 02, nos horizontes não cimentados predominam formas não cristalinas e onde houve cimentação as formas de alta cristalinidade predominaram, sendo que para o alumínio em todo o perfil predominou formas de baixa cristalinidade. Para o perfil 03 tanto para o ferro quanto o alumínio em todo perfil predominou formas de baixa cristalinidade.

Os valores elevados de alo/Ald sugerem o predomínio de formas de óxidos de alumínio de baixa cristalinidade predominante em todos os perfis, principalmente comparando

horizontes cimentados com o que não ocorreu cimentação, onde provavelmente esses óxidos ocorrem na forma de polímeros Al-OH.

Figura 10. Relação Fe oxalato (Feox/FeDCB) Fe ditionito x Relação Al oxalato (Al oxa/Al dcb) Al ditionito



Entretanto para a relação Feo/Fed, podemos observar a presença de formas cristalinas encontradas no perfil 01 em relação ao perfil 02 e perfil 03, provavelmente é condicionada pela posição na paisagem, sendo dos 03 perfis o que está na parte mais alta, em relação aos demais, associado a uma melhor drenagem resulta na presença de óxidos de ferro de alta cristalinidade.

Para o perfil 02, que é classificado como Espodossolo, as formas não cristalinas encontradas nos horizontes superiores estão atreladas a presença de matéria orgânica que provavelmente inibiu a cristalização dos oxihidróxidos (Schwertmann; Taylor, 1989). Assim como para o perfil 03, que também é classificado como Espodossolo, e em todos os horizontes predominaram formas de baixa cristalinidade, tal fato ocorre devido a sua posição geográfica na paisagem estar localizada em posições mais baixas resultando em uma drenagem deficiente, e além disso deve-se ressaltar que os perfis estudados podem passar por períodos de saturação sendo inundados por períodos de tempo, resultando em condições temporariamente redutoras e na manutenção de teores relativamente elevados de formas de ferro de menor cristalinidade.

5.5 Fluorescência de raio-X – FRX

A tabela 04 apresenta a composição total dos elementos contidos nos perfis estudados, onde é possível observar que os elementos que se apresentaram em concentrações elevadas em relação aos demais analisados foram: Ferro, Alumínio e Silício.

Tabela 4. Composição de elementos totais obtidos por fluorescência de raio-X, para os solos estudados

Horizonte	Espessura (cm)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FE ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MNO ₂	P ₂ O ₅	ZrO ₂	PF
P1 – ARGISSOLO AMARELO distrófico fragipânico espodossólico													
P1Ap	0-11	0,02	0,18	25,53	61,06	2,70	0,11	0,33	3,04	0,02	0,00	0,33	6,64
P1Bt	11-74	0,00	0,19	31,33	51,20	4,16	0,11	0,16	4,14	0,03	0,00	0,26	8,39
P1Btx	74-80	0,00	0,21	31,40	47,12	5,47	0,11	0,01	3,69	0,02	0,00	0,20	11,73
P1Bt/Btx	80-94	0,00	0,17	29,62	51,52	4,25	0,11	0,01	3,73	0,02	0,00	0,22	10,30
P1B'tx	94-140	0,02	0,17	27,09	41,87	12,48	0,21	0,02	5,04	0,05	0,00	0,42	12,58
P2 – ESPODOSSOLO FERRI-HUMILÚVICO Órtico dúrico													
P2Ap	0-15	0,00	0,09	14,67	69,04	2,43	0,16	0,64	6,81	0,05	0,00	1,35	4,70
P2E	15-38	0,00	0,06	15,14	76,29	0,96	0,03	0,09	3,64	0,02	0,00	0,39	3,34
P2TOPO	ND	0,00	0,08	27,76	47,08	7,57	0,10	0,01	1,99	0,02	0,00	0,12	15,23
P2Bm1	38-70	0,00	0,13	28,79	51,47	6,30	0,10	0,01	1,92	0,02	0,00	0,13	11,08
P2Bm2	70-115	0,00	0,15	30,01	52,57	10,65	0,09	0,02	2,15	0,02	0,00	0,17	4,13
P3 – ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Órtico dúrico													
P3Ap	0-14	0,00	0,24	19,30	63,51	0,76	0,09	0,50	3,04	0,02	0,00	0,24	12,26
P3E	14-45	0,00	0,08	19,66	70,59	0,74	0,06	0,01	3,12	0,02	0,00	0,28	5,38
P3TOPO	ND	0,00	0,09	32,87	53,78	3,82	0,19	0,01	2,82	0,03	0,00	0,12	6,14
P3Bhm/E	45-64	0,00	0,15	39,93	43,07	3,51	0,08	0,03	3,80	0,02	0,00	0,29	9,07
P3Bsm	64-115	0,00	0,01	32,36	51,81	2,65	0,19	0,01	2,63	0,02	0,00	0,12	10,01
Mat. De Origem	ND	0,09	0,071	24,60	58,26	0,92	0,06	0,00	2,78	0,00	0,00	0,33	12,86

Unidade (%): porcentagem e PF: perda ao fogo

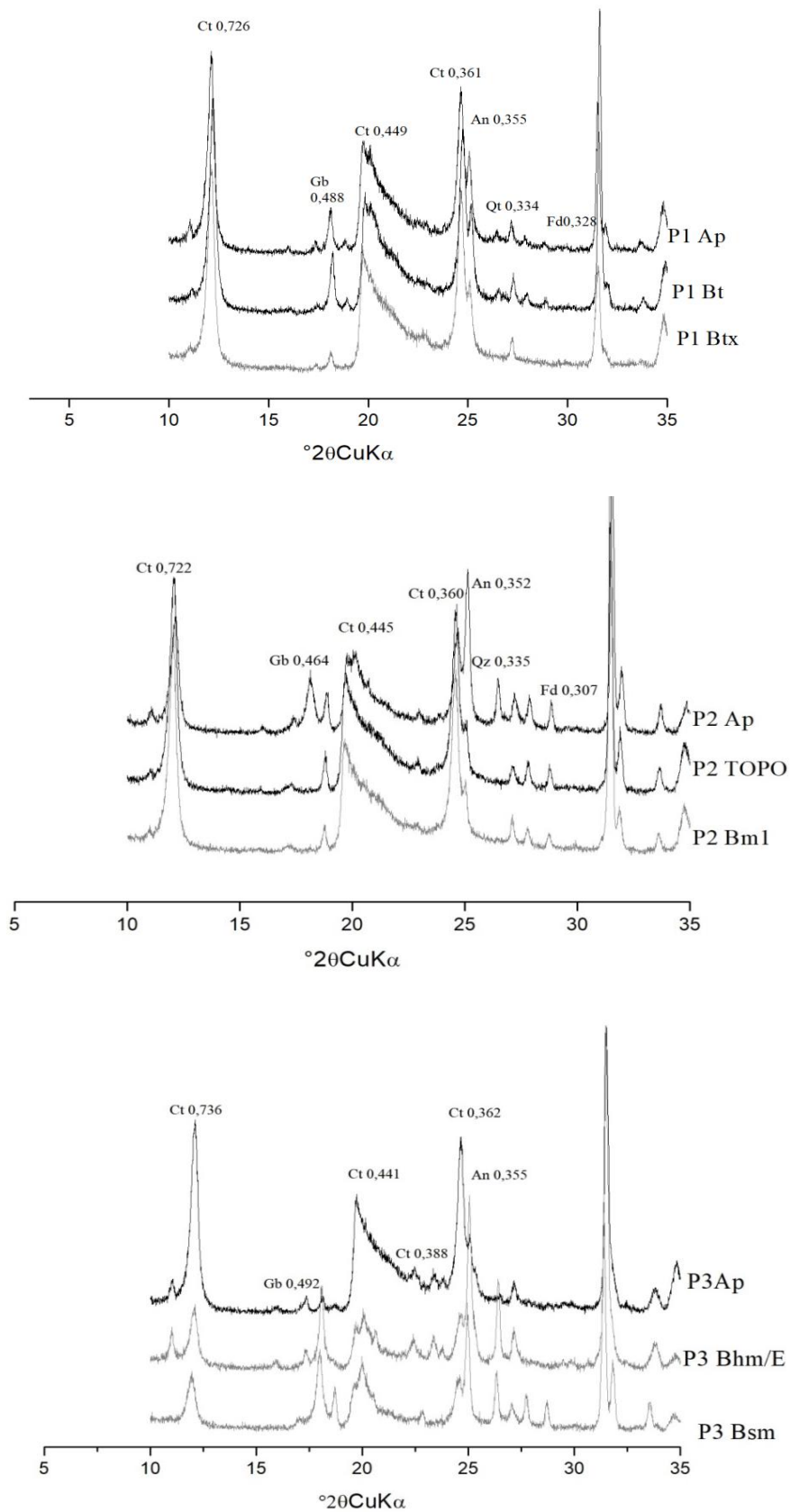
O baixo teor de elementos totais encontrado reflete a pobreza de bases associada ao material de origem, no qual esses solos se desenvolveram decorrentes do processo de sedimentação de tabuleiro costeiros, vale ressaltar apenas o silício apresentou acréscimo nos horizontes cimentados quando comparados aos não cimentados. Solos desenvolvidos sobre esses sedimentos são constituídos principalmente por material caulinitico e quartzoso (LIMA NETO et al., 2010) que são resultado de intensos processos de intemperismo, significativas alterações pelo qual passaram os sedimentos.

Ainda vale ressaltar que o elemento que apresentou em maior quantidade foi a sílica SiO_2 , variando de 43% a 70 % , esses teores são devidos a presença de quartzo nesses solos que a apresentam sílica na sua composição química.

5.6 Difrações de Raios-x DRX; e Análise Térmica Diferencial-ATD

Observando a análise mineralógica através da difração de raio-X, podemos observar que não houve distinção quanto aos perfis estudados que a mineralogia presente nos perfis se restringe a minerais como Quartzo, Caulinita, Gibsita, Feldspato e Anatásio (Figura 11). De acordo com Filizola et al, (2001) sedimentos que compõe os tabuleiros costeiros são compostos principalmente de caulinita, quartzo, e minerais resistentes como anatásio, quando há ocorrência de feldspato são alterados em caulinita.

Figura 11. Difratoformas de raio-X da fração argila dos perfis estudados, Ct: caulinita, Gb: Gibsita, Qz=Quartzo, Fd= Feldspato, An=Anatásio



Vale ressaltar que o mineral quartzo geralmente está presente em frações mais grosseiras do solo, entretanto devido a sua elevada resistência ao intemperismo, foi encontrada na fração argila, provavelmente nos maiores tamanhos da fração argila, entretanto, sem afetar o funcionamento químico do solo. Carvalho et al. (2013) estudando Espodosolos na Paraíba relataram a presença de quartzo na fração argila.

A assembleia mineralógica encontrada nos perfis era esperada tendo em vista que os solos são originários sobre sedimentos do grupo Barreiras, uma vez que os perfis estudados se desenvolveram de sedimentos pré-intemperizados, corroborando com os trabalhos de Moreau et al. (2006), Lima Neto et al. (2009), Corrêa et al. (2008), Oliveira et al. (2010), Silva et al. (2012), Carvalho et al. (2013), Dantas et al. (2014) e Silva et al. (2019).

Ainda observando os gráficos de DRX, podemos observar que a gibsita foi encontrada nos perfis não cimentados, levando em consideração que o mineral desaparece nos horizontes onde ocorreu a cimentação, seguindo o mesmo comportamento para os 03 perfis estudados.

Para justificar a destruição da gibsita nos horizontes cimentados nos 03 perfis estudados primeiramente vale ressaltar que os solos estudados passaram por um processo de ferralitização, sendo o quartzo o mineral primário predominante nos solos estudados, e considerando a assembléia mineralógica dos 03 perfis estudados e associando que são solos ácidos e fortemente degradados é possível afirmar que gibsita presente se formou em função da intensa lixiviação e alitização, destruindo a caulinita presente nesses solos.

Entretanto atrelado a esses processos, ocorre também o processo de podzolização, que tem por definição: A migração de alumínio e matéria orgânica, com ou sem ferro, para o Horizonte B, resultando na concentração relativa de sílica em uma camada eluviada, (SCAHETLZ; ANDERSON, 2005) apesar do perfil 01 não expressar significativamente na sua morfologia, os perfis P1, P2, P3 sofreram o processo de podzolização, sendo possível constatar através das extrações seletivas realizadas, sendo possível afirmar que o processo ocorreu, porém ainda não foi caracterizado morfologicamente.

Interpretando os processos geoquímicos que ocorrem no ambiente de estudo e ressaltando que há uma presença de matéria orgânica nos perfis, onde o teor de ácido fúlvico dobra nos horizontes cimentados (resultados de matéria orgânica serão demonstrados nos próximos tópicos) é possível afirmar que esses ácidos orgânicos estão impedindo que a gibsita se cristalize nos horizontes cimentados para o seguinte ambiente de estudo, onde o alumínio presente nesses horizontes se apresenta na forma de polímeros.

Kodama et al. (1980) avaliando a interação de ácidos fulvicos com polimorfos de alumínio, constatou a ação de ácidos fúlvicos inibindo a cristalização da gibsita em ambientes

de pH 6,0, os autores ainda ressaltam que mesmo que sejam em pequenas quantidades a cristalização pode ser impedida, desde que haja a faixa de pH a partir de 6,0 sendo a inibição justificada devido a ligação dos ácidos fúlvicos com o alumínio ser complexada tão fortemente que impede a sua hidroxilação total.

Xu et al. (2010) estudando o efeito de ácidos orgânicos na cristalização da gibsita, afirmam que ligantes orgânicos, como os ácidos fulvico e húmico, podem ocupar os locais de coordenação do Al e interferir na formação de hidróxidos de Al (oxi) cristalinos em vários estágios do processo de cristalização.

Assim é possível afirmar que provavelmente ocorreu o processo de neoformação da gibsita, entretanto para os horizontes cimentados onde ocorreu à interação com a matéria orgânica a cristalização foi impedida devido a atividade de ácidos orgânicos. Conseqüentemente, o acúmulo de gibsita nos horizontes superiores é atribuído a diferenciação da neoformação entre horizontes com teores mais elevados ou menos elevados em ácidos orgânicos.

A tabela 05 apresenta os teores dos minerais obtidos por meio da modelagem com o método Rietveld, sendo esses valores calculados através das informações obtidas com os difratogramas gerados com cálculos a partir de dados estruturais dos minerais das amostras e posteriormente ajustados ao difratograma experimental dessa amostra.

Observando as frações obtidas para os minerais presentes nas amostras pode-se afirmar que os resultados estão condizentes com a identificação dos minerais com a observação dos picos obtidos, assim com a presença da caulinita como o mineral dominante nessas amostras compondo até 83 % (Ap P2) apresentando-se com picos bem definidos nos difratogramas e em diferentes planos das amostras.

Os teores de gibsita assim como os de caulinita condizem com a identificação dos picos dos difratogramas assim como a diminuição nos teores do óxido nos horizontes cimentados, justificando assim a ação dos ácidos fúlvicos.

Duarte et al. (2000) estudando solos de tabuleiro costeiro encontrou mineralogia semelhante com a presença de quartzo, cerca de 85% de caulinita, e uma presença de 05% de gibsita com pequenas quantidades de anatásio. Assim como corrobora com Araujo Filho et al. (2003) e Moreau (2006), avaliando também solos com a presença de horizontes cimentados em tabuleiro costeiro.

Tabela 5. Estimativa dos teores de minerais nas amostras obtidas através de modelagem pelo método Rietveld

Horizonte	Caulinita	Goethita	Gibbsita	Quartzo	Feldspato-K	Anatásio	Halita
	----- dag kg ⁻¹ -----						
P1 Ap	72,36	1,76	5,66	2,03	1,34	9,79	7,06
P1Bt	67,57	2,13	6,84	1,73	1,64	9,55	10,54
P1Btx	76,88	1,23	1,93	1,97	1,30	10,51	6,17
P2 Ap	50,32	1,97	13,87	0,0	1,54	22,57	9,74
P2topo	82,99	1,54	0,0	0,0	0,0	5,81	9,67
P2 Bm1	72,6	7,0	0,0	0,0	6,7	1,3	12,4
P3 Ap	48,3	2,4	20,5	5,2	4,6	9,2	9,8
P3Bhm/E	54,07	2,1	14,3	5	6	8,3	10,2
P3Bsm	66,74	1,8	6,4	3	5	4	13,1

*Software Rietica.

Corroborando com os difratogramas avaliados acima, a análise térmica diferencial-ATD (Figuras 12, 13, 14) apresentou comportamento semelhante as difrações, onde apresentou minerais semelhantes em sua composição, com a presença de gibbsita e caulinita apresentando picos endotérmico entre a temperatura de 200 e 500 °C.

Além disso, o comportamento da gibbsita que desaparece nos horizontes cimentados se expressa nos gráficos de Atd, corroborando as informações citadas acima.

Figura 12. Análise térmica diferencial para o perfil 01

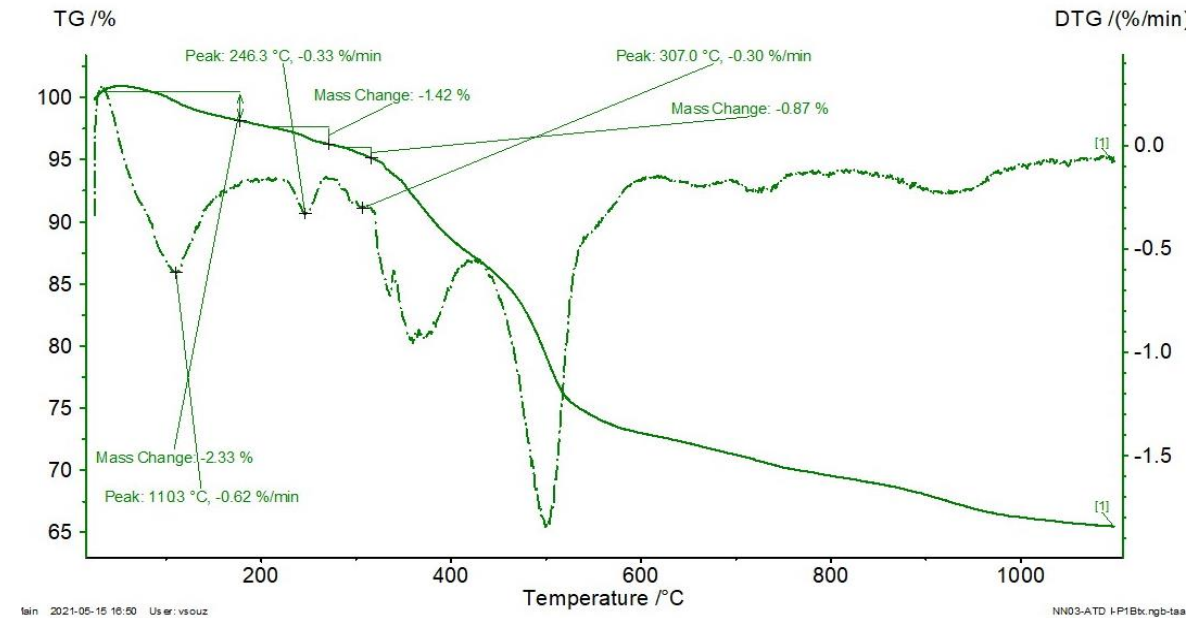
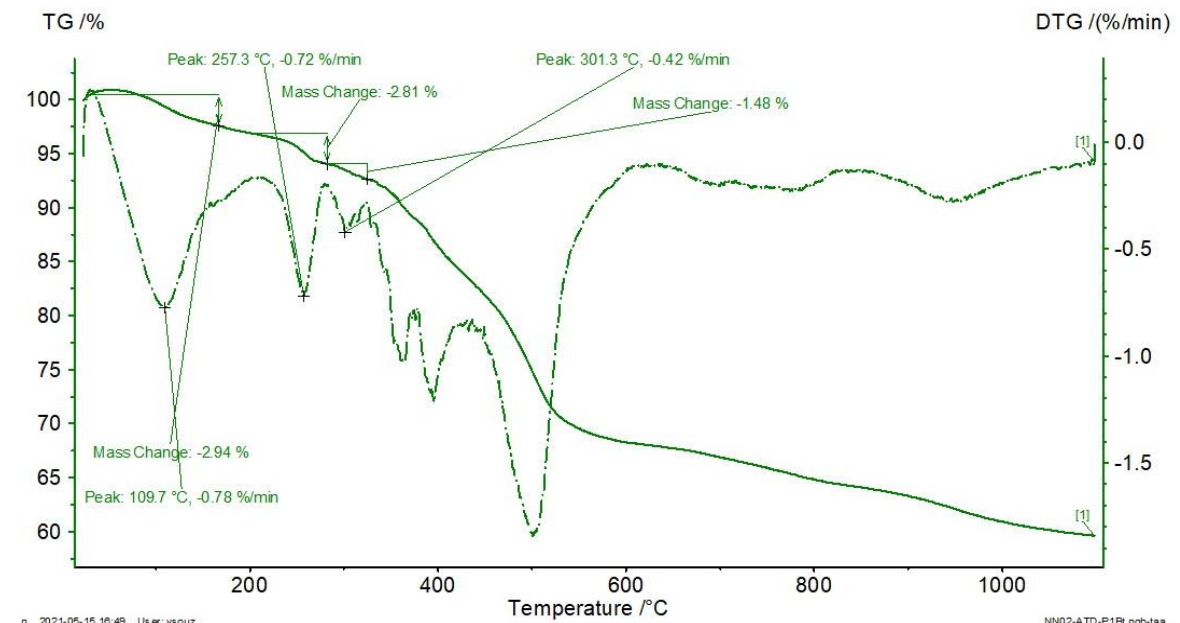
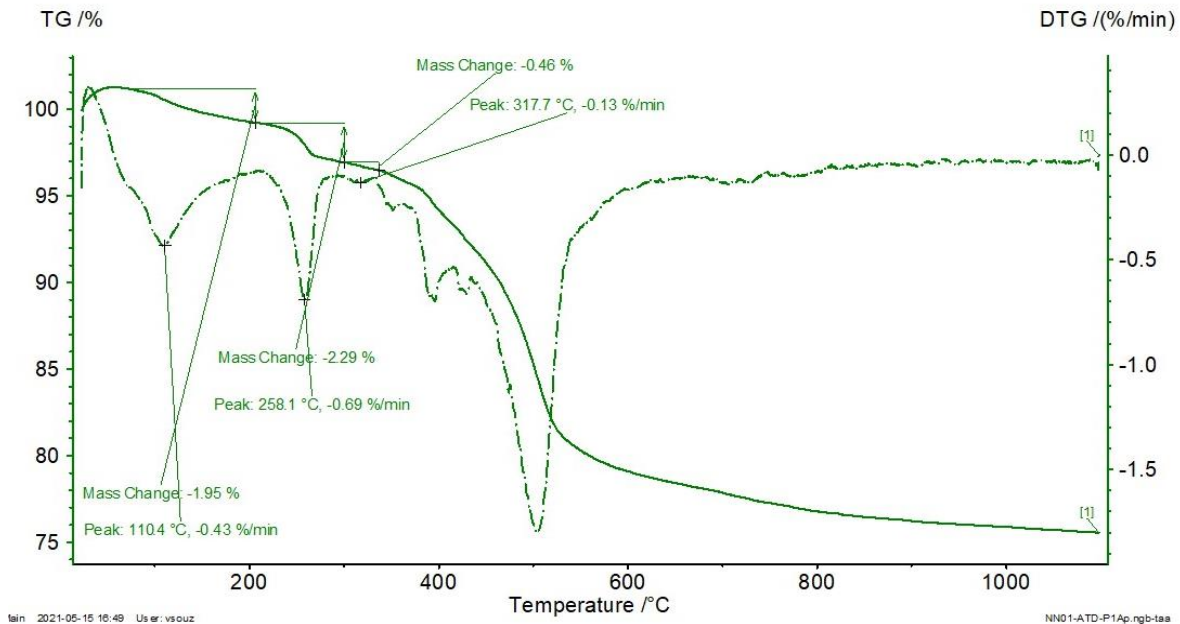


Figura 13. Análise térmica diferencial para o perfil 02

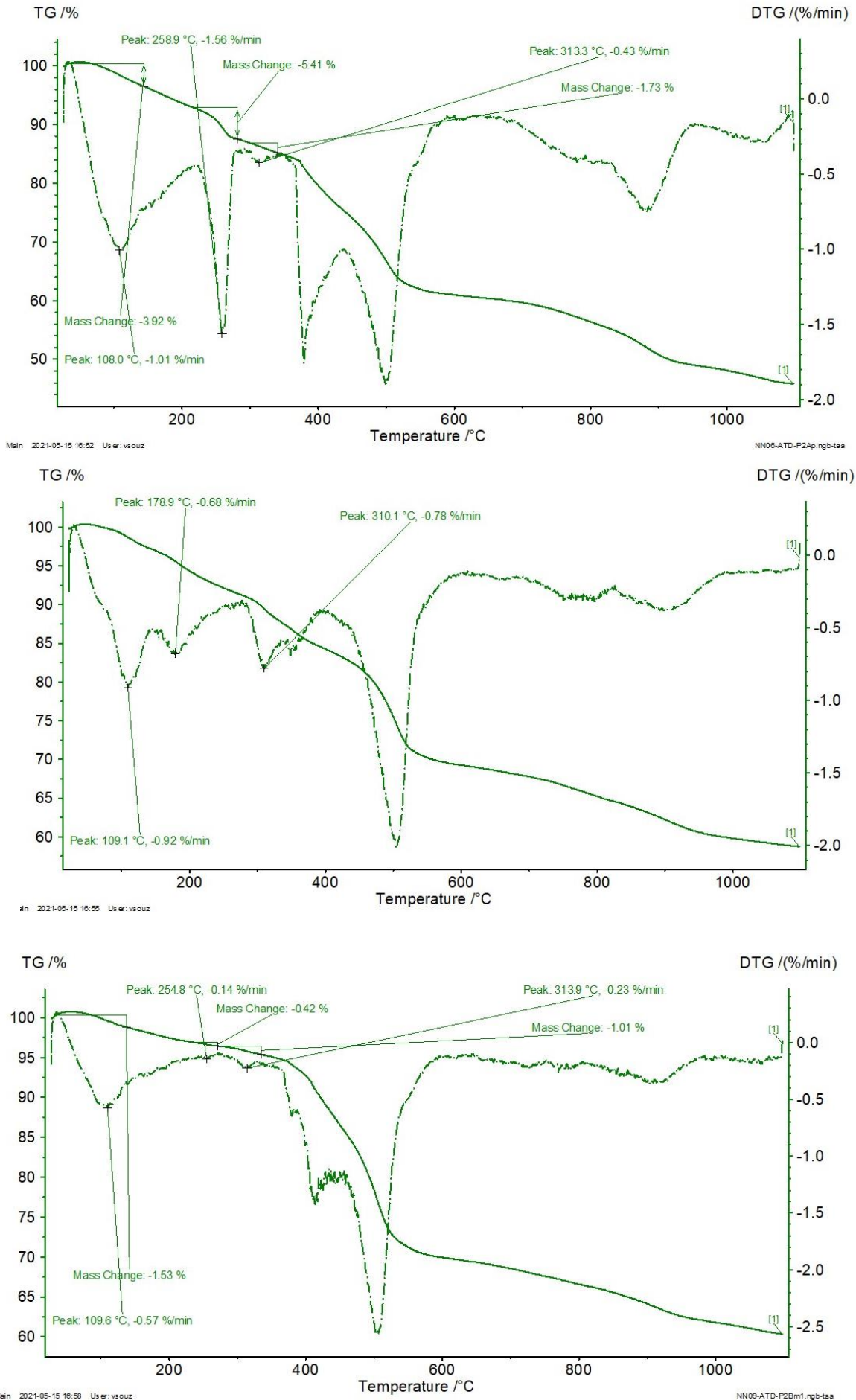
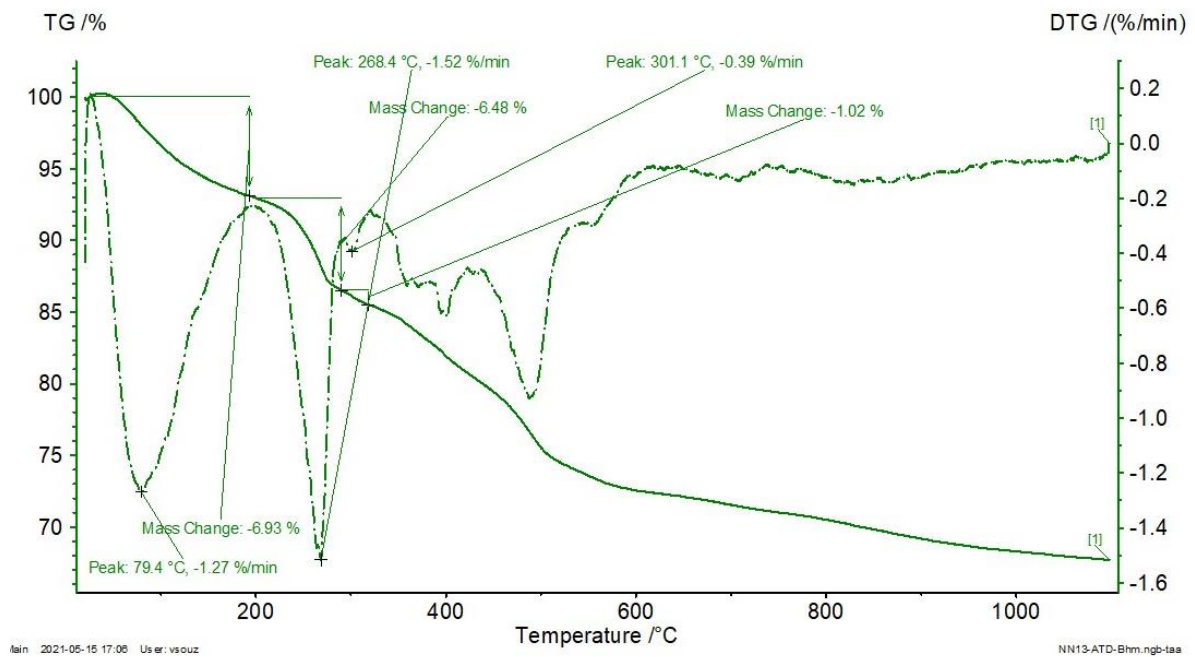
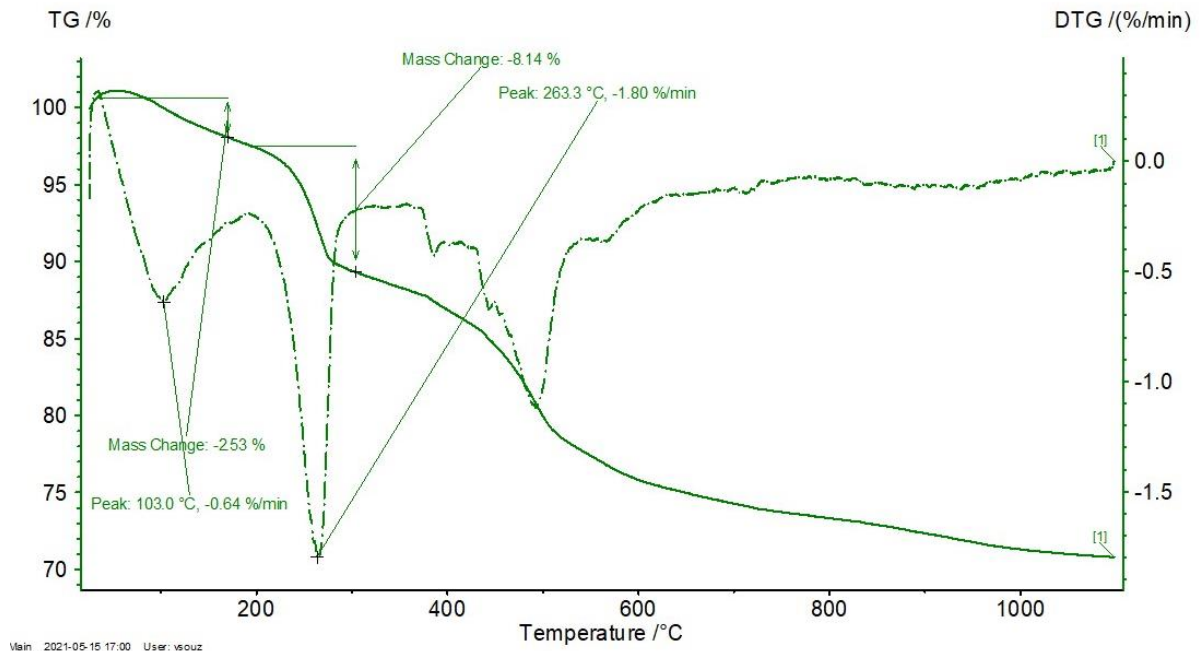


Figura 14. Análise térmica diferencial para o perfil 03



6 Composições da Matéria Orgânica

Os valores para o fracionamento de carbono presente nas substâncias húmicas (Ácidos fúlvicos-AF, ácidos húmicos- AH e humina- HU) estão apresentados na tabela 06, sendo possível observar que com exceção do perfil 01 que é composto dos horizontes de cimentação mais branda (Btx, Bt/Btx, B'tx), os teores de carbono foram acrescidos nos horizontes cimentados.

Para os teores de carbono orgânico total - COT, os resultados indicam que os valores são baixos para os 03 perfis estudados, assim como nas frações húmicas. Valores semelhantes foram encontrados por Carvalho et al. (2013) e Pacohyba et al. (2010) estudando solos em áreas de tabuleiro costeiro.

Apesar dos baixos teores de carbono orgânico total encontrado nos solos estudados, é possível observar que houve acúmulo de carbono, assim como de alumínio em profundidade, expressando assim o processo de podzolização que ocorreu nesses solos, principalmente no perfil 02 que corresponde a um Espodossolo Ferri-Humilúvico, e o perfil 03 que foi classificado como Espodossolo Humilúvico. Além disso, o ambiente quartzoso, com escassez de minerais facilmente intemperizáveis assim como a textura arenosa aos solos, praticamente destituídos de argila, contribui para elucidação do processo.

Outro fator relevante é que quando os horizontes cimentados foram descritos morfológicamente sua consistência se apresentou em estado úmido, porém se manteve variando de firme a extremamente firme, e em virtude dessa consistência, ocasiona a restrição à infiltração de água e penetração de raízes assim como, impossibilita a lixiviação de orgânicos compostos para fora do sistema de solo, contribuindo assim ao processo de podzolização (OLIVEIRA et al., 2010).

Os valores de Densidade ótica do Oxalato- DOox, representam um indicativo de podzolização, quando os valores obtidos apresentam um teor acima de 0,25 (tabela 06), sendo valor mínimo requerido para o enquadramento como “spodic materials” da Soil Taxonomy (ESTADOS UNIDOS, 1999), assim ao observar a tabela 06 é possível verificar que para o Perfil 02 e perfil 03 os valores foram superiores 0,25 nos horizontes cimentados corroborando a discussão acima que ressalta a presença do processo de podzolização.

Tabela 6. Caracterização da Matéria Orgânica nos Perfis estudados.

Horizontes	Espessura (cm)	C-AF (dag.kg)	C-AH (dag.kg)	C-humina	C Solúvel em H2O	C Total (%)	DOox	CAH/CAF	CAF+CAH	CAF+CAH/COT
P1 – ARGISSOLO AMARELO distrófico fragipânico espodossólico										
P1Ap	0-11	0,58	0,13	0,88	0,50	0,73	0,22	0,22	0,70	0,97
P1Bt	11-74	0,19	0,09	0,79	0,80	0,63	0,22	0,47	0,28	0,45
P1Btx	74-80	0,32	0,09	0,64	0,65	0,53	0,14	0,28	0,41	0,77
P1Bt/Btx	80-94	0,02	0,01	0,60	0,80	0,44	0,08	0,47	0,04	0,08
P1B'tx	94-140	0,32	0,06	0,69	0,50	0,57	0,12	0,20	0,38	0,67
P2 – ESPODOSSOLO FERRI-HUMILÚVICO Órtico dórico										
P2Ap	0-15	0,54	0,22	0,98	2,00	0,90	0,45	0,40	0,76	0,84
P2E	15-38	0,45	0,34	0,62	1,06	0,55	0,23	0,76	0,79	1,42
P2TOPO	ND	0,98	0,24	0,81	0,50	0,90	0,27	0,25	1,23	1,36
P2Bm1	38-70	0,98	0,22	0,88	0,50	0,96	0,27	0,22	1,20	1,26
P2Bm2	70-115	1,31	0,22	0,76	0,05	1,27	0,43	0,17	1,53	1,21
P3 – ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Órtico dórico										
P3Ap	0-14	0,69	0,69	1,03	2,15	0,93	0,34	1,00	1,38	1,48
P3E	14-45	0,56	0,46	0,52	1,80	0,49	0,12	0,82	1,03	2,08
P3TOPO	ND	2,28	0,58	0,72	0,60	0,86	0,26	0,25	2,86	3,33
P3Bhm/E	45-64	2,28	0,83	2,40	0,65	4,52	3,65	0,36	3,11	0,69
P3Bsm	64-115	0,22	0,09	0,76	0,40	1,06	0,21	0,41	0,31	0,29

*C-AF = Carbono- ácidos fúlvicos, C-AH= Carbono- Ácidos Húmicos, C-HU= Carbono-Humina, Doox= densidade óptica do oxalato

Para o carbono das frações húmicas, os teores se comportaram na seguinte sequência $C-HU > C-AF > C-AH$. A fração humina (HU) juntamente com os ácidos fúlvicos representaram a maior parte do carbono total, assim como os valores foram acrescidos nos horizontes onde ocorreu a cimentação P2 (topo, Bm1, Bm2), P3 (topo, Bhm/E, Bsm), no entanto, para o carbono solúvel em Água- CS H_2O , os valores foram decrescidos nos horizontes cimentados, apresentando maiores valores nos horizontes superficiais (Tabela 06).

Este compartimento extraído em água, são compostos orgânicos são solúveis derivados da atividade microbiana, bem como exsudatos de raiz (POTES et al., 2010, HANKE et al., 2017) assim como são frações mais lábeis, com a presença de estruturas hidrofílicas, que são menores do que as estruturas de C-AF e C-AH.

Ainda é possível observar que o carbono presente na fração dos ácidos fúlvicos elevou-se nos horizontes cimentados nos perfis 02 e perfil 03, a presença dos ácidos fúlvicos e húmicos nestes horizontes, corrobora a teoria onde os ácidos orgânicos de baixo peso molecular, associados a ácidos fúlvicos e húmicos, promovem a dissolução do ferro e do alumínio dos horizontes superficiais, fazendo com que precipitem como complexos organometálicos no horizonte mais profundos, em virtude da maior concentração de grupos funcionais que compõem essas frações em relação às outras frações húmicas, possuem uma maior polaridade e daí maior solubilidade e mobilidade no sistema (LUNDSTROM, 2000).

A relação C-AH/CAF avalia a perda de carbono ao longo do perfil, sendo que nos perfis estudados, essa relação decresce nos horizontes cimentados, tal fato está atribuído ao tamanho molecular assim como uma maior hidrofobicidade, considerando que nos horizontes cimentados há um acréscimo no teor dos ácidos fúlvicos e devido a sua maior mobilidade sua presença é favorecida em relação aos ácidos húmicos presentes nos horizontes cimentados.

Observando a relação C-AH+C-AF/COT, verifica-se que os valores elevaram-se em profundidade, possibilitando ressaltar a presença do processo de iluviação dos compostos orgânicos de menor tamanhos moleculares e mais polares no processo de podzolização.

Ainda observando as relações calculadas para a tabela 06 é possível observar que os valores de carbono não totalizam 100% em alguns dos horizontes, tal fato pode ser justificado pelo complexo formado por substâncias orgânicas persistentes que se unem a ferro e alumínio amorfos se tornando protegidos física e quimicamente, afetando o processo de dispersão (TISDAL; OADES, 1982).

Os dados referentes ao fracionamento do CO, em função da suscetibilidade das frações orgânicas à oxidação por dicromato de potássio são apresentados na Tabela 07, sendo fração 01 (F1) e fração 02 (F2) as frações mais lábeis e conseqüentemente refletem as mudanças que ocorrem no solo, e para as frações F3 e F4 estão as menos lábeis sendo mais relacionadas com compostos de maior estabilidade química.

O fracionamento se comportou na seguinte ordem $F4 > F3 > F2 > F1$, onde as frações mais recalcitrantes ($F3 + F4$) representam a maior parte desse fracionamento, para a F1 observa-se que não houve aumento nos horizontes cimentados quando comparados aos não cimentados, sendo esse comportamento para os 3 perfis, entretanto para a F2 e F4 os horizontes cimentados no p2 e p3 tiveram seus valores acrescidos, A f4 representa a fração de maior recalcitrância, estas frações estão relacionadas a compostos de maior estabilidade química e massa molar, oriundos da decomposição e humificação da MOS (CHAN et al., 2001), ou seja, necessitam de um maior tempo para serem modificadas.

Grande parte dos trabalhos que envolvem fracionamento de carbono orgânico oxidável encontram os maiores teores nas frações 01 e fração 02, frações mais lábeis devido serem envolvidos com áreas de manejo agrícola (RANGEL et al., 2008; LOSS et al., 2009) onde a sensibilidade dessas frações responde a mudanças ocasionadas no manejo, entretanto no seguinte de ambiente de estudo provavelmente o carbono encontrado em profundidade é decorrente de coberturas mais antigas e assim devido ao tempo de permanência desse material há um aumento na recalcitrância do resíduo vegetal.

Tabela 7. Fracionamento para carbono orgânico oxidável

Horizontes	Espessura (cm)	FRAÇÃO 01	FRAÇÃO 02	FRAÇÃO 03	FRAÇÃO 04	F1+F2	F3+F4
P1 – ARGISSOLO AMARELO distrófico fragipânico espodossólico							
P1Ap	0-11	0,50	0,32	0,44	5,99	0,82	6,43
P1Bt	11-74	0,38	0,42	0,47	5,04	0,80	5,50
P1Btx	74-80	0,21	0,37	0,06	4,63	0,58	4,69
P1Bt/Btx	80-94	0,21	0,19	0,54	3,51	0,40	4,05
P1B'tx	94-140	0,24	0,09	0,48	4,89	0,33	5,37
P2 – ESPODOSSOLO FERRI-HUMILÚVICO Órtico dístico							
P2Ap	0-15	0,32	0,47	0,80	7,44	0,79	8,24
P2E	15-38	0,21	0,35	0,64	4,35	0,55	4,99
P2TOPO	ND	0,26	0,21	0,68	7,84	0,48	8,53
P2Bm1	38-70	0,24	0,54	0,63	8,15	0,77	8,79
P2Bm2	70-115	0,38	0,51	0,13	11,64	0,89	11,78
P3 – ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Órtico dístico							
P3Ap	0-14	0,47	0,56	0,64	7,64	1,03	8,28
P3E	14-45	0,26	0,37	0,00	4,43	0,64	4,43
P3TOPO	ND	1,23	0,39	0,65	7,24	1,62	7,89
P3Bhm/E	45-64	0,32	1,16	3,18	39,63	1,48	42,81
P3Bsm	64-115	0,32	0,33	0,00	10,04	0,65	10,04

F1 - C oxidado por $K_2Cr_2O_7$ em meio ácido de 3 mol $H_2SO_4 L^{-1}$; F2 - diferença de C oxidado por $K_2Cr_2O_7$ em meio ácido de 6 e 3 mol $H_2SO_4 L^{-1}$; F3 - diferença de C oxidado por $K_2Cr_2O_7$ em meio ácido de 9 e 6 mol $H_2SO_4 L^{-1}$; F4 - diferença de C oxidado por $K_2Cr_2O_7$ em meio ácido de 12 e 9 mol $H_2SO_4 L^{-1}$; Frações F1 + F2 - lábeis; F3 + F4 - frações recalcitrantes.

A análise de correlação de Pearson descrita na tabela 08 corrobora com os dados da tabela 08 demonstrando a interação do carbono fracionado com o carbono das substâncias húmicas. As frações F3 e F4 correlacionaram-se positivamente com o teor de C-Humina e carbono orgânico total, Porém a F1 não apresentou correlação significativa com os outros atributos avaliados. Vale ressaltar que a fração humina apresentou os mais altos resultados com exceção da fração 01, apontando a resistência dessa fração à decomposição microbiana e a elevada interação desta fração com a porção mineral do solo.

Tabela 8. Análise de correlação de Pearson do fracionamento do carbono orgânico oxidável, com as frações de carbono orgânico para substancias húmicas.

	F1	F2	F3	F4	C-AF	C-AH	C-HU
F2	0,064						
F3	0,034	0,789					
F4	0,006	0,882	0,883				
C-AF	0,608	0,645	0,622	0,672			
C-AH	0,395	0,723	0,620	0,618	0,737		
C-HU	0,001	0,888	0,938	0,958	0,604	0,630	
COT	0,012	0,889	0,901	0,999	0,674	0,629	0,967

*Correlação de Pearson a 05 % de significância

6.1 Compartimentos da matéria orgânica e sua interação com metais

As relações calculadas para ferro e alumínio com diferentes extratores, com ênfase no extrator para matéria orgânica estão apresentados na tabela 09.

Observa-se que nos três perfis estudados os teores da relação de Fepi/FeD decrescem nos horizontes cimentados quando comparados com os horizontes superiores aos cimentados, com exceção do Bhm/E presente no P3. Entretanto para relação Fe pi/ Fe Oxa os valores variaram de 6,09 (topo P3) a 333,79 (B'tx P1) evidenciando a superioridade do ferro ligado organicamente com as formas de baixa cristalinidade.

Tabela 9. Relação entre metal e compartimentos orgânicos

Horizontes	Espessura	Fepi/FeD	Alpi/AID	Alpi/Al ox	fe pi /fe ox	Fepi+Alpi/Cot
P1 – ARGISSOLO AMARELO distrófico fragipânico espodossólico						
P1Ap	0-11	1,10	1,13	36,85	19,93	1,57
P1Bt	11-74	1,49	0,25	92,59	59,44	0,46
P1Btx	74-80	1,06	0,05	61,93	30,21	0,18
P1Bt/Btx	80-94	0,38	0,15	42,88	27,28	0,41
P1B'tx	94-140	0,95	0,05	66,70	333,79	0,20
P2 – ESPODOSSOLO FERRI-HUMILÚVICO Órtico dúrico						
P2Ap	0-15	2,10	0,72	77,86	28,14	0,78
P2E	15-38	11,62	0,42	150,17	143,92	0,30
P2TOPO	ND	0,61	0,08	28,24	11,39	0,35
P2Bm1	38-70	0,42	0,12	14,79	8,69	0,58
P2Bm2	70-115	0,39	0,09	14,87	8,12	0,53
P3 – ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Órtico dúrico						
P3Ap	0-14	8,77	1,70	36,99	92,63	0,74
P3E	14-45	1,87	0,27	90,58	27,92	0,25
P3TOPO	ND	2,47	0,08	9,53	6,09	0,51
P3Bhm/E	45-64	10,30	0,04	10,95	13,33	0,74
P3 Bsm	64-115	3,53	0,08	16,71	6,46	0,38

Quanto as relações para Alpi/AID e Alpi/Alox foram totalmente distintas, para a relação Alpi/AID os valores foram abaixo de 0,42 em todos os horizontes cimentados para os 03 perfis estudados, para a relação Alpi/Alox que representa a ligação orgânica com os compostos de baixa cristalinidade os valores se sobressaíram acima da média, refletindo um alumínio ligado intensamente aos compostos orgânicos, vale ressaltar que tal fato pode estar atribuído a alta capacidade de extração do pirofosfato em relação aos demais.

Higashi et al. (1981) considera o valor de 0,12 como referência para relação Alpi+Fepi/Corg como limite para ligação de metais com a matéria orgânica do solo principalmente em horizontes espódicos, entretanto é possível observar que para todas as amostras o valor foi superior a 0,12, tanto em horizontes cimentados como em não cimentados, porém deve ser ressaltar que o pirofosfato tem a capacidade de extrair de outros compartimentos, podendo assim estar despropositais a verdadeira relação.

6.2 Composições estruturais do COS antes e após oxidação com H₂O₂ como revelado por análise de FTIR

Os espectros de FTIR obtidos de amostras de todos os perfis, tratadas com H₂O₂, mostraram perda preferencial de grupos alifáticos comumente referidos à região de “fingerprint” (1300-1000 cm⁻¹), álcoois, grupos de C fenólicos e aromáticos, como ligninas, e um relativo aumento da vibração em 3400 e 2890/2850 cm⁻¹ apenas no Ap (P1). Isto sugere que a MO dos solos é composta essencialmente por essas estruturas e grupos funcionais.

Em geral, em todos os perfis de solo, os picos alifáticos, próximos a 1030 cm⁻¹ (estiramento de grupos C-H), polissacarídeos, álcoois primários e secundários observados em torno de 1095 e 1007 cm⁻¹ foram evidentemente reduzidos com a oxidação com H₂O₂. Já as absorções na região entre 3700 a 3580 cm⁻¹ desapareceram completamente (exceto nos horizontes dúricos) nas amostras tratadas com H₂O₂, e podem corresponder às vibrações de estiramento OH e NH, incluindo aqueles com ligações H⁺ rompidas de álcoois e fenóis. A banda larga em 3400 cm⁻¹ é referente à vibração de OH da água e ao estiramento de aminas e amidas primárias e secundárias.

Outros grupos alifáticos são indicados pelas frequências 2920 cm⁻¹ e 2851 cm⁻¹. Esses grupos são atribuídos a metileno e metil, e a estiramento C-H, grupos CH₂ como os alcanos, respectivamente. Picos aromáticos com o sinal em torno de 915 cm⁻¹ desapareceram ou foram modificados com a oxidação, atribuído a dobramentos fora do plano de compostos C-H aromáticos, com absorção entre 900-690 cm⁻¹.

Os horizontes cimentados (P1, P2 e P3) são mais enriquecidos em todos os grupos e estruturas orgânicas, consistente com o maior teor de COS nesses horizontes, além disso, os horizontes com caráter dúrico (Btx-P1, Topo-Bm1-P2 e Bsm-P3) mostram, em geral, maior transmitância das absorções de infravermelho e, portanto, maior acúmulo de C, sugerindo diferenças na composição estrutural entre horizontes cimentados.

Nos horizontes dúricos de todos os perfis houve aumento expressivo dos grupos alifáticos e de grupos de C aromáticos (900-690; 1620 cm⁻¹). No entanto, os horizontes com caráter dúrico dos perfis P2 e P3 (Espodossolos) mostram grande alteração nos formatos e intensidades dos picos aromáticos em torno de 1620 cm⁻¹ (C=C), e de grupos CH₃ em aproximadamente 1385 cm⁻¹. Isto sugere que esses compostos orgânicos tendem a formar complexos organominerais, comuns na podzolização, e possivelmente mais relacionados ao maior grau de cimentação dos solos.

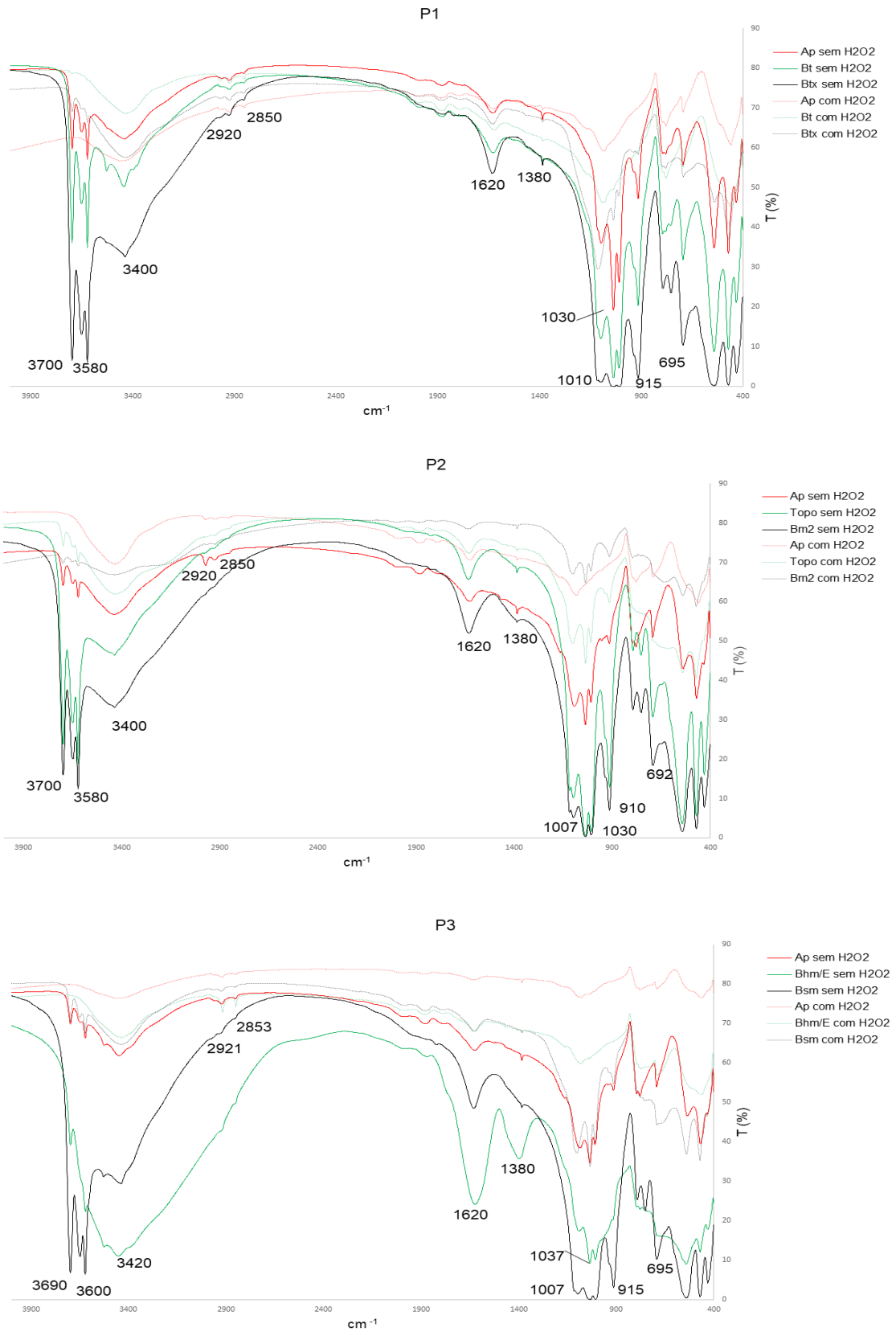
Os picos em aproximadamente 1.637 cm^{-1} em todas as amostras correspondem a vibrações de ligações do tipo C=C aromáticos e deformação de N-H, de grupos C=O de amidas e quinonas, e C=O ligados a H de cetonas conjugadas.

O H_2O_2 oxidou substancial quantidade de COS, como visto nos espectros obtidos de amostras tratadas com H_2O_2 e comparadas as amostras não tratadas com peróxido (Figura 15). A fração de COS resistente ao H_2O_2 (COS presumivelmente associado aos minerais) (VON LÜTZOW et al., 2007; EUSTERHUES et al., 2005) foi visivelmente enriquecido por grupos metoxilícos, polissacarídeos e substâncias do tipo polissacarídeos, observados por FTIR na faixa entre 1030 e 1007 cm^{-1} . Esses picos foram bem definidos apenas nos horizontes cimentados, sendo maior nos horizontes dúricos (Btx-P1, Topo-Bm1 e Bsm-P3).

O P2 apresentou menor intensidade no Bm2, porém seria esperada maior intensidade no horizonte Bm1 (horizonte não analisado) em consistência com a amostra do Topo-Bm1. Os complexos organominerais também foram enriquecidos em álcoois e fenóis (3700 a 3580 cm^{-1}) nos horizontes dúricos de todos os perfis.

O tratamento com peróxido também parece ter alterado o formato dos picos em torno de 1620 cm^{-1} , os quais provavelmente também compõem as interações organominerais, visíveis apenas nos horizontes dúricos. Outros grupos também podem fazer parte da fração de C resistente ao H_2O_2 , por não terem sido alterados pelo tratamento, como aqueles observados nas regiões de 2920 cm^{-1} e 2851 cm^{-1} .

Figura 15. FTIR para os perfis estudados



8 Análises de componentes principais-PCA

Com o processamento da análise de componentes principais, os resultados demonstraram que os dois agrupamentos explicam 68% da variabilidade total dos dados, onde a PC1 explicou 48 % e a PC2 explicou 20 %.

A PCA agrupou os horizontes em função da cimentação do solo, agrupando horizontes cimentados versus horizontes não cimentados, separando-os nitidamente e permitindo afirmar os elementos responsáveis pelo processo de cimentação nos solos estudados.

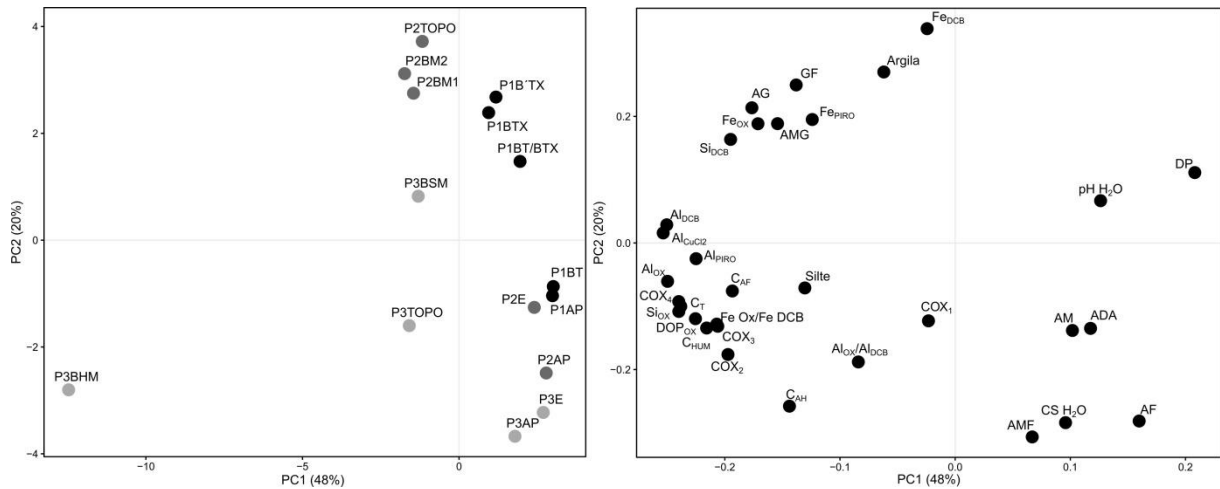
Os horizontes superiores dos três perfis se agruparam (lado direito da figura) em função do Carbono solúvel em água, argila dispersa em água e frações grosseiras (areia média, areia fina e areia muito fina), tal fato está associado devido aos horizontes superficiais serem os que acumulam matéria orgânica e conseqüentemente passam por mudança que afetam o carbono de fácil degradação.

Entretanto para os horizontes cimentados o Al dcb juntamente com o alumínio ligado as formas orgânicas (Al pi, Al CuCl₂) foram os que melhor responderam para esses horizontes (lado esquerdo da figura) além do que estão bem próximos do eixo comprovando sua importância no processo de cimentação, vale ressaltar que dentro das extrações seletivas o alumínio se destacou e desempenhou o papel de agente cimentante nos 03 perfis estudados (P1- Fragipã; P2- Caráter dúrico; P3- Caráter dúrico).

Dentro do agrupamento onde o alumínio ocupou papel de destaque, substâncias orgânicas também se destacaram como as substâncias húmicas e as frações do carbono orgânico oxidável, com ênfase nas mais recalcitrantes, reforçando a ideia de que o carbono presentes nesses ambientes vem de outra época por isso a difícil degradação.

Ainda próximo aos horizontes do P2 às extrações seletivas de ferro se destacam provavelmente pela quantidade do elemento encontrada nesse perfil, entretanto não suficiente para cimentar as partículas. Diante dos elementos responsáveis pela cimentação, respondidos pela PCA, vale ressaltar que processos de podzolização, ferralitização e humiluviação se desenvolvem concomitantemente com o processo de cimentação nos tabuleiros costeiros, sendo as características necessárias para o desenvolvimento desse processo citadas ao longo do trabalho.

Figura 16. Análise de componentes principais para os perfis estudados



9 CONCLUSÃO

- O principal agente cimentante nos solos estudados foi o alumínio, agindo em associação com complexos orgânicos;
- O grau de cimentação, avaliado morfologicamente em campo, é diretamente proporcional aos elevados teores de alumínio extraído por cloreto de cobre;
- A ocorrência de compostos alifáticos e aromáticos foram mais expressivos nos horizontes cimentados, em comparação aos horizontes não cimentados;
- O processo de podzolização se desenvolve posterior à cimentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, B.G.; VIANA, J.H.M.; TEIXEIRA, W.G.; DONAGEMMA, G.K. Densidade do Solo. In: TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília: Embrapa, cap. 7, p.65-75, 2017.
- ARAÚJO FILHO, J.C. Horizontes cimentados em Argissolos e Espodosolos dos tabuleiros costeiros e em Neossolos Regolíticos e Planossolos da depressão sertaneja no Nordeste do Brasil [tese]. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003.
- ARAÚJO FILHO, J.C.; LOPES, O.F.; OLIVEIRA, N.M.B.; NOGUEIRA, L.R.Q.; BARRETO, A.C. Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da região dos tabuleiros costeiros e da baixada litorânea do estado de Sergipe. Rio de Janeiro/Aracaju: Embrapa Solos/Embrapa Tabuleiros Costeiros (Boletim de Pesquisa, 4), 1999.
- BALAN, E.; FRITSCH, E.; ALLARD, T.; CALAS, G. Inheritance Vs. Neoformation of Kaolinite During Lateritic Soil Formation: A Case Study in the Middle Amazon Basin. **Clays and Clay Minerals**, v. 55 p. 253–259. 2007. <https://doi.org/10.1346/ccmn.2007.0550303>
- BANWART, S. A., CHOROVER, J., GAILLARDET, J.; SPARKS, D., WHITE, T.; ANDERSON, S.; RAGNARSDOTTIR, K. V.; Sustaining Earth's critical zone basic science and interdisciplinary solutions for global challenges. **University of Sheffield, Sheffield**, (2013). <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.014>
- BELTRÃO, B. A. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea no Estado da Paraíba**. Diagnóstico do município de Mataraca, Estado da Paraíba. Recife - PE: CPRM/PRODEEM, 2005.
- BOCKHEIM, J.G; HARTEMINK, A.E. Soils with fragipans in the USA. **Catena**, v. 104, p. 233-242, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.014>
- BOULET, R; FRITSCH, E; FILIZOLA, H.F; ARAÚJO FILHO, J.C; LEPRUN, J.C; BARRETO, F; BALAN, E.; TESSIER, D. Iron bands, fragipans e duripans in the northeastern plateaus of Brazil- properties and genesis. **Canadian Journal of Soil Science**, v.78 n.3 p-519-530, 1998. <https://doi.org/10.4141/S98-030>
- BOURMAN, R.P; BUCKMAN, S; CHIVAS, A.R; OLLIER, C.D; PRICE, D.M; Ferricretes at Burringurrah (Mount Augustus), Western Australia: proof of lateral derivation. **Geomorphology** v.354, 2020.<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.107017>
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento exploratório reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco**. Recife: Sudene,. (MA. DNPEA-DPP. Boletim Técnico, 26; SUDENE-DRN. Série Pedologia, 141). v.2, p. 354, 1972.
- CASTILLO, M. S.; WRIGHT, A. L. Soil phosphorus pools for Histosols under sugarcane and pasture in the Everglades, USA. **Geoderma**, v. 145, n. 1/2, p. 130-135, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.03.006>

CHAN, K. Y.; BOWMAN, A.; OATES, A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an paleustalf under different pasture leys. **Soil Science**, Baltimore, v.166, n. 1, p. 61-67, 2001. <https://doi.org/10.1097/00010694-200101000-00009>

CINTRA, F.L.D.; RESENDE, R.S.; LEAL, M.L.S.; PORTELA, J.C.; Efeito de volumes de água de irrigação no regime hídrico de solo coeso dos tabuleiros e na produção de coqueiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**; v.33:p.1041-51. 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400028>

CORREA, M.M.; KER, J.C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; CURI, N.; TORRES, T. C. P.; Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 297-313, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100028>

CORTI, G.; COCCO, S.; HANNACHI, N.; CARDELLI, V.; WEINDORF, D. C., MARCELLINI, M.; AGNELLI, A. Assessing geomorphological and pedological processes in the genesis of pre-desert soils from southern Tunisia. **Catena**, v.187, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104290>.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. **Diagnóstico do município de Camutanga, estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/PROODEEM, 10p. 2005.

DE LIMA CAMÊLO, D., GILKES, R. J., LEOPOLD, M., SILVA, A. C., VIDAL TORRADO, P. The application of quartz grain morphology measurements to studying iron rich duricrusts. **Catena**. v. 170, p.397-408, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.034>

DEB, B.C; The movement and precipitation of iron oxides in Podzol soils. **Journal Soil Science**, 1:112-122, 1949.

DILL, H.G; DOHRMANN, R.; KAUFHOLD, S.; TECHMER, A. Provenance analysis and thermo-dynamic studies of multi-type Holocene duricrusts (1700 BC) in the Sua Salt Pan, NE Botswana. **Journal African Earth Science**, v. 96 p. 79-98, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.03.014>

DREES, L.; RICHARD, WILDING.; LARRY P.; SMECK, N. E.; SENKAYI, A. L.; Silica in Soils: Quartz and Disordered Silica Polymorphs, in Minerals in Soil Environments, Dixon, J. B. and Weed, S. B. (eds.), **Soil Science Society of America**, Madison,pp. 913–965. 1989. <https://doi.org/10.2136/sssabookser1.2ed.c19>

DUARTE, MARIZA NASCIMENTO et al. Mineralogia, química e micromorfologia de solos de uma microbacia nos tabuleiros costeiros do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira [online]**. v.35, n.6 2000. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000600021>.

EIMIL-FRAGA, C.; ÁLVAREZ-RODRÍGUEZ, E.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; FERNÁNDEZ-SANJURJO, M. J. Influence of parent material on the aluminium fractions in acidic soils under *Pinus pinaster* in Galicia (NW Spain). **Geoderma**, v.255, p.50-57,2015. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.04.026>.

EMBRAPA. **Relatório final dos trabalhos executados pela Comissão da O.S. Nº 09/2014 - Delimitação da área de atuação da Embrapa Tabuleiros Costeiros**. Embrapa Tabuleiros Costeiros p. 61, 2014.

EZE, P. N.; UDEIGWE, T. K.; MEADOWS, M. E. Plinthite and its associated evolutionary forms in soils and landscapes: a review. **Pedosphere**, v. 24, n. 2, p. 153-166, 2014. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(14\)60002-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60002-3).

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da Região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 507- 514, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300003>

FERREIRA, R. O., COSTA, O. D. A. V., SOUZA, L. D. S., & JACOMINE, P. K. T. Áreas de Lagoas Intermitentes em Tabuleiros Costeiros do Recôncavo da Bahia: Gênese, Caracterização e Classificação dos Solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.1513-1523. 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150068>

FILIZOLA, H. F.; LAMOTTE, M.; FRITSCH, E.; BOULET, R.; ARAUJO FILHO, J. C.; SILVA, F. B. R.; LEPRUN, J. C.; Os fragipãs e duripãs das depressões dos tabuleiros costeiros do nordeste brasileiro: uma proposta de evolução. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p.947-963, 2001. <https://doi.org/10.1590/S010006832001000400018>

FORTIN, D.; LEPPARD, G.G. ; TESSIER, A. Characteristics of lacustrine diagenetic iron oxyhydroxides. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 57, p. 4391-4404, 1993. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90490-N](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90490-N)

FURIAN, S.; BARBIÉRO, L.; BOULET, E.; CURMI, P.; GRIMALDI, M.; GRIMALDI, C.; Distribution and dynamics of gibbsite and kaolinite in an oxisol of Serra do Mar, Southeastern Brazil. **Geoderma**, v. 106 p. 83-100, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00117-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00117-3)

GEORGIADIS, A.; SAUER, D.; HERRMANN, L.; BREUER, J.; ZAREI, M.; STAHR, K.; Development of a method for sequential Si extraction from soils. **Geoderma**, v. 209–210, p. 251-261, 2013. <https://doi.org/10.1071/SR14016>

GOMES, J. B.V.; ARAÚJO FILHO, J.C.; VIDAL-TORRADO, P.; COOPER, M.; SILVA, E. A.; CURI, N.; Cemented Horizons and Hardpans in the Coastal Tablelands of Northeastern

Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, 2017.
<https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20150453>

GOUDIE, A.S. Duricrusts e landforms. In: **Geomorphology and soils**. Allen e Unwin, Londres, p. 37–57, 1985.

GOUDIE, A.S.; RICHARD, K.S.; Duricrusts and landforms (Ed.), **Geomorphology and Soils**, Allen and Unwin, London pp. 37-57, 1985.

GU, W.; DRISCOLL, C. T.; SHAO, S.; JOHNSON, C. E.; Aluminum is more tightly bound in soil after wollastonite treatment to a forest watershed. **Forest Ecology and Management**, v.397, p. 57-66, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.035>.

HANKE, Daniel; DICK, Deborah Pinheiro. Organic matter stocks and the interactions of humic substances with metals in araucaria moist forest soil with humic and histic horizons. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, 2017.
<https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160368>

HIGASHI, T.; DE CONINCK, F. de; GELAUDE, F. Characterization of some spodic horizons of the Campine (Belgium) with dithionite-citrate, pyrophosphate and sodium hydroxide- tetraborate. **Geoderma**, Amsterdam, v.25, p. 131-142, 1981. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(81\)90010-0](https://doi.org/10.1016/0016-7061(81)90010-0)

HSU. P.H. Aluminum oxides and hydroxides. In: Minerals in Soil Environments (J.B. Dixon & S.B. Weed, editors). **Soil Science Society of America**. Madison. Wisconsin. USA. pp. 331-378. 1989

JACKSON, M.L. **Soil chemical analysis: advance course**. 29. ed. Madison, 895 p. 1975.

JACOMINE, P.K.T. **Fragipans em solos de tabuleiros; Caracterização, gênese e implicações no uso agrícola**. Recife, PE: UFPE. 1974. 83p. Tese Livre Docente em Agronomia

JUO, A.S.; KAMPRATH, E. J. Cooper chloride as an extractant for estimating the potentially reactive aluminium pool in acid soils. **Soil Science Society of America**, v. 43, p. 35-38, 1979. <https://doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300010006>

KÄMPF, N.; RESENDE, M.; CURI, N. Iron oxides in Brazilian Oxisols. In: BEINROTH, F.H.; CAMARGO, M.N. & ESWARAN, H., eds. INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP - Classification, Characterization and Utilization of Oxisols, Rio de Janeiro. Proceedings. Rio de Janeiro, p.71-77. 1988.

- KENDRICK, K.J.; GRAHAM R.C. Pedogenic silica accumulation in chronosequence soils, Southern California. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 1295-1303, 2004. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1295>
- LEBEDEVA, M. I.; BRANTLEY, S. L. Relating the depth of the water table to the depth of weathering. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 45, n. 9, p. 2167-2178, 2020. <https://doi.org/10.1002/esp.4873>.
- LI, W.; JOHNSON, C.E.; Relationships among pH, aluminum solubility and aluminum complexation with organic matter in acid forest soils of the Northeastern United States. **Geoderma**, v. 271, p. 234-242, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.030>.
- LIMA NETO, J.A.; RIBEIRO, M.R.; CORRÊA, M.M.; SOUZA JÚNIOR, V.S.; ARAÚJO FILHO, J.C.; LIMA, J.F.W.F. Atributos Químicos, Mineralógicos e Micromorfológicos de Horizontes Coesos de Latossolos e Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Estado De Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p. 473-486, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200021>
- LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; FERREIRA, E. P.; SANTOS, L. L. D.; BEUTLER, S. J., FERRAZ JÚNIOR, A. S. D. L.; Frações oxidáveis do carbono orgânico em Argissolo vermelho-amarelo sob sistema de aleias. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 867-874. 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400011>.
- MATHIAN, M.; BUENO G.T.; BALAN, E.; FRITSCH, E.; NASCIMENTO, N.R.; SELO, M.; ALLARD, T; Kaolinite dating from Acrisol and Ferralsol: A new key to understanding the landscape evolution in NW Amazonia (Brazil). **Geoderma**, v. 370, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114354f>
- MATHIAN, M.; J. AUFORT, J.J; BRAUN, J.; RIOTTE, M.; SELO, E.; BALAN, E.; FRITSCH, S.; BHATTACHARYA, T.A. Unraveling weathering episodes in Tertiary regoliths by kaolinite dating (Western Ghats, India). **Gondwana Research**, v. 69, p. 89-105, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.12.003>
- MELO, V.F.; FONTES, M.P.F.; NOVAIS, R.F.; SINGH, B.; SCHAEFER, C.E.G.R. Características dos óxidos de ferro e de alumínio de diferentes classes de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25 p.19-32, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100003>
- MOKMA, D. L.; YLI-HALLA, Markku; LINDQVIST, K. Podzol formation in sandy soils of Finland. **Geoderma**, v. 120, n. 3-4, p. 259-272, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.008>
- MOREAU, A.M.S.S.; COSTA, L.M.; KER, J.C.; GOMES, F.H. Gênese de horizonte coeso, fragipã e duripã em solos do tabuleiro costeiro do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000600011>

- NASH, D.J., MCLAREN, S.J., 2007. Introduction: geochemical sediments in landscapes. In: Nash, D.J., McLaren, S.J. (Eds.), **Geochemical Sediments and Landscapes**. Blackwell Publishing, London, pp. 1–9.
- OBEAR, G.R.; HARTEMINK, A.E.; SOLDAT, D.J. Iron-cement layered soils on golf courses in the USA. **Geoderma**, v. 232, p. 198 – 207, 2014.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.05.010>
- OLIVEIRA, A. P. D.; KER, J. C.; SILVA, I. R. D.; FONTES, M. P. F.; OLIVEIRA, A. P. D.; NEVES, A. T. G.; Spodosols pedogenesis under Barreiras formation and sandbank environments in the south of Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.847-860. 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300026>
- PARSONS, A. J.; ABRAHAMS, A. D.; Geomorphology of desert environments. **In Geomorphology of desert environments** Springer, Dordrecht. p.3-7, 2009.
- PHILLIPS, J. D.; Rapid development of ferricretes on a subtropical valley side slope. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, v. 82, n. 1, p. 69-78, 2000.
<https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2000.00113.x>
- POPE, G. A. Weathering in the tropics, and related extratropical processes. **Treatise on Geomorphology**, p. 179-196, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00059-2>
- POTES, M.L.; DICK, D.P.; DALMOLIN, R.S.D; KNICKER, H.; ROSA, S.A.; Matéria orgânica em Neossolo de altitude: influência do manejo da pastagem na sua composição e teor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**.; v.34: p. 23-32. 2010.
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000100003>
- PRANDEL, A.N.; SAAB, S.C.; BRINATT, A.M.; GIAROLA, N.F.B.; LEITE, W.C.; CASSARO F.A.M. Mineralogical analysis of clays in cohesive soil horizons by X-ray fluorescence and X-ray diffraction using Rietveld method. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 95, p. 65-68, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.12.017>
- RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; GUILHERME, L. R. G.; Frações oxidáveis do carbono orgânico de Latossolo cultivado com cafeeiro em diferentes espaçamentos de plantio. **Ciência e agrotecnologia**, v.32, p.429-437. 2008.
<https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000200013>.
- RODRIGUES, A.; MOTTA, A.C.V.; MELO, V.F.; Formas e tamponamento potencial de alumínio em solos ácidos tropicais e subtropicais cultivadas com *Pinus taeda* L. **Journal Soils Sediments**, v. 19, p. 1355–1366, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2144-7>

ROMERO, Ricardo Espíndola; CLEMENTE, Celso Augusto. **Gênese e degradação de duripãs em uma toposseqüência dos tabuleiros costeiros**, Conde - BA. 2003. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. EMBRAPA. 5ª edição. Brasília, DF, 353p. 2018.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C.; SHIMIZU, S.H. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. 6. ed. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 100p. 2013.

SCHWERTMANN U, TAYLOR RM Iron oxides. Em: Dixon JB, Weed SB (eds) Minerals in solo environment, 2nd edn **Soil Science Society of America.**, Madison, Wisconsin, pp 379-438,1989. <https://doi.org/10.1038/212645b0>

SCHWERTMANN, U.; Inhibitory effect of soil organic matter on the crystallization of amorphous ferric hydroxides. **Nature**, v.212: p. 645-646, 1966. <https://doi.org/10.1038/212645b0>

SILVA, G. A. D.; CAMÊLO, D. D. L.; CORRÊA, M. M.; SOUZA JÚNIOR, V. S. D.; RIBEIRO FILHO, M. R.; ARAÚJO FILHO, J. C. D.; Pedogênese em área de tabuleiros costeiros com baixa amplitude altimétrica no estado da Paraíba. **Revista Caatinga**, v.32(2), p.458-471, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252019v32n219rc>

SINI, A.; BASGA, S. D.; TEMGA, J. P.; NGUETNKAM, J. P.; The influence of topography in duricrust development in the Ngaoundal-Dir section of central Cameroon: Understanding morphological, mineralogical and geochemical transformations. **Scientific African**, v.10, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00655>.

STOOPS, G.; Guidelines for analysis and description of soils and regolith thin sections. Madison: **Soil Science Society of America**, 2nd ed. 2021.

STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F.; Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. Amsterdam: **Elsevier**, 69-79. 2010

TAYLOR, G., EGGLETON, R.A. Silcrete: An Australian Perspective. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 64, p. 987-1016, 2017. <https://doi.org/10.1080/08120099.2017.1318167>

THIRY, M.; MILNES, A.R.; RAYOT, V.; SIMON-COINÇON, R. Interpretation of palaeoweathering features and successive silicifications in the Tertiary regolith of inland Australia. **Journal of the Geological Society**, v. 163 p. 723-736, 2006. <https://doi.org/10.1144/0014-764905-020>

ULLYOTT, J. STEWART; NASH, DAVID J. Distinguishing pedogenic and non-pedogenic silcretes in the landscape and geological record. **Proceedings of the Geologists' Association**, v. 127, n. 3, p. 311-319, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2016.03.001>

VARAJÃO, A.F.D.C.; MATEUS, A.C.C.; SANTOS, M.C.; VARAJÃO, C.A.C. OLIVEIRA, F.S.; YVON, J. The Cenozoic deposits of the ancient landscapes of Quadrilátero Ferrífero highlands, Southeastern Brazil: Sedimentation, pedogenesis and landscape evolution. **Catena**, v. 195, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104813>

WESSEL, B. M.; FIOLA, J. C.; RABENHORST, M. C.; Soil morphology, genesis, and monolith construction of an acid sulfate soil with silica-cementation in the US Mid-Atlantic **Regional Geoderma**, v. 308, p. 260-269, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.023>.

WILSON, M.A.; INDORANTE, S.J.; LEE, B.D.; FOLLMER, L.; WILLIAMS, D.R.; FICH, B.C.; MCCAULEY, W.M.; BATHGATE, J.D.; GRIMLEY, D.A.; KLEINSCHMIDT K. Location and expression of fragic soil properties in a loess-covered landscape, Southern Illinois, USA. **Geoderma**, v. 154, p. 529-54, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.023>.

WRB. WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Rome, 203p. (World Soil Resources Reports, 106), 2015.

Apêndice A

Ficha de descrição morfológica

DESCRIÇÃO GERAL

PERFIL: 01

DATA: 17/07/2019

CLASSIFICAÇÃO: ARGISSOLO AMARELO distrófico fragipânico espodossólico, textura muito argilosa, franco-argilo arenosa, franco arenosa, horizonte Ap (Aração), fase floresta subperenifólia, cerrado subperenifólio, relevo suave ondulado, sem pedregosidade.

LOCALIZAÇÃO: Estrada que sai de Mataraca-Pb no sentido de Barra de Camaratuba, depois do trevo a 1,3 km virando à direita.

ALTITUDE: 29 M

FORMAÇÃO GEOLOGICA: Sedimentos Do Grupo Barreiras

MATERIAL DE ORIGEM: Sedimentos areno-argilosos e arenosos

PEDREGOSIDADE: Não pedregosa

ROCHOSIDADE: Não rochoso

RELEVO LOCAL: Suave ondulado

RELEVO REGIONAL: Plano e suave ondulado

EROSÃO: Laminar Ligeira

DRENAGEM: Moderadamente drenado

VEGETAÇÃO LOCAL: Alguns remanescentes de floresta subperenifólia e do cerrado subperenifólio

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Subperenifólia / Cerrado subperenifólio

USO ATUAL : Agricultura; cana de açúcar

DESCRITO E COLETADO POR: José Coelho De Araújo Filho, Valdomiro Severino De Souza Junior, Jean Cheysson Barros Dos Santos, Nara Núbia De Lima Cruz, Rayanna Jacques Agra Bezerra.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap (0-11 cm), Bruno 10 YR 3/2 úmido, textura franco-arenosa, fraca, pequena a média, granular a bloco subangular; muito friável; ligeiramente plástico; ligeiramente pegajoso, transição abrupta e ondulada

Bt (11-74 cm) Bruno 7.5 YR 5/4 úmido, textura franco argilo arenosa; fraca; pequena a média, bloco subangular; friável; plástico; pegajoso; transição abrupta e irregular

Btx (74-80 cm) Bruno 10 YR 5/4 úmido, textura franco-arenosa; maçico a fraco; pequena a média, bloco subangular a bloco angular; firme a extremamente firme, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso; transição abrupta e irregular.

Bt/Btx (80-94 cm) Bruno 10 YR 6/3 úmido; textura franco-arenosa; maçico a fraca; pequeno a media; bloco subangular, firme a extremamente firme, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso; transição abrupta e irregular

B'tx (94-140 cm), Bruno 10 YR 6/4 úmido, textura franco arenosa; ; maçico a fraca; pequeno a media; bloco subangular, firme a extremamente firme, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso; transição abrupta e irregular

Raízes:

Ap- Finas, Bt Pouco Finas, Raras Finas nos demais ..

Observações:

- A segunda transição do B é quebrada (irregular)
- Perfil não trivial por isso irregularidades
- No horizonte bt/btx o material cimentado aparece na forma de nódulos na matriz do solo
- Presença de fragmentos no horizonte plácico na profundidade de 50-60 cm reaparece na altura de 110-130 cm de profundidade com espessura predominante de 0,4 a 1,0 cm com coloração de 2,5 YR 3/4.
- No horizonte btx a forma maçica de funciona como um todo não tira tamanho nem forma

DESCRIÇÃO GERAL

PERFIL: 02

DATA: 18/07/2019

CLASSIFICAÇÃO: ESPODOSSOLO FERRI-HUMILÚVICO Órtico dúrico, textura franco arenosa, areia franca horizonte Ap (Aração), fase floresta subperenifólia, cerrado subperenifólio, relevo plano, sem pedregosidade.

LOCALIZAÇÃO: Estrada que sai de Mataraca-Pb no sentido de Barra de Camaratuba, depois do trevo a 2,1 km virando à direita.

ALTITUDE: 37 m

FORMAÇÃO GEOLOGICA: Sedimentos Do Grupo Barreiras

MATERIAL DE ORIGEM: Sedimentos areno-argilosos e arenosos

PEDREGOSIDADE: Não pedregosa

ROCHOSIDADE: Não rochoso

RELEVO LOCAL: Plano

RELEVO REGIONAL: Plano e suave ondulado

EROSÃO: Laminar Ligeira

DRENAGEM: Moderadamente a Imperfeitamente drenado

VEGETAÇÃO LOCAL: Poucos remanescentes da vegetação primária

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Subperenifólia / Cerrado subperenifólio

USO ATUAL : Agricultura; cana de açúcar

DESCRITO E COLETADO POR: José Coelho De Araújo Filho, Valdomiro Severino De Souza Junior, Jean Cheysson Barros Dos Santos, Nara Núbia De Lima Cruz, Rayanna Jacques Agra Bezerra.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap (0-15 cm), Bruno 10 YR 4/2 úmido, textura franco-arenosa, fraca, pequena a média, bloco subangular; muito friável; ligeiramente plástico; não pegajoso, transição clara e plana.

E (15-38 cm) Bruno 10 YR 5/2 úmido, textura areia franca; fraca; pequena a média, bloco subangular; muito friável; ligeiramente plástico; não pegajoso; transição abrupta e plana.

Bm1 (38-70 cm) Bruno 10 YR 6/4 úmido, textura franco-arenosa; Extremamente maçico coesa; extremamente firme, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso; transição difusa e plana.

Bm2 (70-115 +... cm) Bruno 10 YR 6/4 úmido; textura areia franca ;extremamente maçico coesa, extremamente firme, não-plástico, não- pegajoso;

Raízes:

Ap- Comuns e Finas, E- Pouco Finas, Bm1, Bm2-Raras Finas ..

Observações:

- Fendas preenchidas com material do horizonte E
- O horizonte fortemente cimentado pode ser um horizonte Bsm

- A textura foi feita com raspagem do cimento

DESCRIÇÃO GERAL

PERFIL: 03

DATA: 18/07/2019

CLASSIFICAÇÃO: ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Órtico dúrico textura franco arenosa, areia franca horizonte Ap (Aração), fase floresta subperenifólia, cerrado subperenifólio, relevo plano, sem pedregosidade.

LOCALIZAÇÃO: Estrada que sai de Mataraca-Pb no sentido de Barra de Camaratuba, depois do trevo a 2,0 km virando à esquerda.

ALTITUDE: 18 m

FORMAÇÃO GEOLOGICA: Sedimentos Do Grupo Barreiras

MATERIAL DE ORIGEM: Sedimentos areno-argilosos e arenosos

PEDREGOSIDADE: Não pedregosa

ROCHOSIDADE: Não rochoso

RELEVO LOCAL: Plano

RELEVO REGIONAL: Plano com ligeiro desnível para uma linha de drenagem

EROSÃO: Laminar Ligeira

DRENAGEM: Moderadamente a Imperfeitamente drenado

VEGETAÇÃO LOCAL: Remanescentes do Cerrado subperenifólio

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Subperenifólia / Cerrado subperenifólio

USO ATUAL : Agricultura; cana de açúcar

DESCRITO E COLETADO POR: José Coelho De Araújo Filho, Valdomiro Severino De Souza Junior, Jean Cheysson Barros Dos Santos, Nara Núbia De Lima Cruz, Rayanna Jacques Agra Bezerra.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap (0-14 cm), Bruno 10 YR 4/2 úmido, textura franco-arenosa, fraca, pequena a média, granular a bloco subangular; muito friável; ligeiramente plástico; não pegajoso, transição clara e plana.

E (14-45 cm) Bruno 10 YR 5/3 úmido, textura franco-arenosa; fraca; pequena a média, bloco subangular; muito friável; ligeiramente plástico; não pegajoso; transição abrupta e ondulada.

Bhm/E (45-64 cm) 5 YR 2,5/2 úmido, textura franco-arenosa; muito coeso/fraco; extremamente firme/ muito friável, ligeiramente plástico, não pegajoso; transição abrupta e ondulada

Bsm (64-115 +... cm) Bruno 10 YR 6/3 úmido; textura franco-arenosa; muito coesa, extremamente firme, não-plástico, não- pegajoso; ligeiramente plástico, não pegajoso

Raízes:

Ap- muito finas, E- Pouco Finas, Bhm/E -Pouco Finas Bsm -Raras Finas ..

Observações:

- A morfologia é indicativa de um processo de degradação
- O horizonte espódico não é contínuo visível de descontinuidade e mergulhado na profundidade abaixo de 02 m
- No horizonte Bhm/E o material cimentado tem coloração escura externamente e mais clara internamente
- O horizonte Bsm apresenta fendas onde podem penetrar raízes