

RÔMULO VINÍCIUS CORDEIRO CONCEIÇÃO DE SOUZA

**TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X DE SOLOS COESOS
DOS TABULEIROS COSTEIROS DO ESTADO DE ALAGOAS**

Recife-PE

2013

RÔMULO VINÍCIUS CORDEIRO CONCEIÇÃO DE SOUZA

TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X DE SOLOS COESOS
DOS TABULEIROS COSTEIROS DO ESTADO DE ALAGOAS

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

Orientador:

Mateus Rosas Ribeiro, PhD. (*in memoriam*)

Marcelo Metri Corrêa, D. Sc.

Conselheiro:

Richard John Heck, PhD.

Recife - PE

2013

Ficha catalográfica

S729t Souza, Rômulo Vinicius Cordeiro Conceição de
Tomografia computadorizada de raios-X de solos coesos
dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas / Rômulo
Vinicius Cordeiro Conceição de Souza. -- Recife, 2013.
142 f. : il.

Orientador: Marcelo Metri Corrêa.

Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade
Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Agronomia,
Recife, 2013.

Inclui referências, anexo(s) e apêndice(s).

1. Atenuação de raios-X 2. Estrutura do solo
3. Densidade do solo 4. Porosidade 5. Argissolos amarelos
6. Latossolos amarelos 7. Chapada do Araripe I. Corrêa,
Marcelo Metri, orientador II. Título

CDD 631.4

RÔMULO VINÍCIUS CORDEIRO CONCEIÇÃO DE SOUZA

TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X DE SOLOS COESOS
DOS TABULEIROS COSTEIROS DO ESTADO DE ALAGOAS

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

Aprovada em **25 / 06 /2013**

Orientador

Prof. D. Sc. Marcelo Metri Corrêa (UAG/UFRPE)

Examinadores:

D. Sc. José Coelho de Araújo Filho (EMBRAPA/Solos)

D. Sc. Flávio Adriano Marques (EMBRAPA/Solos)

Prof. D. Sc. Mateus Rosas Ribeiro Filho (DEPA/UFRPE)

Prof. D. Sc. Valdomiro Severino de Souza-Júnior (DEPA/UFRPE)

Don't worry about a thing,
'Cause every little thing
Gonna be all right

Bob Marley

...

Não tenho palavras que representem o quão importante para minha vida pessoal e profissional foi ter sido orientado pelo Prof. Mateus Rosas Ribeiro!

Apenas sei que o exemplo de honestidade, sinceridade e persistência serão sempre seguidos por mim.

Em meio a imensa falta que nos deixou essa partida precoce, fico com a alegria de saber que os preceitos básicos da vida ele seguiu plenamente: teve filhos, escreveu livros e plantou árvores...ficaram os frutos para serem colhidos!

Descanse em paz professor...

Dedico...

à minha mãe, D. Rita, minha fortaleza e razão de viver.

à minha esposa Bianca, companheira nas conquistas e abrigo nas tempestades.

MENSAGENS

Não vim a este mundo competir com ninguém.
Estou neste mundo para competir somente comigo:
Ultrapassar meus limites, vencer meus medos, lutar contra meus defeitos,
superar dificuldades e correr em busca dos meus objetivos...

“Esperei com paciência pelo Senhor,
e ele se inclinou para mim e ouviu o
meu clamor.” *Salmo 40, 1*

Valeu a pena esperar!

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado perseverança nas horas difíceis, sabedoria nos momentos de decisão, fortalecido a minha fé ao longo dessa longa caminhada, me permitindo chegar até aqui com vida e saúde para regozijar-se de mais um sonho realizado.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, através do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de cursar e concluir o Doutorado em Ciência do Solo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo fomento ao presente trabalho.

Ao professor Mateus Rosas Ribeiro, por todos os ensinamentos repassados, pela confiança e credibilidade dada nesse trabalho que desde o início foi desafiador e por sempre ter sido o profissional que almejo ser.

Ao professor Marcelo Metri Corrêa, primeiro pela disponibilidade em aceitar o desafio de concluir a orientação de um trabalho tão complexo, o empenho em contribuir para que tudo desse certo e por último pela amizade.

Ao professor Valdomiro Severino de Souza Junior, pela dedicação, amizade e apoio, sobretudo nos momentos mais difíceis, tornando tudo isso realidade.

Ao professor Richard J. Heck pela co-orientação, pela oportunidade dada para trabalhar com algo inovador e instigante, pelo apoio em toda a jornada até Guelph.

Ao Engenheiro Agrônomo José Fernando W. F. de Lima (Zeca) pela ajuda em todos os momentos, disponibilidade, amizade e sábios conselhos muito bem-vindos, mas erroneamente nem sempre seguidos.

Aos docentes que integram o PPGCS, pela amizade e valiosos ensinamentos transmitidos.

Um muito obrigado especial a Maria da Conceição, grande amiga e companheira de grupo de pesquisa e de trabalho, que com sua ajuda valorosa tornou tudo muito mais simples.

A Juliana Alves, quando então bolsista de iniciação científica garantiu a continuidade das análises de rotina e mineralógicas nos momentos em que afastei por causa do trabalho.

A Maria do Socorro de Santana (Socorro), secretária da Pós, que é um verdadeiro anjo da guarda sempre nos auxiliando, muitas vezes de forma discreta, mas tão valiosa.

Ao Sr. Josué e Sr. Camilo, pelo auxílio e por facilitar o nosso dia a dia na Pós.

Aos amigos da Pós-Graduação Laerte, Agenor, Priscila, Marise, Michelangelo, Airon, Edivan, Cícero, Regilene, Waldirene, Michel, Laura, Luciana Remígio, Clayton, Welka, Hailson, Eriberto, Luiz Guilherme, Marcio(s) e os demais que me faltam o nome nesse momento por compartilhar tantas emoções, aventuras e desventuras ao longo dessa jornada!

Aos demais colegas do PPGCS pelos momentos de descontração, companheirismo e amizade.

Aos gestores do IFPE-Campus Barreiros pelo apoio “oficioso” que permitiu concluir este trabalho de tese diante da impossibilidade de afastamento.

Aos amigos do trabalho Renaldo, Caetano, Marcelo Mello, Ronaldo Melo, Amanda, Henrique, Rinaldo Malaquias, Cristiane Conde, Francisca Adriana, Nielson, Erick Farias, Francisco Roberto, Tatiely, Marcos, Marcelo Carvalho, Rodrigo, Patricia, Diego Henrique, José Nildo, Adoniran, José Ronaldo, Glauco, Antonio Novais e demais colegas pelo apoio, conselhos, pelas inúmeras resenhas e amizade.

A grande amiga Lícia Maria, a quem sempre serei grato pelo incentivo para chegar até aqui, pela cumplicidade de uma amizade sincera.

A minha mãe, D. Rita, por ter sempre me apoiar e me amar.

A minha esposa, Bianca, pela paciência, pela ajuda incondicional e compreensão nos momentos de renúncia em favor da conclusão desta tese

A minha família que das mais diversas formas sempre esteve torcendo pelas minhas vitórias, me dando força e tendo orgulho das minhas conquistas.

“A special thanks” pela amizade e apoio que recebi de Soraia Heck, Carla Eloize, Eliane, Larissa, Patricia, Alexis, Mayra, Danny, Poyan Rami, Becca Francis, Bárbara(s), Anaís, Alassane durante a pequena passagem por Guelph, no Canadá:

A todas as amizades que fiz ao longo desses seis anos envolvido com o Mestrado e o Doutorado em Pernambuco, pessoas fundamentais para o meu desenvolvimento pessoal e profissional! Nomeá-los não caberia nestas páginas! Sintam-se abraçados e contem sempre comigo.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Epigrafe	i
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUÇÃO	18
1.2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
1.2.1 Tomografia computadorizada por Raios-X.....	21
1.2.1.1 Semivariogramas no estudo de imagens tomográficas	25
1.2.1.2 Atenuação de Raios-X e Variabilidade da Atenuação de Raios-X..	27
1.2.1.3 Porosidade Detectável da Imagem	30
1.2.2 Horizontes coesos: definição e caracterização	32
1.2.3 Métodos destrutivos e não-destrutivos para avaliação do caráter coeso	35
1.2.3.1 Micromorfologia de solos	35
1.2.3.2 Densidade do Solo, Porosidade e Resistência a Penetração	39
1.2.4 Análises Estatísticas: Funções Discriminantes	41
2. MATERIAL E MÉTODOS	43
2.1 Seleção, Coleta e Preparo das Amostras de Solos.....	43
2.2 Análises Físicas	46
2.3 Análises Químicas	46
2.4 Extração de ferro, alumínio e silício por Ditionito-Citrato- Bicarbonato (DCB) e Oxalato	47
2.5 Extração por Digestão Sulfúrico	48
2.6 Análises Mineralógicas e Micromorfologia	48
2.7 Tomografia Computadorizada de Raios-X.....	49
2.8 Análises Estatísticas – Funções Discriminantes	52
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
3.1 Morfologia dos Solos.....	52
3.2 Atributos Físicos e Químicos.....	62
3.3 Atributos Mineralógicos	67
3.3.1 Ataque Sulfúrico, Fe e Al extraídos por DCB e Oxalato	67
3.3.2 Difractometria de Raios-X.....	70
3.4 Micromorfologia do Solo	74
3.5 Tomografia de Raios-X	77

3.5.1 Semivariogramas, Valores Médios da Atenuação de Raios-X e Variabilidade da Atenuação de Raios-X das Amostras (Total)	77
3.5.2 Atenuação Média de Raios-X e Variabilidade da Atenuação na Matriz do Solo	87
3.5.3 Porosidade Total Detectável da Imagem	92
3.5.4 Avaliação da Tomografia como Ferramenta na Distinção das Classes de Solos Estudadas	99
3.5.5 Influência do uso do solo avaliada por Tomografia Computadorizada de Raios-X (TCX) em Solos Coesos	102
4. CONCLUSÕES	110
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
6. APÊNDICE	130
7. ANEXO	138

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1**– A: Exemplo de semivariograma experimental Fonte: Vicente, 2004; B: representação gráfica de modelos transitivos normalizados. Fonte: Camargo, 1998.26
- Figura 2** – Localização dos perfis de solos coesos estudados no Estado de Alagoas: P1, município de Penedo; P2, município de São Miguel dos Campos; e P3, no município de Coruripe (modificado de Lima Neto et al., 2010)44
- Figura 3** – Localização do perfil de solo não coeso estudado no Estado de Pernambuco: Latossolo Amarelo Distrófico típico (Perfil P4), no município de Exu (destacado em cor escura).45
- Figura 4** - Detalhes dos procedimentos de coleta de amostras cilíndrica para tomografia computadorizada. i. exemplo dos horizontes amostrados. ii - iv. etapas para a retirada da amostra em horizonte coeso, por causa do adensamento natural. v. amostra pronta para retirada e acondicionamento para laboratório.....50
- Figura 5** – Detalhes da tomografia computadorizada para uma amostra cilíndrica: (A) uma fatia representando a porção mensurada da amostra, definida como uma função $f(x,y)$ da espessura Δz . (B) sistema de coordenadas usadas para descrever o método de reconstrução da imagem (Pires et al, 2010).51
- Figura 6** – Sequência de horizontes do Argissolo Acinzentado (P1), Usina Marituba (município de Penedo/AL). O cilindro pontilhado indica os horizontes analisados por TCX.....54
- Figura 7** – Sequência de horizontes do Latossolo Amarelo (P2), Usina Caeté (município de São Miguel dos Campos/AL). O cilindro pontilhado indica os horizontes analisados por TCX.....56
- Figura 8** – Sequência de horizontes do Argissolo Amarelo (P3), Usina Coruripe (município de Coruripe/AL). O cilindro pontilhado indica os horizontes analisados por TCX.58
- Figura 9** – Sequência de horizontes do Latossolo Amarelo (P4), Sítio Boa Esperança (município de Exu/PE). O cilindro pontilhado indica os horizontes analisados por TCX.....61
- Figura 10** – Difrátogramas de raios-X da fração argila não-orientada dos horizontes estudados no Latossolo Amarelo Distrófico típico – P4. (Ct-caulinita; An-anátasio; Gt-goethita).....72

- Figura 11** – Difractogramas de raios-X da fração argila orientadas dos horizontes estudados no Latossolo Amarelo Distrófico típico – P4. (Ct-caulinita; An-anátasio; Gt-goethita).....73
- Figura 12** – Fotomicrografias dos horizontes A2 e Bw do Latossolo Amarelo Distrofíco típico (Perfil 04). (a) estrutura granular e microgranular do horizonte A2 em PPL; (b) imagem anterior em XPL; (c) estrutura em blocos formada pela coalescência de grânulos, com destaque para os excrementos biológicos (seta), horizonte A2 em PPL; (d) nódulo de ferro do A2 em PPL; (e) estrutura microgranular do Bw; (f) detalhe da estrutura granular, com destaque aos nódulos de ferro (seta).76
- Figura 13 – A, B, C:** Gráficos de semivariogramas (eixos “x”, em azul e “y”, em vermelho, representam a largura e comprimento das fatias da amostra; o eixo “z” em verde, representa a espessura amostrada); **D, E, F:** valores médios da energia de atenuação de Raios-X (linha azul) e variabilidade da Atenuação de Raios-X (linha vermelha), em Unidades Hounsfield (UH), das amostras do Argissolo Acinzentado Distrocoeso fragipânico (P1), sob cana.....79
- Figura 14 – A, B, C:** Gráficos de semivariogramas (eixos “x”, em azul e “y”, em vermelho, representam a largura e comprimento das fatias da amostra; o eixo “z” em verde, representa a espessura amostrada); **D, E, F:** valores médios da energia de atenuação de Raios-X (linha azul) e variabilidade da Atenuação de Raios-X (linha vermelha), em Unidades Hounsfield (UH), das amostras do Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3), sob mata.....80
- Figura 15 – A, B, C:** Gráficos de semivariogramas (eixos “x”, em azul e “y”, em vermelho, representam a largura e comprimento das fatias da amostra; o eixo “z” em verde, representa a espessura amostrada); **D, E, F:** valores médios da energia de atenuação de Raios-X (linha azul) e variabilidade da Atenuação de Raios-X (linha vermelha), em Unidades Hounsfield (UH), das amostras do Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2), sob mata....84
- Figura 16 – A, B, C:** Gráficos de semivariogramas (eixos “x”, em azul e “y”, em vermelho, representam a largura e comprimento das fatias da amostra; o eixo “z” em verde, representa a espessura amostrada); **D, E, F:** valores médios da energia de atenuação de Raios-X (linha azul) e variabilidade da Atenuação de Raios-X (linha vermelha), em Unidades Hounsfield (UH), das amostras do Latossolo Amarelo Distrófico típico (P4), sob mata.....85
- Figura 17** – Valores médios da energia de atenuação de Raios-X da matriz dos sólidos (linha verde) e variabilidade da Atenuação de Raios-X da matriz dos sólidos (linha marrom), em Unidades Hounsfield (UH). **A, B, C:** amostras do Argissolo Acinzentado Distrocoeso fragipânico (P1), sob cana-de-açúcar; **D, E, F:** amostras do Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3), sob mata.....89
- Figura 18** – Valores médios da energia de atenuação de Raios-X da matriz dos sólidos (linha verde) e variabilidade da Atenuação de Raios-X da matriz

dos sólidos (linha marrom), em Unidades Hounsfield (UH). **A, B, C:** amostras do Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2), sob mata; **D, E, F:** amostras do Latossolo Amarelo Distrófico típico (P4), sob mata.....90

Figura 19 – Porosidade total Detectável dos perfis de Argissolos estudados. **A, B, C:** Argissolo Acinzentado Distrocoeso fragipânico (P1) sob cana-de-açúcar; **D, E, F:** Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3), sob mata.95

Figura 20 – Porosidade total Detectável nos perfis de Latossolos estudados. **A, B, C:** Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2); **D, E, F:** Latossolo Amarelo distrófico típico (P4); ambos sob mata.96

Figura 21 – Estudo da probabilidade por meio da função discriminante linear de Fisher para distinção dos perfis dentro da classificação de solos vigente baseada nos propriedades obtidas por tomografia computadorizada. 100

Figura 22 – Estudo da probabilidade por meio da função discriminante quadrática de Fisher para distinção dos perfis dentro da classificação de solos vigente baseada nos propriedades obtidas por tomografia computadorizada. 101

Figura 23 – **A, B:** Gráficos de semivariogramas (eixos “x”, em azul e “y”, em vermelho, representam a largura e comprimento das fatias da amostra; o eixo “z” em verde, representa a espessura amostrada); **C, D:** valores médios da energia de atenuação de Raios-X (linha azul) e variabilidade da Atenuação de Raios-X (linha vermelha), em Unidades Hounsfield (UH), das amostras do Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2), sob cana-de-açúcar. 103

Figura 24 – **A, B:** Gráficos de semivariogramas (eixos “x”, em azul e “y”, em vermelho, representam a largura e comprimento das fatias da amostra; o eixo “z” em verde, representa a espessura amostrada); **C, D:** valores médios da energia de atenuação de Raios-X (linha azul) e variabilidade da Atenuação de Raios-X (linha vermelha), em Unidades Hounsfield (UH), das amostras do Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3), sob cana-de-açúcar. 104

Figura 25 – Valores médios da energia de atenuação de Raios-X da matriz dos sólidos (linha verde) e variabilidade da Atenuação de Raios-X da matriz dos sólidos (linha marrom), em Unidades Hounsfield (UH). **A, B:** amostras do Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2), sob mata; **C, D:** amostras do Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2), sob cana-de-açúcar. 106

Figura 26 – Valores médios da energia de atenuação de Raios-X da matriz dos sólidos (linha verde) e variabilidade da Atenuação de Raios-X da matriz dos sólidos (linha marrom), em Unidades Hounsfield (UH). **A, B:** amostras do Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3), sob mata; **C, D:** amostras do Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3), sob cana-de-açúcar. 107

- Figura 27** - Porosidade total detectável nos horizontes do perfil de Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2) sob diferentes usos. A, B: sob mata; C, D: sob cana-de-açúcar. 109
- Figura 28**– Porosidade total detectável nos horizontes do perfil de Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3) sob diferentes usos. **A, B:** sob mata; **C, D:** sob cana-de-açúcar..... 110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos morfológicos dos solos estudados.....	59
Tabela 2 – Atributos físicos e químicos dos solos estudados	66
Tabela 3 – Teores de SiO ₂ , Al ₂ O ₃ e Fe ₂ O ₃ extraídos na fração argila pelo ataque sulfúrico de amostras do Latossolo Amarelo distrófico (P4)	67
Tabela 4 – Teores de Al ₂ O ₃ e de Fe ₂ O ₃ extraídos na fração argila obtidos por extrações sucessivas de ditionito-citrato-bicarbonato e extração única de oxalato de amônio e demais índices mineralógicos das amostras do Latossolo Amarelo Distrófico (P4)	69
Tabela 5 – Principais características micromorfológicas das amostras do Latossolos Amarelo Distrófico típico (P4), segundo classificação de Brewer (1976) adaptada por Bullock et al (1985).....	74
Tabela 6 – Valores médios dos Semivariogramas, Atenuação Total e Variabilidade de Raios-x relacionados com Ds, Poros e CO dos Solos as amostras estudadas	82
Tabela 7 – Matriz de correlação entre Atributos Físicos e Químicos (Densidade do Solo, Porosidade Total e Carbono Orgânico) e a Atenuação Total e Variabilidade de Raios-x relacionados com as Amostras estudadas.....	86
Tabela 8 – Relação entre os resultados de Atenuação da Matriz dos Sólidos e Variabilidade de Raios-x com teores de SiO ₂ , Al ₂ O ₃ e Fe ₂ O ₃ obtidos por digestão sulfúrica total das Amostras estudadas.....	87
Tabela 9 – Matriz de correlação entre resultados de Atenuação da Matriz dos Sólidos e Variabilidade de Raios-x com Atributos Mineralógicos das Amostras estudadas	91
Tabela 10 - Distribuição percentual (ϕ %) e coeficiente de variação (C.V %) da porosidade total detectável nos horizontes de perfis de solos coesos e não-coesos sob diferentes usos (mata e cana-de-açúcar)	93
Tabela 11 - Valores médios dos semivariogramas, atenuação e variabilidade da atenuação total de raios-x, atenuação e variabilidade da matriz dos sólidos.....	105
Tabela 12 – Distribuição percentual (ϕ %) e coeficiente de variação (C.V %) da porosidade total detectável nos horizontes de perfis de solos coesos sob diferentes usos (mata e cana-de-açúcar).	108

RESUMO

SOUZA, Rômulo Vinícius Cordeiro Conceição de, D. Sc., Universidade Federal Rural de Pernambuco. junho de 2013. **TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X DE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS DO ESTADO DE ALAGOAS**. Orientadores: PhD. Mateus Rosas Ribeiro (*in memoriam*), D. Sc. Marcelo Metri Corrêa; Co-Orientador: PhD. Richard John Heck.

A TCX é uma técnica não-destrutiva e não-invasiva que baseia-se no princípio de atenuação de um feixe de ondas eletromagnéticas direcionado sobre o objeto de interesse onde os fótons passam por ele, resultando em imagens que podem ser usadas para gerar um modelo em três dimensões (3D) do objeto; fornecendo subsídios para análise da concentração e a distribuição espacial dos componentes de objetos. A partir dos anos 80, a técnica começou a ser utilizada na Ciência do Solo para medir a densidade do solo (ρ_s), a distribuição espacial do conteúdo e do movimento da água no solo. Para o estudo de solos, em especial, os que apresentam horizontes coesos ou mesmo compactados, diversas técnicas e ferramentas vêm sendo utilizadas; neste contexto propõe-se a TCX como uma nova ferramenta. Dentre as classes de solos presentes na área dos Tabuleiros Costeiros predominam Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. Estes solos possuem moderadas limitações agrícolas, como baixa fertilidade natural. Além disso, podem apresentar horizontes endurecidos, denominados “coesos”, que reduzem a profundidade efetiva do solo e, conseqüentemente, o desenvolvimento do sistema radicular. Com o objetivo de caracterizar solos com horizontes coesos e não coesos por meio de TCX foram coletados três perfis de solos com expressiva manifestação desse caráter. Um perfil sob cultivo de cana-de-açúcar, o Argissolo Acinzentado Distrocoeso fragipânico (P1) e; dois perfis sob condição de mata: um Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2) e um Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3). Os solos foram coletados na zona do litoral e mata do Estado de Alagoas, na mesorregião do leste alagoano. Também foi descrito e amostrado um perfil de Latossolo Amarelo Distrófico típico (P4), onde comprovadamente não há qualquer manifestação do caráter coeso, situado na região da Chapada do Araripe, Sertão de Pernambuco. Este perfil serviu como testemunha para comparação das diversas características químicas, físicas, mineralógicas e micromorfológicas. Essas análises serviram

SOUZA, R. V. C. C. de. Caracterização micromorfológica por tomografia...

de parâmetro para discussão dos resultados obtidos da atenuação e variabilidade da atenuação total de raios-x, atenuação de sólidos e variabilidade da atenuação de raios-x da matriz do solo e porosidade total detectável da imagem por meio da TCX. Concluiu-se que a TCX é uma excelente ferramenta para complementar o estudo de solos coesos, todavia isoladamente ela não dispensa a utilização de outras técnicas para a separação entre horizontes coesos e não-coesos.

Palavras-Chave: Atenuação de Raios-X, estrutura do solo, densidade do solo, porosidade, Argissolos Amarelos, Latossolos Amarelos, Chapada do Araripe

ABSTRACT

SOUZA, Rômulo Vinícius Cordeiro Conceição de, D Sc., Universidade Federal Rural de Pernambuco. June 2013. **X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY OF COHESIVE SOILS ON NORTHEAST COASTAL TABLELAND OF ALAGOAS PROVINCE.** Advisers: Mateus Rosas Ribeiro (*in memoriam*), Marcelo Metri Corrêa and Richard John Heck.

X-ray CT is a non-destructive, non-invasive technique used to investigate the attributes of the 'inside' of objects of interest, and is based on the principle of the attenuation of an electromagnetic wave beam that is focused on the object that can be used to generate a model in three dimensions (3D) object; giving subsidies for analysis of the concentration and spatial distribution of the components of objects. From the 80's, the technique began to be used in soil science to measure soil density (ρ_s), the spatial distribution of the water content and movement in the soil. Intended for the study of soils, especially those with cohesive or compressed layer, several techniques and tools have been used and in this context it is proposed to TCX as a new tool. Between the soil classes present in the area of the Coastal Tablelands predominate Yellow Latosols (Oxisols) and Yellow Argisol (Ultisol). These soils have moderate limitations agricultural and low natural fertility. They may showed hardened horizons supposed "cohesive", which reduce the effective soil depth and, consequently, the development of root system. To characterize soils with cohesive and non-cohesive horizons through TCX were collected three soil profiles with significant expression of this character. A profile under cultivation of cane sugar, a Gray Argisol (P1) and, two profiles under forest condition: one soil Yellow Latosols (P2) and other Yellow Argisol (P3). Soil samples were collected in the coastal and forest zone on State of Alagoas. Also, it was sampled and described a Yellow Latosols (P4) profile, where unquestionable there is no manifestation of the cohesive character; situated in "Chapada do Araripe", the semi-arid region of Pernambuco State. This profile was used as control for comparison of various chemical, physical, mineralogical and micromorphological analysis. These tests served as a parameter for discussion of results about X-rays attenuation and its variability, X-rays attenuation of the soil matrix, furthermore resolvable porosity by X-ray CT imagery. This work concluded that the X-ray CT is an excellent complementary tool for studying cohesive soils, nevertheless this

SOUZA, R. V. C. C. de. Caracterização micromorfológica por tomografia...

tool itself does not replace the use of other techniques for separation into cohesive and non-cohesive horizons.

Key-Words: X-Ray attenuation, soil estrutura, soil density, porosity, Yellow Latosols (Oxisols), Yellow Argisol (Ultisol), Araripe's Plateau

1. INTRODUÇÃO

A tomografia computadorizada de raios-X (TCX) é uma técnica não-destrutiva e não-invasiva que baseia-se no princípio de atenuação de um feixe de ondas eletromagnéticas direcionado sobre o objeto de interesse onde os fótons passam por ele, resultando em imagens que podem ser usadas para gerar um modelo em três dimensões (3D) do objeto; fornecendo subsídios para análise da concentração e a distribuição espacial dos componentes de objetos, como por exemplo amostras de solo (Pires et al, 2010; Elliot e Heck, 2007). Essa técnica vem ganhando destaque nos últimos anos, especialmente na Ciência do Solo, por permitir o estudo com amostras de solo indeformadas obtendo-se imagens em alta resolução 3D (ex: <10 μm de volume por elemento) (Elliot e Heck, 2007).

O estudo da imagem baseia-se no conceito de pixel (menor elemento ou ponto por unidade de medida quadrada que compõe uma imagem digital) e voxel (representa a medida do pixel em volume, unidade de medida cúbica). A separação dos materiais é baseada na densidade. Assim, em imagens de TCX a visualização de componentes com maior densidade é mais escura e aquelas de menor densidade mais clara. Dessa forma, a distribuição da imagem dentro de um número pré-estabelecido de pixels e voxels, ou seja, resolução da imagem permite a quantificação e reconstrução em 3D dos componentes da amostra estudada (Alves et al., 2004; Elliot e Heck, 2007; Russ, 2007; Heck, 2009; Pires e Bacchi, 2010).

Na ciência do solo, os pioneiros no uso da tomografia computadorizada foram Petrovic et al. (1982), Hainsworth e Aylmore (1983) e Crestana et al. (1985), que utilizaram essa técnica para medir a densidade do solo (ρ_s), a distribuição espacial do conteúdo de água e o movimento da água no solo (Pires e Bacchi, 2010).

As mais diversas aplicações da TCX no mundo, dentro da ciência do solo, ressaltam o quanto essa ferramenta se constitui em uma importante técnica para o entendimento da natureza e configuração espacial dos componentes do solo, bem como a sua relação com o comportamento e processos inerentes a ele (Taina et al., 2008).

No Brasil, a técnica é utilizada nos últimos 25 anos em ciência do solo, com aplicações direcionadas para a física do solo, envolvendo estudos sobre a distribuição de densidade do solo e teor de água, mudanças na porosidade, mudanças naturais e artificiais na estrutura do solo, movimento de água no solo, qualidade do solo e efeito de diferentes práticas de manejo na estrutura do solo (Pires et al., 2010).

Até pouco tempo, a caracterização qualitativa e semiquantitativa de diferentes feições estruturais era basicamente feita através da análise de lâminas delgadas em estudos de micromorfologia clássica, de grande importância para essa finalidade. Entretanto, com tal ferramenta é complicado fazer interpretações dos elementos estruturais em três dimensões sem analisar um grande número de lâminas delgadas, que permitiriam identificar a extensão da feição analisada. Stoops (2003) ressalta que mensurações incorretas podem ocorrer em lâminas delgadas pela observação de feições em diferentes orientações; isso não permite a representação de suas extensões espaciais, ou os constituintes do solo podem parcialmente sobrepor as feições ao longo de seus limites. Neste sentido, a TCX apresenta grande vantagem para a caracterização e avaliação em três dimensões, em um tempo bem menor e possibilitando novos estudos com a mesma amostra.

Em contraste com componentes sólidos minerais do solo, os componentes orgânicos ainda recebem menos atenção em estudos com TCX. Os trabalhos realizados com TCX em componentes orgânicos referem-se a crescimento de raízes bem como a sua distribuição no solo. Experimentos têm mostrado que o conteúdo de água em amostra orgânicas tem uma significativa influência no contraste das imagens de raios-X (Taina et al. 2008).

Para o estudo de solos que apresentam horizontes coesos ou mesmo compactados, diversas técnicas e ferramentas vêm sendo utilizadas. Algumas dessas técnicas são baseadas no uso de amostras onde não há alteração da estrutura do solo, por isso são classificadas como métodos não-destrutivos; a densidade do solo pelo método do anel volumétrico é tido como exemplo clássico e a TCX destaca-se como outra técnica promissora.

O caráter coeso é uma característica pedogenética (adensamento) típica de horizontes subsuperficiais (BA e/ou parte do Bw ou Bt), de textura

média, argilosa ou muito argilosa, encontrados normalmente entre 0,30 e 0,70 m de profundidade (Rezende, 2000; Jacomine, 2001; Ribeiro, 2001a), comumente observadas nos solos dos Tabuleiros Costeiros, nas regiões Sudeste e Nordeste do Brasil.

Dos problemas relacionados com o caráter coeso, podem ser citados a elevada resistência à penetração do solo quando seco, que influencia: (a) o desenvolvimento radicular das plantas, (b) o teor de água disponível do solo e (c) a aeração e a absorção de nutrientes, sendo um inibidor físico que pode afetar a produção agrícola (Cintra et al., 1997; Rezende, 2000).

A baixa disponibilidade de nutrientes desses solos, associada à alta saturação por alumínio e à alta acidez ativa e trocável, constitui também um inibidor químico, dificultando o desenvolvimento radicular e a atividade microbiana do solo (Souza, 1997; Rezende, 2000).

Conforme Oliveira et al. (2002), a coesão foi inicialmente constatada em solos de Tabuleiros Costeiros, na região de Campos, RJ, quando da realização do Levantamento de Solos do Estado. Na década de 1960, deu-se início aos estudos sobre caracterização físico-hídrica de horizontes adensados nesses solos.

Recentemente, Lima Neto et al (2010), concluíram que, por não observar o aumento dos teores de sílica e alumínio extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato e oxalato nos horizontes coesos, sua gênese não se deve à presença de agentes cimentantes; por outro lado estudos mineralógicos e micromorfológicos atribuíram a formação de tais horizontes a iluviação de argila fina entupindo os poros do solo, com posterior perda de ferro na parte superior, colapsando a estrutura.

Esse tipo de comportamento de solo foi incorporado ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) por meio da criação e utilização do atributo diagnóstico “caráter coeso” (EMBRAPA, 2006), destacando-se as diferenças marcantes entre os graus de consistência do solo seco (duro, muito duro até extremamente duro) e úmido (firme a friável) (Jacomine, 1996; Ribeiro, 1998; Giarola et al., 2001).

A origem dos horizontes com caráter coeso mesmo não sendo completamente esclarecida, ocorre de forma natural e que pode estar

associada a vários processos (Lima et al., 2005). Da abstração das diversas técnicas utilizadas para o estudo de tais horizontes, observa-se que as teorias quanto presença de argila dispersa (Oliveira et al., 1968; Acha Panoso, 1976; Silva et al., 1998; Corrêa, 2005; Moreau et al, 2006) bem como de outros agentes químicos (Meireles e Ribeiro, 1995; Ribeiro, 1998), nos microporos, e quanto ao adensamento por dessecação (Resende, 1982 e UFV, 1984), proveniente da alteração da estrutura do solo pela alternância de ciclos de umedecimento e secagem, são as que mais ganham destaque na explicação da gênese dos horizontes coesos.

O presente trabalho tem o objetivo de caracterizar micromorfológicamente solos com horizontes coesos por meio de Tomografia Computadorizada de Raios-X (TCX), a fim de avaliar o uso de tal ferramenta como complemento no estudo de Solos Coesos dos Tabuleiros Costeiros Nordestinos.

Adicionalmente será avaliada a influência do uso agrícola desses solos sobre por meio dos resultados obtidos das análises tomográficas.

1.2 REFERENCIAL TEÓRICO

1.2.1 Tomografia computadorizada por Raios-X

Tomografia é a denominação dada ao ato de se iluminar um objeto com um feixe de radiação e capturar os dados resultantes para reconstruir o objeto através de cortes iluminados. Estes dados são uma média de alguns parâmetros inerentes do caminho do raio de propagação resultando em imagens que podem ser usadas para gerar um modelo do objeto em questão. Através desse modelo do objeto em três dimensões é possível observar, depois da reconstrução das imagens, as características físicas dos objetos escaneados (Cruvinel e Balogun, 2007).

Entre as vantagens da tomografia computadorizada estão o fato de esse procedimento permitir análises não destrutivas das amostras de solo e a ausência da necessidade de qualquer espécie de processamento das amostras. Outras técnicas tradicionalmente usadas, tais como a análise micromorfológica e porosimetria de mercúrio, não possibilitam medidas do

sistema poroso do solo em uma mesma amostra por serem metodologias destrutivas. A tomografia computadorizada também permite a obtenção de imagens em um tempo relativamente curto, mesmo em sistemas de primeira geração (horas), quando comparada com a micromorfologia que levam semanas ou meses (Pires e Bacchi, 2010).

Segundo Ketcham e Carlson (2001), os escâneres tomográficos podem ser agrupados em quatro categorias, com base em sua resolução espacial e o tamanho dos objetos que são mais adequados para a digitalização: 1) convencional (escala de observação de metros, escala de resolução de milímetros), 2) alta resolução (escala de observação de decímetros, escala de resolução de 100 micrometros), 3) ultra-alta resolução (escala de observação de centímetros, escala de resolução de 10 micrometros) e 4) microtomografia (escala de observação de milímetros, escala de resolução de micrometros).

Outra diferença fundamental está na configuração dos aparelhos: enquanto alguns tomógrafos trabalha com emissão de raios-x, outros trabalham com emissão de raios gama. De maneira simplificada isso implicará nos diferentes tipos de resolução obtido, pois o de raios gama permite uma resolução espectral muito elevada (diferenciação clara do material pela densidade) em detrimento da resolução espacial; já os de raios-x possibilita uma resolução espacial muito mais apurada (visualização com maior nível de detalhes da amostra independente do tamanho), porém com uma resolução espectral muito menor, que limita a maior diferenciação dos materiais baseado apenas nas densidades.

Na caracterização das fases sólidas do solo (composição, distribuição e orientação), desde que respeitadas as limitações quanto aos níveis de energia utilizados bem como a resolução de imagem requerida, é possível a obtenção de informações quantitativas e qualitativas (Taina et al., 2008).

Conforme Heck (2009), muitos estudos em amostras indeformadas e deformadas têm sido realizados com a utilização da tomografia computadorizada. Os trabalhos mais comuns incluem: porosidade (Anderson et al, 1990; Peyton et al, 1992; Rachman et al, 2005), diâmetro de poro (Anderson et al, 1990, Peyton et al, 1992), o perímetro e a área da amostra (Grevers et al, 1989, Adderley et al, 2001), diâmetro cilíndrico equivalente e circularidade

(Gantzer e Anderson, 2002;. Rachman et al, 2005), tortuosidade, raio hidráulico em três dimensões (área de volume / parede do poro), a densidade numérica das redes e conectividade (Perret et al., 1999) e distribuição de tamanho de macroporos, comprimento, grau de ramificação e desvio médio vertical (Pierret et al. 2002). O autor ainda destaca que a mensuração das características estruturais do solo dependerá em grande parte da resolução espacial do equipamento, porém a direção de escaneamento (vertical ou horizontal) e características físicas da amostra (densidade, volume de água e ar), face e posição também influenciam.

Rogasik et al. (2003) utilizaram a TCX para avaliar visualmente a organização estrutural de amostras indeformadas de solos argilosos e siltosos, visualizar em macroporos preenchidos por ar em três dimensões e relacionar a densidade do solo com o desvio padrão dos valores da Unidade Hounsfield (unidade tomográfica).

No Brasil, Fante Junior et al (2002) avaliaram a densidade de um solo do semiárido por meio da tomografia e compararam os resultados com o método convencional do torrão parafinado. Os autores concluíram que os resultados eram razoavelmente concordantes, com maior sensibilidade e resolução espacial para o método da tomografia computadorizada, que permitiu maior detalhamento do comportamento da estrutura e da densidade do solo ao longo de seu perfil.

Pedrotti et al. (2003) utilizaram a tomografia computadorizada aplicada no estudo de um Planossolo do Rio Grande do Sul, para avaliar a densidade e a umidade do solo concluindo que a técnica permitiu a determinação dos valores médios de parâmetros físicos do solo em volumes reduzidos. A técnica ainda permitiu a identificação e localização exata da ocorrência de heterogeneidades (gradiente de densidade ou de umidade), além de apresentar confiabilidade para estudo de parâmetros físicos nos horizontes A e B de Planossolos, pela boa precisão e adaptabilidade proporcionada pelo equipamento.

A maior contribuição do TCX nos estudos de solo reside na caracterização quantitativa da porosidade e da rede de poros. O exame da

porosidade do solo é facilitado pelo forte contraste na atenuação de raios-x entre os vazios e a fase sólida do solo.

Lou e Halleck (2008), por meio da TCX, quantificaram a porosidade do solo e o fluxo preferencial em solos intactos, manejados por plantio direto rotacionado desde 1995. No mesmo ano Sander et al. (2008), publicaram trabalho avaliando a estrutura de dois perfis de solo cultivados com arroz na China.

Mais recentemente, Pires e Bacchi (2010) avaliaram em escala milimétrica, a modificação da densidade e da porosidade de amostras deformadas de solo submetidas a ciclos de umedecimento e secamento (U-S), por meio da tomografia computadorizada. A técnica possibilitou acompanhar variações na estrutura de amostras deformadas de solos, após serem submetidas a tais ciclos, indicando que as maiores alterações da estrutura do solo de amostras deformadas ocorrem após o primeiro ciclo, sendo que os demais subsequentes apresentam pequeno efeito sobre as variáveis avaliadas.

Munkholm et al (2012) avaliaram características da porosidade do solo relacionando-as correlacionando com a friabilidade do solo utilizando a TCX. Os autores encontraram uma significativa correlação entre tais características.

Contudo, por causa da variabilidade nas características dos tomógrafos utilizados, Taina et al. (2008) concluíram que o grande leque de padronizações e metodologias utilizado nos trabalhos impede a comparação de resultados entre tais.

Pires et al. (2010), destaca que devido ao elevado custo do equipamento, os principais grupos de pesquisa que trabalham com TCX no Brasil encontram-se na região Sul e Sudeste do país, contudo havendo outros grupos trabalhando de forma pontual e isolada. Por causa custo e disponibilidade de aparelhos, recomenda-se o envio de amostras para laboratórios que já possuam o equipamento para processar as análises.

A variação de tamanho de voxel adotada (de 10 a 100 μm) permite um refinamento do trabalho, todavia pode limitar a distinção entre grãos de areia e silte, ou ocultar detalhes da fração argila fina durante o tratamento das imagens (Taina et al., 2008).

É importante ressaltar que quanto maior a resolução espacial da imagem, maior será a necessidade de espaço de armazenamento e capacidade de processamento. Dessa forma acrescenta-se outro fator limitante, porém que não desmerece tal ferramenta, que é a necessidade de utilizar discos rígidos com grande capacidade de armazenamento de dados (maiores que 250 Gigabytes) assim como computadores providos de processadores de alto desempenho para o processamento das imagens geradas (pelo menos daqueles que estejam dedicados ao instrumento).

Até a presente data há poucos trabalhos que estudam a composição mineral com uso de tomografia e não foram encontradas publicações que correlacionem classes de solos, atributos mineralógicos do solo e a atenuação de raios-x obtidas por análises tomográficas (Taina et al, 2008)

1.2.1.1 Semivariogramas no estudo de imagens tomográficas

O variograma ou semivariograma é uma ferramenta básica da geoestatística que descreve a continuidade espacial dos dados que definem variáveis regionalizadas no espaço (Vicente, 2004).

O semivariograma experimental possui alguns atributos como: Efeito pepita (C_0), Alcance (a) e Patamar (C), demonstrados na Figura 1A. É importante lembrar que esses atributos caracterizam certos aspectos da dependência espacial do correspondente processo. O Alcance (a) é a distância dentro da qual as observações apresentam-se correlacionadas espacialmente; o Patamar (C) é o valor do semivariograma correspondente a seu alcance (a) e; Efeito Pepita (C_0), na prática, à medida que h tende para 0 (zero), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras (Camargo, 1998).

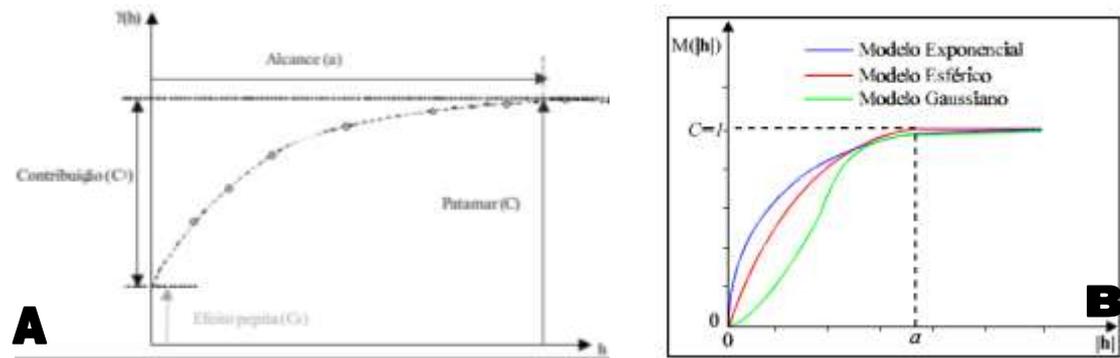


Figura 1– A: Exemplo de semivariograma experimental Fonte: Vicente, 2004; **B:** representação gráfica de modelos transitivos normalizados. Fonte: Camargo, 1998.

Na geoestatística, modelos teóricos paramétricos (Figura 1B) são utilizados para ajustar dados são classificados como, conforme Isaaks e Srivastava (1989), modelos com patamar ou transitivos (ex: esférico, exponencial, gaussiano, etc) e modelos sem patamar (linear e potencial). No caso do exponencial, é um modelo bastante utilizado, onde atinge o patamar assintoticamente, com o alcance prático definido como a distância na qual o valor do modelo é 95% do patamar (Camargo et al. 2001; Camargo, 1998).

Como forma de interpretação visual dos semivariogramas, utilizam-se os termos isotropia e anisotropia. Segundo Rossini e Lima (2012), uma variável regionalizada é isotrópica quando o padrão de continuidade espacial é idêntico em todas as direções. A isotropia é de suma importância para a estimação em locais não amostrados. Todavia, quando o fenômeno em estudo revela diferentes padrões de dependência espacial, ou seja, apresenta uma variabilidade que não é a mesma em todas as direções, é chamado de anisotrópico.

Para lidar com a anisotropia, é importante que o modelo proposto represente bem a variabilidade espacial da propriedade em estudo; modelos mais adequados para este objetivo vêm sendo propostos e a geoestatística engloba esses modelos, cuja base conceitual está fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas e nas funções aleatórias Camargo et al. (2001).

Os principais tipos de anisotropia estudados na geoestatística são: geométrica, zonal e combinada. A anisotropia geométrica é aquela em que existe uma direção com maior continuidade espacial, isto é, maior valor de alcance no semivariograma empírico; a anisotropia zonal ocorre quando existe

uma direção com maior valor de patamar nos semivariogramas empíricos em relação às demais direções; e a anisotropia combinada, quando houver determinadas direções com diferentes valores de alcance e patamar nos semivariogramas empíricos (Rossini e Lima, 2012).

Rasiah e Aylmore (1998) comentam que os semivariogramas são usados na análise de imagens de forma teórica para regionalizar variáveis de interesse a fim de explicar suas variações espaciais. Por meio deles é possível fazer o estudo da estrutura espacial da amostra, pela observação do comportamento nos três eixos analisados (X, Y – eixos horizontais correspondentes a largura e espessura das amostras; Z – eixo vertical do solo), associando a tendência das curvas no gráfico às variações quanto a composição e organização do material.

A estrutura do solo é considerada um parâmetro importante para descrever a qualidade do solo, o que afeta não apenas de funcionalidade, fluxo e retenção água (por exemplo), mas também influencia na interação solo/planta (Sander et al 2008).

Essa estrutura representa o arranjo das partículas primárias e vazios (poros) de tamanhos e formas diferentes assim como o arranjo dos agregados de solo e a porosidade associada (Bullock et al. 1985).

Estudos empregando análise de semivariância sugerem que variogramas podem fornecer informações valiosas sobre a distribuição e orientação dos poros do solo (Cislerová e Votrubová, 2002; De Gryze et al 2006).

Cislerová e Votrubová (2002) ainda destacam que a heterogeneidade do solo é traduzida pela elevada variação, juntamente com uma dependência espacial relativamente mais pronunciada devido à combinação de regiões mais densas de pedras ou agregados com as partículas de argila e de regiões mais porosas quando observados os semivariogramas das imagens.

1.2.1.2 Atenuação de Raios-X e Variabilidade da Atenuação de Raios-X

Nos últimos anos, a TCX foi adaptada para a quantificação da estrutura do solo em 3D, sendo que variações na composição são refletidos pela

capacidade diferenciada de atenuação dos materiais (Gantzer e Anderson 2002; Pierret et al. 2002; Mees et al. 2003; Rogasik et al. 2003; Ketcham, 2005; Rachman et al. 2005; Elliot e Heck 2007; Taina et al. 2008)

Tauhata et al. (2003), explicam que atenuação da energia das radiações ocorre de maneira exponencial em função da espessura do material absorvedor. Isso significa que quanto mais espesso o material, menor será a energia da radiação que deixa o material depois de atravessá-lo, caso isso ocorra.

Dessa forma a atenuação refere-se a capacidade da matéria de absorver ou desviar os raios-X quando estes interagem com ela. Em outras palavras, quando um feixe de raios X atravessa a matéria, sua intensidade é reduzida (atenuada). Isto resulta na perda de fótons individuais, devido às interações. A redução de intensidade do feixe é previsível, visto que depende das características físicas do feixe e do objeto. Assim, uma TC indica a quantidade de radiação absorvida por cada parte do corpo analisada (radiodensidade), e traduz essas variações numa escala de cinza, produzindo uma imagem.

Em estudos geológicos, Ketcham e Carlson (2001) demonstraram que TCX representam mapas da variação espacial das atenuações lineares de raios-X dentro da amostra. Carlson et al. (1999) mostram que por meio dessas atenuações, permite-se a diferenciação entre minerais de densidades similares mas com diferentes composições como o quartzo e o ortoclásio.

A atenuação de raios-X como reflexo da densidade tem sua variação por meio da função “Plot Z-axis Profile” do programa ImageJ®, que faz a análise estatística dos dados obtidos a partir de um conjunto de imagens pré-selecionadas, fatias por fatia, gerando indicadores numéricos diversos, como desvio padrão da média dentro desse conjunto (fatias) que corresponderá a variabilidade da atenuação de raios-X (Taina et al, 2013).

A atenuação, expressa em valores de unidade de Hounsfield (HU), correlaciona a composição das fases sólida, da água e do ar, permitindo a determinação das propriedades físicas do solo com a diferenciação dos componentes (Schrader et al., 2007). Para estimativa em 3D da distribuição da densidade do solo, a atenuação de raios-X requer ainda informações quanto ao

conteúdo de água e densidade das partículas sólidas em uma escala representativa comum e/ou os valores das atenuações específicas desses componentes - água e ar (Rogasik et al., 2003).

Em relação a atenuação média de raios-X na matriz do solo tais resultados referem-se mais fortemente à composição da parte sólida do mesmo e mínima porção de poros muito pequenos entre partículas que ocupam mais de um voxel utilizado como padrão de tamanho, tendo em vista que as imagens foram segmentadas de forma a separar os sólidos (non-voids - aquelas não classificadas como poros) dos poros ou vazios de tamanho maior do que um voxel padrão (voids).

A escala de cinza da imagem é formada por um grande espectro de representações de tonalidades entre branco, cinza e o preto, sendo responsável pelo brilho na imagem. Uma escala de cinzas foi criada especialmente para a tomografia computadorizada e sua unidade foi chamada de unidade Hounsfield (HU), em homenagem ao cientista que desenvolveu a tomografia computadorizada, correspondendo ao coeficiente de atenuação de raios-X em diversos tipos de materiais com relação à água. Assim, forma-se uma escala que correlaciona esses coeficientes com as densidades. A escala varia de -1000 para o ar, "0" para a água até +1000 para ossos (Bushong, 2010).

Usualmente, a atenuação causada pelo ar contido no solo é insignificante quando comparada com a provocada pelas partículas e água do solo. Dessa forma, diferenças entre os valores de HU associados aos pontos que compõem a imagem de seção transversal do solo correspondem a variações da atenuação da radiação pelo solo e água (Pires e Bacchi, 2010).

Graças a essa diferença de atenuação tem-se a possibilidade de avaliar a amostra como um todo, considerando as três fases: sólida, líquida e do gasosa por meio do que chamamos atenuação total de raios-x e da sua variabilidade da atenuação (desvios padrões dos valores médios da atenuação total de raios-X). Por outro lado, pelo processo de segmentação da imagem é possível excluir da imagem o que é considerado como vazios (poros), possibilitando a avaliação apenas da parte sólida, tendo assim, a atenuação de raios-X da matriz dos sólidos e sua variabilidade.

Em relação a atenuação média de raios-X na matriz do solo tais resultados referem-se mais fortemente à composição da parte sólida do mesmo e mínima porção de poros muito pequenos entre partículas que ocupam mais de um voxel utilizado como padrão de tamanho, tendo em vista que as imagens foram segmentadas de forma a separar os sólidos (non-voids - aquelas não classificadas como poros) dos poros ou vazios de tamanho maior do que um voxel padrão (voids).

Em relação a variação de níveis de energia de raios-X empregados nas mais diversas pesquisas, ainda não existe uma guia ou padrão estabelecido para a obtenção de imagens (Elliot e Heck, 2007).

1.2.1.3 Porosidade Detectável da Imagem

A porosidade do solo pode ser definida como a parte do volume do solo não ocupado pela "matriz" (componentes orgânicos e inorgânicos) e é determinada pelo arranjo ou geometria das partículas do solo (Kiehl, 1979).

Nos últimos anos a TCX, enquanto uma análise qualitativa tem sido adaptada para a quantificação da estrutura do solo, baseada nas variações da composição dos mesmos, refletidas pelo diferencial na atenuação. Assim o método fornece informações sobre a distribuição espacial dos componentes (sólidos e vazios ou poros) e sua variabilidade dentro da amostra de solo sob investigação (Tainá et al, 2013).

A TCX fornece informações morfológicas sobre poros interligados e isolados, forma de distribuição espacial deles e conectividade, medições de porosidade (Farber et al., 2003; Van Geet et al., 2003).

Pires e Bacchi (2010) explicam que, em razão da resolução milimétrica do TCX, cada valor de ρ_s (densidade) e ϕ (porosidade) representa pequenas porções de área de 0,004 x 0,004 cm da amostra de solo. Por esse motivo, opta-se por chamar ϕ de porosidade da imagem (no nosso caso porosidade detectável), pois a resolução do método, neste caso em particular, dificulta o dimensionamento de poros muito pequenos.

A caracterização quantitativa de porosidade e as redes de poros é facilitada pela forte contraste na atenuação de raios-X de vazio e fases sólidas, por outro lado a análise de elementos estruturais sólidos individuais é mais complicada pela variação no nível de energia utilizável (Tainá et al. de 2008).

A maneira como a análise da imagem 3D é executada pode levar a várias interpretações da heterogeneidade da amostra de solo, dependendo crucialmente as características físicas do solo sob estudo. Para os solos com o amplo espectro de diâmetros de grãos que formam poros aleatoriamente heterogêneos, as imagens também são heterogêneas, exigindo atenção para representar e distinguir os domínios da porosidade (Torrance et al. 2008).

Para quantificação da porosidade detectável da imagem é necessário realizar a segmentação e binarização da imagem, de forma que seja possível separar a parte sólida e os vazios (aqui considerados como poros) baseados nas diferenças de atenuação já comentadas anteriormente. A função “Analyze Particles” do programa ImageJ® que conta e mede objetos em imagens binárias, fornecendo dados quantitativos do tamanho, forma e orientação dos poros (vazios) em cada fatia (Dowuona et al, 2009;. Taina et al, 2010)

A segmentação é o primeiro tratamento aplicado às imagens de TCX antes da caracterização física. Consiste na extração dos poros numa escala correspondente à resolução de imagem. Este passo é essencial por causa da natureza da imagem tomográfica e a sensibilidade das técnicas de segmentação da imagem. É possível reduzir ou aumentar o espaço poroso e descaracterizar ou criar uma ligação entre eles. As propriedades da imagem segmentada resultante podem variar muito com pequenas alterações nos parâmetros de segmentação (Taud et al., 2005).

É importante salientar que o princípio da TCX dependente dos parâmetros instrumentais que influenciam a resolução espacial, espectral e radiométrica dos dados, bem como sobre a interpretação e os parâmetros utilizados durante as fases de processamento específico. Deste modo, os espaços vazios (poros) e não-vazios (sólidos) da imagem segmentada pode ser considerado como representações normalizadas da amostra de solo. Vazios menores do que o tamanho de voxel da imagem final não serão

representados de forma clara, às vezes não sendo incluídos nos valores da porosidade total da resolúvel/segmentada (Dowuona et al, 2009).

1.2.2 Horizontes coesos: definição e caracterização

O caráter coeso é típico dos Latossolos Amarelos, Argissolos Amarelos bem como nos Argissolos Acinzentados desenvolvidos a partir de sedimentos da Formação Barreiras na região dos Tabuleiros Costeiros. Nos solos com B textural este adensamento atinge normalmente profundidades maiores. Em solos cultivados, a coesão se prolonga para os horizontes A e AB, como consequência do processo de compactação (Ribeiro, 2001a).

Em outros países de clima tropical, especialmente na Austrália, o termo “hardsetting” há muito tempo já foi incorporado aos sistemas de classificação de solos como atributo que define diferenças em termos de consistência. Os horizontes ou camadas apresentam a característica de grande mudança de consistência e densidade com a variação da umidade (Northcote et al., 1975, Harper e Gilkes, 1994; Franzmeier et al., 1996; Mullins, 1999).

Os horizontes coesos e “hardsetting” apresentam características físicas e morfológicas similares, entretanto, o termo australiano inclui horizontes compactados pelo uso agrícola bem como os resultantes de processos pedogenéticos, além de solos com problemas de sodicidade (Mullins, 1999; Greene, 2001; Giarola et al. 2002).

O sistema brasileiro de classificação de solos (Embrapa, 2006) considera que o caráter coeso tem natureza pedogenética, não sendo relacionado a qualquer outro fator como o manejo ou a sodicidade. Todavia diversos autores têm ressaltado que o manejo é um fator que tem acentuado o adensamento do solo (Lima Neto, 2008).

Barros et al. (1958), constataram pela primeira vez a presença a coesão em solos de Tabuleiros Costeiros, na região de Campos, RJ, quando da realização do Levantamento de Solos do Estado, na época, já caracterizada por apresentar, quando secos, horizontes de consistência dura e resistentes à penetração do martelo pedológico, tornando-se friáveis a muito friáveis, quando úmidos.

A caracterização mais detalhada de solos com horizontes coesos iniciou-se com Oliveira et al. (1968) e Oliveira e Melo (1970). Nesses trabalhos, foram descritos horizontes com densidade do solo de $1,75 \text{ g cm}^{-3}$. Os autores concluíram que o adensamento estudado é uma consequência da migração de coloides minerais e orgânicos da camada superficial provocando a obstrução de parte dos macroporos dos horizontes subjacentes com consequente diminuição da permeabilidade e do espaço poroso do solo.

CHANCELLOR et al. (1971), constataram que há uma relação linear entre a coesão e o peso específico aparente do solo (densidade global; hoje densidade do solo).

Vários foram os trabalhos direcionados ao estudo da gênese dos horizontes coesos de Latossolos e Argissolos Amarelos no Brasil como Achá-Panoso, 1976; UFV, 1984; Anjos, 1985; Fonseca, 1986; Meireles & Ribeiro, 1995; Ribeiro, 1998; Moreau, 2001. Entretanto, entre os resultados encontrados, muitos se mostram contraditórios e poucos conclusivos. Além disso, muitos foram realizados com horizontes coesos não típicos, tendo, como consequência, a geração de dados não representativos. Isso vale tanto no que se refere à gênese desses solos, como também na aplicação direta do conhecimento adquirido no direcionamento de práticas de preparo do solo, particularmente aquelas relacionadas à profundidade de subsolagem e necessidade de adaptação de equipamentos agrícolas para rompimento da camada coesa (ou parte dela) (Corrêa et al. 2008).

A gênese dos horizontes coesos está associada a vários processos, dentre os quais: à perda do plasma argiloso das camadas superficiais do solo para as camadas subjacentes, processo este denominado argiluviação; à presença de compostos orgânicos pouco polimerizados; à forte instabilidade estrutural; à presença de sílica secundária, ferro e argila dispersa nos microporos; e, ao adensamento por dessecação resultante da alteração da estrutura do solo pela alternância de ciclos de umedecimento e secagem (Ribeiro, 1986; Ponte e Ribeiro, 1990).

Achá-Panoso (1976) destaca que a espessura das camadas endurecidas observadas em Latossolos Amarelos dos Tabuleiros Costeiros do Espírito Santo variam de poucos centímetros até cerca de 2 metros e que sua

ocorrência deve-se ao entulhamento de partículas (argilas) oriundas dos horizontes superiores, as quais preencheriam poros (macro e micro), aumentando a densidade do solo tornando a camada muito coesa e compacta. Destaca, ainda, que os menores teores de ferro normalmente observados na camada endurecida poderiam contribuir para uma maior coesão.

Silva (1996) estudou Latossolos Amarelos na região dos Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas, visando determinar os efeitos do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em algumas propriedades físicas do solo. Ele constatou a formação inicial de uma camada compactada nos horizontes Ap e AB e um adensamento pedogenético natural no horizonte BA, acelerado pelo cultivo contínuo da cana-de-açúcar, como consequência do preenchimento dos poros com argila iluvial.

Araújo Filho et al. (2001) também associaram a coesão dos solos a causas múltiplas e inter-relacionadas. Um delas seria a presença de sílica e outros aluminossilicatos, que poderiam atuar como agentes cimentantes temporários, no período de secamento do solo. Neste período ocorreria a polimerização e precipitação da sílica e dos outros constituintes sílico-aluminosos amorfos, e a máxima expressão da coesão. No período úmido, por outro lado, a despolimerização daqueles elementos seria responsável pela condição de friabilidade do material. A grande rigidez que os horizontes coesos atingem na época seca também poderia estar relacionada à força de adesão das ligações covalentes estabelecidas entre os elementos cimentantes e as superfícies dos minerais (grupos Si-OH, Al-OH). Outro fator considerado seria o adensamento natural do material que constitui os horizontes coesos, originado do acúmulo de materiais finos e do arranjo das partículas, que incrementaria a porosidade fina, restringiria a permeabilidade e favoreceria a precipitação dos agentes cimentantes temporários.

Corrêa et al. (2008), a partir da hipótese proposta por Achá-Panoso (1976), onde a gênese dos horizontes coesos ocorreria por meio de iluviação de argilas, sem qualquer menção ao fracionamento da argila; estudaram mais detalhadamente a distribuição granulométrica da fração mais fina. Nesse sentido, os resultados obtidos sugerem que sua formação se deve à iluviação de argila muito fina ($<0,2 \mu\text{m}$) e posterior entupimento da porosidade.

Lima Neto et al (2010), concluíram que não foi observada nenhuma tendência de aumento dos teores de sílica e alumínio, extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato e oxalato nos horizontes coesos, sugerindo que sua gênese não se deve à presença de agentes cimentantes.

1.2.3 Métodos destrutivos e não-destrutivos para avaliação do caráter coeso

No estudo de solos que apresentam horizontes coesos, diversas técnicas e ferramentas vêm sendo utilizadas. Algumas dessas técnicas são baseadas no uso de amostras onde não há alteração da estrutura do solo, por isso são classificadas como métodos não-destrutivos; enquanto em outras a estrutura do solo é alterada para serem feitas as análises, então são classificadas como métodos destrutivos.

A caracterização dos horizontes coesos dos solos de tabuleiros tem sido baseada nas propriedades físicas, como densidade do solo, porosidade e resistência à penetração (Giarola et al., 2001; Lima et al., 2004). Como subsídio para o entendimento com mais detalhes da pedogênese de solos com caráter coeso diversos trabalhos utilizaram técnicas micromorfológicas (Melo e Santos, 1996; Duarte et al., 2000; Santos et al., 2002; Corrêa et al, 2008; Lima Neto et al, 2010), bem como, avaliaram as possíveis modificações nas propriedades físicas em solos submetidos a cultivos intensos (Silva et al., 1998).

Como avanço na ciência do solo, a tomografia computadorizada de raios-X (TCX) também possibilita trabalhar amostras indeformadas fornecendo subsídios para análise da concentração e a distribuição espacial dos componentes do solo (Elliot e Heck, 2007; Taina et al, 2008; Pires et al, 2010).

1.2.3.1 Micromorfologia de solos

A técnica destina-se ao estudo das organizações microscópicas, também chamadas de micrororganizações pedológicas, ou microestruturas, isto é, trabalha com constituintes e organizações na ordem de medida dos

milímetros e, sobretudo, dos micrômetros. Ela contempla o estudo detalhado dos constituintes dos agregados dos horizontes de solo e de suas relações, seu grau de preservação face às adições ou perdas, contribuindo para importantes deduções a respeito dos processos pedológicos envolvidos, sejam eles naturais ou induzidos pelo uso e/ou manejo (Castro, 2008).

Para tanto, a amostra indeformada (intacta) de solo é coletada por meio do entalhe no horizonte desejado utilizando uma caixa de Kubiena (normalmente confeccionada em chapa de ferro galvanizado com duas tampas) com o auxílio de uma faca. A dimensão mais comum destas caixas é de 7,5 x 6,5 x 4 cm; sendo necessárias dimensões maiores (16 x 12,5 x 6 cm) para estudos de porosidade. No laboratório, a amostra é colocada para secar por alguns dias ao ar, posteriormente em estufa com circulação forçada de ar a 35°C e, assim, impregnada com resina de poliéster em câmara de vácuo (Jongerius e Heintzberger, 1963; Castro et al. 2003).

Os cortes dos blocos são feitos após a total cura (polimerização ou endurecimento) das resinas. O material pedológico é laminado até atingir de 25 a 30µm de espessura e colado em lâminas de vidro (com ou sem lamínula), similares às lâminas petrográficas (Filizola e Gomes, 2006).

Os materiais assim preparados são observados com o auxílio de lupas e microscópios ópticos polarizadores do tipo usado em Petrografia, ambos preferencialmente binoculares, onde as feições micropedológicas são analisadas em microscópico conforme alguns autores como Bullock et al. (1985) e Fitzpatrick (1993). Podem ainda ser submetidos à microscopia eletrônica e microanálise após tratamentos adequados, desde que as lâminas não estejam recobertas por lamínulas, ou que estas possam ser facilmente removidas (Castro et al. 2003).

Como principal vantagem as técnicas micromorfológicas fornecem informações importantes para estudos agronômicos e de microfauna, nos quais a avaliação da dinâmica da estrutura do solo em diferentes escalas (das interações entre as partículas até o perfil macromorfológico) é indispensável.

Dificuldades de amostragem, transporte, impregnação e preparo das amostras, tempo longo e técnicos especializados para execução do processo, bem como fatores indesejáveis ocasionais, como incompatibilidades de certos

tipos de solo com os materiais impregnantes, laboratórios especializados com equipamentos caros e exigentes em manutenção, estão entre as principais razões da pouca utilização desta técnica. Outro fator que tem sido apontado como limitante da utilização da micromorfologia do solo é a falta de uma terminologia e de uma sistemática descritiva consensual. É comum encontrar em um mesmo trabalho publicado mais de uma terminologia e sistemática descritiva (Castro, 2008).

Apesar do crescente interesse que tem despertado na comunidade científica, muitos aspectos envolvendo a origem, evolução e influência agrícola dos solos coesos no Brasil, ainda permanecem incertos.

Neste contexto a micromorfologia de lâminas delgadas torna-se extremamente necessária para elucidar os problemas relativos aos solos coesos, pois apesar dos aspectos qualitativos, onde procura explorar a associação entre estrutura, porosidade e contextura do solo, há também seus aspectos quantitativos, o qual procura calcular o espaço poroso por meio da análise de imagens. Em outros países a análise de imagens vem sendo desenvolvida e aperfeiçoada por diversos micromorfologistas há anos, os quais utilizam esta técnica para: quantificar a estrutura do espaço poroso; a distribuição dos poros; caracterizar a irregularidade, orientação, forma e tamanho dos poros, através do uso de lâminas delgadas ou blocos de solo (Lima, 2004).

Melo e Santos (1996) mostraram que solos pertencentes aos Tabuleiros Costeiros e com taxonomia diferente, foram derivados do mesmo material de origem, e que a sua diferenciação, imposta pelo relevo, sugere a seguinte sequência evolutiva: no início, foram formados os Latossolos, transitando depois por translocação de argila, para os Argissolos latossólicos e estes, por acentuadas perdas de argila e cimentação, para os Argissolos. Feições de iluviação em horizontes coesos foram descritas pelos autores em Argissolos Amarelos dos Tabuleiros Costeiros de Pernambuco. Eles ainda descrevem argilãs nos horizontes Bt1, Bt2 e partes do Bt/Bw e atribuem forte coesão de partes esbranquiçadas dos perfis ao acúmulo de argila iluvial, que preenche a porosidade.

Silva et al. (1998), em estudo sobre os Latossolos Amarelos dos Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas, afirmam que esta pedofeição indica um empobrecimento de argila dos horizontes superficiais e possível formação de um horizonte B textural com o tempo, como consequência dessa iluviação de argila acelerada pelo cultivo (arenização superficial). Ainda enfatizaram que o adensamento natural observado no horizonte coeso, pode ser acelerado sob condições de cultivo, pelo preenchimento dos poros com argila iluvial.

Corrêa et al. (2008) conclui, a partir das análises micromorfológicas que as feições de deposição de argila (cútans) descritas nos horizontes coesos corroboram os dados físicos de argiluviação de argilas finas e muito finas dos horizontes superficiais, com posterior preenchimento de poros nos horizontes subsequentes (BA e, ou, Bt1). Os resultados demonstram que a coesão é consequência de um processo físico, descartando-se, assim, a hipótese de cimentação branda por géis de Si, proposta por Meireles e Ribeiro (1995).

Lima Neto et al. 2010 estudando a micromorfologia de solos coesos, descrevem que o material grosseiro é constituído por quartzo, com grãos subarredondados, mal selecionados em tamanho. Há predominância de material grosso nos horizontes mais superficiais, que se inverte nos horizontes subsuperficiais, onde ocorre maior proporção de materiais finos. As observações microscópicas das lâminas delgadas revelaram redução na macroporosidade dos horizontes coesos e diferenciações na geometria do espaço poroso. Os horizontes coesos apresentaram menor macroporosidade do que os não coesos, confirmando as determinações físicas.

Apenas alguns trabalhos realizados nas áreas dos Tabuleiros Costeiros (Giarola et al., 2003; Santos et al., 2002; Silva et al., 1998) utilizaram a análise de imagem para quantificação do espaço poroso total, os quais concluíram que o horizonte coeso apresenta uma redução do espaço poroso em relação a outros horizontes não coesos.

A micromorfologia permitiu o esclarecimento de parte dos questionamentos tanto quanto à gênese e manejo de solos com horizontes coesos e mesmo adensados (hardseting). A partir do refinamento das observações macromorfológicas, é a única técnica que permite observar os

componentes do solo no seu arranjo espacial natural, ou seja, como ocorre na natureza.

A visão pormenorizada permitiu perceber a iluviação de argilas em meio ao arranjo da estrutura dos horizontes coesos e comparar tal estrutura com horizontes não coesos, entre solos e no mesmo perfil de solo.

Conforme Viana et al., (2004), o uso de análise de imagens para estudos quantitativos e qualitativos de estrutura de solo tem-se tornado mais comum na literatura, como advento de equipamentos e programas mais acessíveis. Estas técnicas, associadas à micromorfologia, permitem o estudo quantitativo de modificações estruturais em amostras indeformadas, após seu preparo e sua montagem em lâminas.

Com o uso da análise de imagens em computador é possível medir a porosidade e a estrutura do solo bem como avaliar a evolução que está ocorrendo dentro do solo ao longo dos anos, a exemplo do que Silva et al. (1998) fizeram para avaliar solos de tabuleiros cultivados com cana-de-açúcar e submetidos a manejo diferenciado ao longo de anos. A avaliação do sistema de manejo por meio da micromorfologia forneceu bases quantitativas e qualitativas (a exemplo da porosidade) para medidas exatas de componentes normalmente estimados no campo.

1.2.3.2 Densidade do Solo, Porosidade e Resistência a Penetração

O uso de propriedades físicas para caracterizar horizontes coesos dos solos de Tabuleiros como: densidade do solo, porosidade e resistência à penetração constituem-se em ferramentas de fácil utilização.

Segundo Silveira et al. (2010), dentre as principais características dos solos coesos destacam-se a densidade do solo alta, baixa permeabilidade e elevada resistência à penetração quando secos. A resistência à penetração serve para descrever a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele. Ela está diretamente correlacionada com vários atributos e condição do solo, como textura, densidade, matéria orgânica e, principalmente, a umidade (θ) no momento da determinação bem como pode ser influenciada pela coesão.

A densidade média da camada coesa situa-se na faixa de 1,5 a 1,8 g m⁻³, enquanto nos horizontes superficiais, em condição natural, varia de 1,2 a 1,4 g m⁻³ (Jacomine, 2001). Entretanto, especialmente na zona canavieira, a densidade média dos horizontes superficiais é afetada pelo manejo do solo, elevando-se para uma faixa 1,3 a 1,8 g m⁻³ (Araújo Filho et al., 2001).

Ainda sobre as determinações físicas, Lima et al. (2005) ressaltam que o menor volume de poros do horizonte coeso mostrou efeito marcante sobre o aumento da resistência à penetração, durante o período seco, e sobre a densidade do solo. Em solos adensados, como é o caso dos horizontes coesos, os poros originalmente grandes estão comprimidos, refletindo na redução do volume total de poros e, provavelmente, na redução do volume de macroporos. A maior quantidade de microporos deve-se ao fato de eles ficarem posicionados dentro dos agregados, de forma a não serem atingidos pelos processos ocorridos no solo, somando-se aos outros microporos que foram criados quando ocorreu o adensamento, aumentando, dessa forma, o volume total de poros muito pequenos nos horizontes coesos (Cintra e Libardi, 1999).

A densidade do solo pode ser determinada com amostras indeformadas coletadas com anel volumétrico e a densidade das partículas é determinada por meio do balão volumétrico, utilizando álcool etílico. A porosidade total pode ser calculada a partir dos valores da densidade do solo e densidade de partículas; a microporosidade ($\phi < 50 \mu\text{m}$) é obtida a partir da umidade volumétrica na tensão de -6 kiloPascal, e a macroporosidade ($\phi \geq 50 \mu\text{m}$), pela diferença entre os valores da porosidade total e dos microporos (Embrapa, 1997).

A resistência à penetração pode ser determinada em campo por meio de penetrômetro de impacto, segundo método descrito por Stolf et al. (1983). Os resultados obtidos em impactos de dm^{-1} são convertidos em resistência dinâmica por meio de uma fórmula em que os resultados foram obtidos em kgf cm^{-2} e depois transformados em megaPascal (Mpa), após cada medida de resistência à penetração (RP) e nas mesmas profundidades, coletaram-se amostras deformadas de solo para determinação da umidade gravimétrica (Ug), conforme Embrapa (1997). Valores entre 2 e 2,5 MPa têm sido indicados

como os limites críticos de resistência à penetração para a maioria dos vegetais (Camargo e Alleoni, 1997).

O penetrômetro de cone, também denominado de penetrômetro dinâmico, é um equipamento largamente utilizado em aplicações agrícolas para detectar camadas compactadas de solo. Apresenta como vantagens, a facilidade e velocidade de uso, baixo custo e forte relação com as condições físicas do solo para o crescimento do sistema radicular das plantas, além da possibilidade de medidas diretas de campo com grande número de repetições. Sua desvantagem é a dependência de outros atributos do solo, a exemplo da umidade no momento da medida, textura, densidade do solo, estrutura, matéria orgânica, presença de cascalhos e calhaus, mineralogia da argila e sistemas de uso e manejo (Silveira et al., 2010).

Tais análises já são de conhecimento comum no meio científico e podem ser processadas de maneira simples e dinâmica. Apesar de não dar margem a grandes inferências é possível obter resultados precisos e que permitem dar continuidade a outros estudos quanto aos horizontes coesos.

1.2.4 Análises Estatísticas: Funções Discriminantes

A Análise Multivariada constitui-se no ramo da Estatística que objetiva o resumo, a representação e a interpretação de dados observados, a partir de populações onde cada unidade experimental envolve a mensuração de diversas variáveis. O interesse em medir um número expressivo de características em cada unidade experimental deve-se ao fato que, algumas vezes, isoladamente, as variáveis podem não conseguir caracterizar, de maneira adequada, o conteúdo biológico da parcela, ou ainda, em situações em que informações importantes sobre a estrutura de variabilidade dos dados não devem ser negligenciadas ou irrelevantes (Simeão e Padovani, 2008).

A análise discriminante é uma técnica da estatística multivariada utilizada para discriminar e classificar objetos. A técnica estuda a separação de objetos de uma população em duas ou mais classes. A discriminação ou separação é a primeira etapa, sendo a parte exploratória da análise e consiste

em se procurar características capazes de serem utilizadas para alocar objetos em diferentes grupos previamente definidos (Khattree e Naik, 2000).

As técnicas de classificação são largamente utilizadas na experimentação agrônômica e zootécnica tal é a diversidade de problemas que necessitam do estabelecimento de regras de separação entre espécies, identificação de grupos de caracteres que mais contribuem para esta separação e atribuição de novos indivíduos para populações existentes. Dentre as diversas técnicas de classificação, a análise discriminante é apontada como uma das mais adequadas e completas, sendo comprovada pelas recentes referências publicadas (Simeão, 2007)

Segundo Regazzi (2000) o problema da discriminação entre dois ou mais grupos, visando posterior classificação, foi inicialmente abordado por Fisher (1936). Consiste em obter funções matemáticas capazes de classificar um indivíduo X (uma observação X) em uma de várias populações π_i ($i=1, 2, \dots, g$), com base em medidas de um número p de características, buscando minimizar a probabilidade de má classificação, isto é, minimizar a probabilidade de classificar erroneamente um indivíduo em uma população π_i , quando realmente pertence a população π_j , ($i \neq j$) $i, j=1, 2, \dots, g$. Foi originalmente desenvolvida na Botânica e tratou da função discriminante proposta por Fisher em 1935 e publicada pela primeira vez em 1936 (FISHER, 1936). Sua aplicação teve como objetivo fazer a distinção de grupos de plantas com base no tamanho e tipo de folhas para que, posteriormente, fosse possível classificar as novas espécies encontradas.

Para a aplicação da análise discriminante é necessário que os grupos para os quais cada elemento amostral possa ser classificado sejam predefinidos, ou seja, conhecidos a priori, considerando-se todas as suas características observadas. Este conhecimento permite a elaboração de uma função matemática chamada de regra de classificação ou discriminação, utilizada para alocar novos elementos amostrais nos grupos já existentes. Portanto, o número de grupos já é conhecido previamente, mas a regra de classificação é elaborada utilizando-se procedimentos que, em geral, vão além do uso de distâncias matemáticas (REIS, 1997).

A função discriminante linear de Fisher é uma combinação linear de características originais a qual se caracteriza por produzir separação máxima entre duas populações.

Visando desenvolver e avaliar um método para discriminação das classes de solos, em uma área no sudoeste do Estado de São Paulo, a partir de suas respostas espectrais, Nanni et al. (2004) fizeram uso de equações discriminantes que foram desenvolvidas para 18 classes de estudo. Os resultados demonstraram que as classes de solos podem ser individualizadas e distinguidas pela análise discriminante, pois esta registrou índices de acerto acima de 80% de determinação da classe de solo avaliada. Sendo assim, concluiu-se, com o uso da análise discriminante, que o método sugerido auxilia na discriminação de classes de solos pela sua reflectância, devido às interações físicas com a energia eletromagnética.

A função discriminante quadrática caracteriza-se por não fazer restrições à igualdade entre matrizes de covariância, embora mostre uma vulnerabilidade maior do que a análise discriminante linear à violação da hipótese de não normalidade, razão pela qual ela raramente é utilizada em estudos aplicados (Oliveira, 2006).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Seleção, Coleta e Preparo das Amostras de Solos

Foram coletados três perfis de solos com expressiva manifestação do caráter coeso. Um perfil sob cultivo de cana-de-açúcar, o Argissolo Acinzentado Distrocoeso fragipânico (P1) e; dois perfis sob condição de mata: um Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2) e um Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3). A escolha dos perfis foi feita com base no trabalho de Lima Neto *et al.* (2009). Os solos foram coletados na zona do litoral e mata do Estado de Alagoas, na mesorregião do leste alagoano (Mendes Júnior, 2002), sendo a localização das coletas realizadas, conforme demonstrado na Figura 2. Na Usina Marituba, em Penedo (Perfil P1), na Usina Caeté, em São Miguel dos Campos (Perfil P2), e na Usina Coruripe, no município de Coruripe (Perfil P3)

A área de coleta dos solos apresenta clima tropical chuvoso com verão seco (As', segundo a classificação de Koppen). A precipitação pluvial média anual nos municípios onde os solos foram coletados fica em torno de 1.400 mm em Coruripe e 1.650 mm em Penedo e São Miguel dos Campos. A temperatura média anual da região está em torno de 25,5 °C. O relevo da região é predominantemente plano na superfície dos tabuleiros, que são entalhados por vales profundos. A vegetação primária da região era constituída pela floresta subperenifólia, formação dominante na zona úmida costeira do Estado, que cobria extensas áreas dos tabuleiros, bem como do cristalino, estando hoje resumida a pequenas áreas restritas a encostas e pequenas áreas de preservação nos topos dos tabuleiros (Lima Neto et al, 2009)

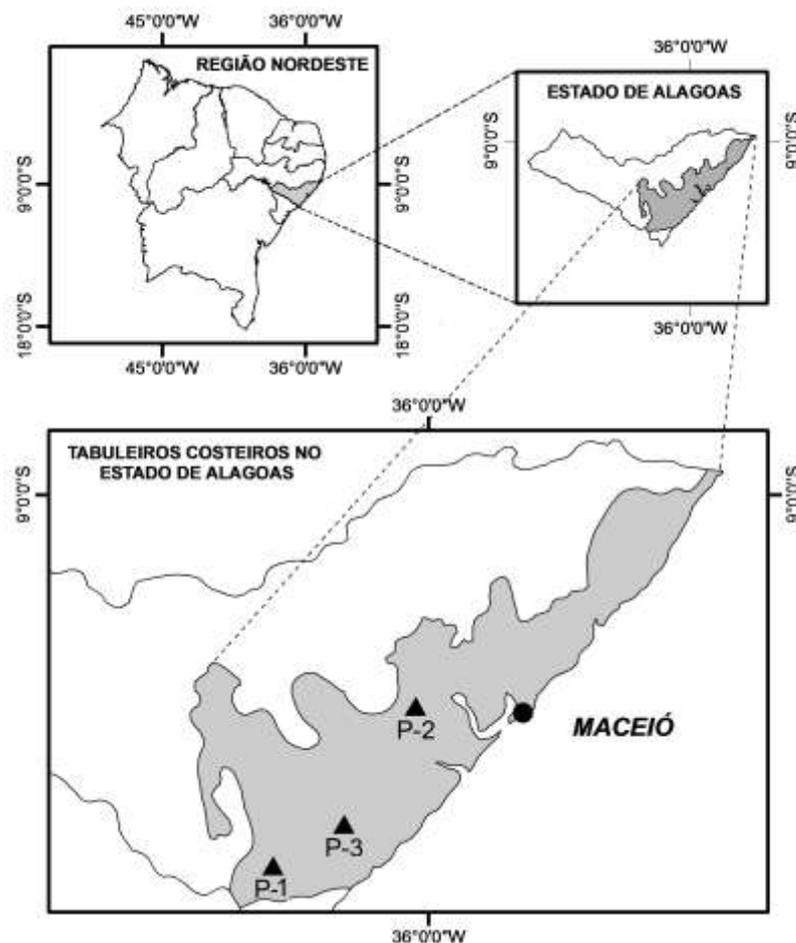


Figura 2 – Localização dos perfis de solos coesos estudados no Estado de Alagoas: P1, município de Penedo; P2, município de São Miguel dos Campos; e P3, no município de Coruripe (modificado de Lima Neto et al., 2010)

Foi coletado também um perfil de solo onde comprovadamente não há qualquer manifestação do caráter coeso, na região da Chapada do Araripe (Figura 3), município de Exu (Sertão de Pernambuco), classificado em campo como Latossolo Amarelo Distrófico típico (Perfil P4). Este perfil serviu como testemunha para comparação das diversas características químicas, físicas, mineralógicas e micromorfológicas.

Na Chapada do Araripe, o clima e o regime pluviométrico apresentam-se de forma diferenciada nos setores oriental e ocidental. O perfil estudado localiza-se na porção oriental, que segundo a classificação de Koppen, possui clima tropical chuvoso, onde a precipitação média anual é de 1370 mm (Mendonça et al, 2000). A vegetação primária é do tipo floresta tropical subperenefólia/cerrado ou subcaducifólia/cerrado (Cavalcanti e Lopes, 1994).

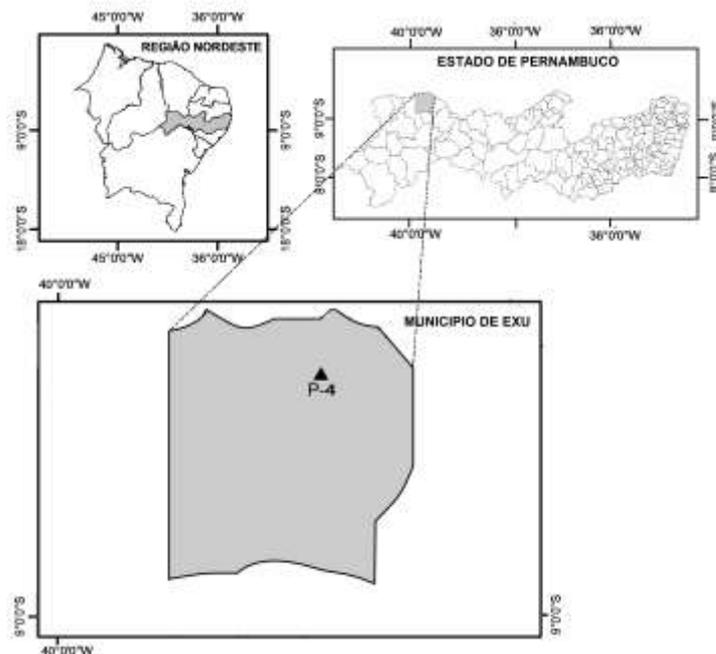


Figura 3 – Localização do perfil de solo não coeso estudado no Estado de Pernambuco: Latossolo Amarelo Distrófico típico (Perfil P4), no município de Exu (destacado em cor escura).

Todos os perfis foram descritos conforme Santos *et al.* (2005) e classificados de acordo com Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (EMBRAPA, 2006). Foram coletadas amostras deformadas de todos os horizontes e amostras indeformadas de horizontes selecionados dos perfis estudados.

As amostras deformadas coletadas foram enviadas para o galpão de

solos do Departamento de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Foram secas ao ar, pesadas, destorroadas e passadas em peneira com malha de 2 mm, para obtenção da TFSA (Terra Fina Seca ao Ar), seguindo posteriormente para os laboratórios, onde foram efetuadas as determinações analíticas.

2.2 Análises Físicas

As análises físicas foram realizadas no Laboratório de Física do Solo da UFRPE. Os métodos utilizados foram aqueles preconizados pela Embrapa (1997) e granulometria segundo recomendações discutidas por Ruiz (2005).

Foram determinados: composição granulométrica, com o uso do dispersante hexametáfosfato de sódio e a argila dispersa em água, pelo método da pipeta; a densidade do solo, pelo método do anel volumétrico; densidade das partículas, pelo método do balão volumétrico; relação silte/argila, pela razão entre os valores de argila total e do silte obtidos na análise granulométrica; e porosidade total, calculada por meio da relação entre as densidades do solo e das partículas.

As frações maiores que 2 mm, cascalhos (2 -20 mm) e calhaus (20 - 200 mm), foram colocadas em recipientes com água, com aproximadamente, 10 mL de NaOH 1 mol L⁻¹, e agitadas várias vezes durante o dia com o auxílio de um bastão, permanecendo por uma noite nesta solução. Em seguida foram lavadas abundantemente com água corrente, visando a remoção completa das frações menores que 2 mm, secas em estufa e pesadas para o cálculo das suas percentagens em relação ao peso total da respectiva amostra.

2.3 Análises Químicas

As análises químicas foram também realizadas de acordo Embrapa (1997, 1999), nos Laboratórios de Química e de Fertilidade do Solo da UFRPE.

Determinou-se o pH em água e KCl 1mol L⁻¹, na relação 1:2,5 de solo:solução. O teor de carbono orgânico foi determinado por meio da oxidação da matéria orgânica com dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) 0,4 mol L⁻¹ em meio sulfúrico com aquecimento em chapa e titulação com solução de sulfato ferroso

amoniacal $0,1 \text{ mol L}^{-1}$. O potássio e sódio trocáveis foram determinados por fotometria de chama, após extração com $\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1}$ e $\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,025 \text{ mol L}^{-1}$ (Mehlich-1), enquanto no extrato obtido de $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$, determinou-se o cálcio e magnésio por espectrofotometria de absorção atômica e o alumínio trocável por titulação com $\text{NaOH } 0,025 \text{ mol L}^{-1}$ em presença do indicador azul de bromotimol. A acidez potencial (Al + H) foi avaliada por extração com acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0.

2.4 Extração de ferro, alumínio e silício por Ditionito-Citrato-Bicarbonato (DCB) e Oxalato

As extrações e análises foram feitas apenas no perfil Latossolo Amarelo Distrófico típico (Perfil P4) nos horizontes A2, BA e Bw com a finalidade de dar subsídios para as discussões relacionadas à TCX tal como para as comparações com os perfis de solos coesos. No caso deste, são utilizados os resultados das análises mineralógicas e micromorfológicas publicados por Lima Neto et al. (2009; 2010).

As formas de ferro de melhor e pior cristalinidade foram avaliadas pelo método do ditionito-citrato-bicarbonato de sódio e do oxalato de amônio pH 3,0, respectivamente, a partir de amostras de TFSA (McKeague e Day, 1966). As determinações foram realizadas por colorimetria (Olson, 1965). Adicionalmente, o Al foi determinado em ambos os extratos por colorimetria.

Para a digestão transferiu-se uma alíquota de 5 mL do extrato de DCB ou oxalato para tubos de digestão de 75 mL. Adicionou-se 5 mL de HNO_3 concentrado e 1 mL de $\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 8 \text{ mol L}^{-1}$, seguido de aquecimento em bloco digestor até 120°C . A temperatura foi aumentada gradualmente até o surgimento de uma fumaça branca ($150 - 180^\circ\text{C}$). Após a digestão, esfriou-se a amostra para 50°C , adicionando aproximadamente 30 mL de H_2O destilada, aqueceu-se novamente até 80°C por uma hora. Após esfriar, transferiu-se a solução para balão de 50 mL, completando-se o volume com água destilada (McKeague, 1978).

2.5 Extração por Digestão Sulfúrico

Os elementos Si, Al e Fe foram determinados por ataque sulfúrico em amostras de 0,5 g de TFSA. Estas amostras foram colocadas em tubos de digestão de 75 mL, juntamente com 20 mL de H_2SO_4 9 mol L^{-1} , e levadas à placa digestora para aquecer a uma temperatura de 170 °C, por uma hora. Foram adicionados 20 mL de água destilada às suspensões, que, após estarem frias, foram filtradas em papel-filtro lento, para balões de 250 mL (extrato A). Em seguida, os resíduos retidos no papel-filtro foram transferidos para erlenmeyer de 250 mL e sofreram um ataque básico com 2 mL de NaOH 30%, colocados após fervura da suspensão. Estes foram transferidos para balões de 200 mL, que já continham 10 mL de HCl 6 mol L^{-1} , obtendo-se o extrato B (Embrapa, 1997, modificado).

No extrato A, foram determinados o alumínio e o ferro por colorimetria (Duriez e Johas, 1982; Olson, 1965). No extrato B, determinou-se o silício, por colorimetria (Kilmer, 1965).

2.6 Análises Mineralógicas e Micromorfologia

Neste caso, apenas nas amostras do perfil Latossolo Amarelo Distrófico típico (Perfil P4) foram feitas análises mineralógicas de rotina e análises micromorfológicas para os horizontes A2, BA e Bw; sendo utilizados os resultados das análises publicados por Lima Neto et al. (2009; 2010) referente aos perfis de solos coesos.

Assim, no laboratório de Mineralogia da UFRPE, a TFSA recebeu um tratamento prévio visando a remoção de matéria orgânica, para tal foi utilizado peróxido de hidrogênio 30% (Jackson, 1975). As frações da TFSA foram separadas entre si peneiramento úmido (areia) e por sedimentação (silte e argila), para identificação de seus componentes e análise qualitativa por difratometria de raios X (DRX) conforme recomendações apresentadas por Jackson (1975) e Whittig e Allardice (1986).

Os difratogramas foram obtidos empregando-se difratômetro Shimadzu, operando a uma tensão de 40 kv, com corrente de 30 mA, radiação de $\text{CuK}\alpha$, com monocromador de grafite. A amplitude de varredura foi de 5 a

70° (2 θ) e uma velocidade de registro de 1° 2 θ min⁻¹. Tendo em vista o elevado grau de intemperização do solo, foram feitos difratogramas apenas com amostras de argila não orientada e orientadas em lâminas de vidro.

Os critérios empregados para interpretação dos difratogramas e na identificação dos minerais constituintes da fração argila foram: espaçamento interplanar (d), forma, largura e intensidade dos picos e comportamento frente aos tratamentos, conforme apresentado por Grim (1965), Jacscon (1975), Dixon e Weed (1977), Brown e Brindley (1980), Whittig e Allardice (1986) e Moore e Reynolds (1989).

Para as análises micromorfológicas foram coletadas amostras indeformadas com o auxílio de caixa de Kubiena com dimensões de 10,0 x 6,5 x 5,0 cm. Para confecção das seções delgadas, as amostras foram impregnadas com resina de poliéster (Jongerius & Heintzberger, 1963).

Após a secagem, as amostras foram seccionadas, polidas e coladas em lâminas de vidro, para novo seccionamento e polimento até espessura ideal para realização das análises micromorfológicas, conforme recomendado por Murphy (1986).

As seções delgadas foram analisadas em microscópio petrográfico e as descrições realizadas de acordo com Stoops e Jongerius (1975), Brewer (1976) e Bullock et al. (1985).

2.7 Tomografia Computadorizada de Raios-X

Foram coletadas dezesseis amostras indeformadas com o auxílio de tubos de acrílico transparentes dimensionados em 14 cm de altura por 7 cm de diâmetro, com volume total 539 cm³ de solo (Figura 4).

A coleta foi feita após abertura e descrição dos perfis sob mata, retirando três amostras (conforme a sequência de observação inicial do caráter coeso, abrangendo o horizonte diagnóstico e o subsequente - Figura 4i). No caso do perfil testemunha, foi realizado o mesmo procedimento, tomando o horizonte diagnóstico como comparativo ao horizonte coeso. Adicionalmente foram abertas mini-trincheiras próximas ao perfil, sob cultivo de cana-de-açúcar, apenas para retiradas de amostras indeformadas (uma no horizonte

sobrejacente ao coeso e outra no horizonte coeso) como forma de comparar a influência do uso sobre as propriedades físicas do solo.

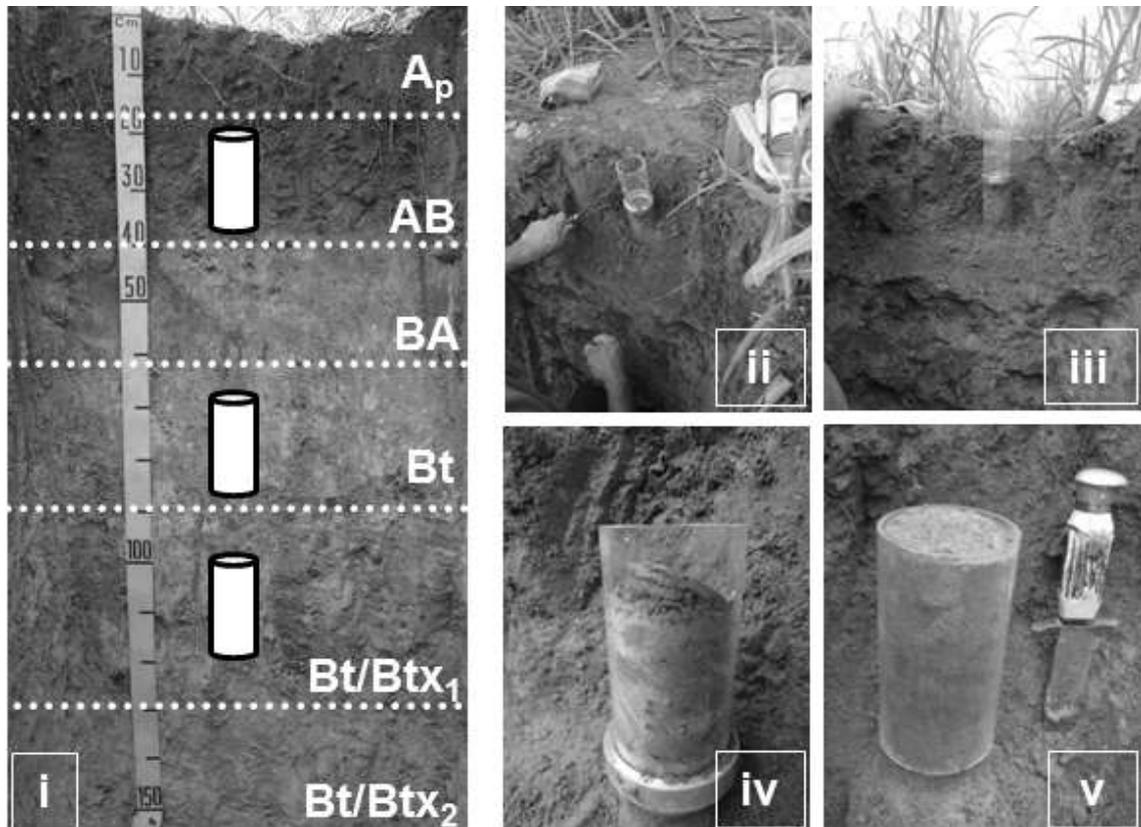


Figura 4 - Detalhes dos procedimentos de coleta de amostras cilíndrica para tomografia computadorizada. i. exemplo dos horizontes amostrados. ii - iv. etapas para a retirada da amostra em horizonte coeso, por causa do adensamento natural. v. amostra pronta para retirada e acondicionamento para laboratório.

Encaminhadas para a Universidade de Guelph (Ontario, Canadá), tais amostras foram escaneadas em Microtomógrafo Computadorizado de Raios-X EVS (GE) MS8x-130 (Tubo de Tungstênio como fonte de Raios-X; energia máxima de 130 KV, 200 μ A), para obtenção e processamento de imagens (Heck, 2009). A espessura de escaneamento foi de 35 mm na porção central do cilindro de acrílico, conforme os horizontes amostrados (Figura 5).

As imagens tomográficas foram obtidas utilizando-se 170 μ A e 120 KV, com tamanho de voxel de 40 μ m x 40 μ m x 40 μ m. Em seguida, o volume foi reconstruído com tamanho de voxel de 60 μ m (0,06 mm x 0,06 mm x 0,06 mm = 0,000216 mm³), utilizando o eXplore Reconstruction Utility (GE Healthcare, 2005). Posteriormente foram analisadas utilizando o MicroView (GE

Healthcare, 2006) e ImageJ 1.38 (Rasband 1997-2012). Um filtro Gaussiano com raio igual a “1” foi aplicado no Microview (utilizado para remover qualquer ruído aleatório nas imagens).

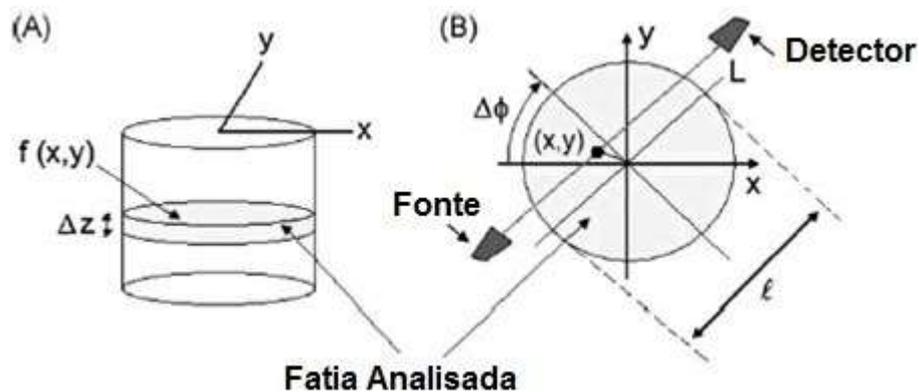


Figura 5 – Detalhes da tomografia computadorizada para uma amostra cilíndrica: (A) uma fatia representando a porção mensurada da amostra, definida como uma função $f(x,y)$ da espessura Δz . (B) sistema de coordenadas usadas para descrever o método de reconstrução da imagem (Pires et al, 2010).

Todas as imagens obtidas foram segmentadas utilizando uma metodologia limiarização desenvolvida no “Soil Imaging Laboratory da SES-UoG”. Esta metodologia consiste nas seguintes etapas: (i) um refinamento das imagens de raios-X é obtida através da aplicação de um filtro (SD Variance) no programa ImageJ 1.38V (Rasband, 1997-2012), (ii) as regiões com densidade atômica homogênea são então identificadas nas imagens, (iii) a partir de um histograma da imagem resultante, um primeiro valor de limiarização que corresponde ao valor equiprobabilidade (considerando-se o pico dos “espaços vazios” versus o da parte sólida) é estabelecido por meio do software OriginPro 7.5 SR6 (1999-2006), (iv) o uso desta limiarização é seguido pela aplicação de um filtro cúbico médio no programa ImageJ; este filtro remove voxels individuais isolados reclassificando as interfaces, e (v) o procedimento termina com a determinação e aplicação de um valor de limiarização final pré-definido.

A partir das imagens em escala de cinza foram feitas análises da estrutura do solo por meio de gráficos de semivariância, determinação dos valores médios e variabilidade da atenuação total de raios-x, média e

variabilidade da atenuação de raios-x da matriz do solo e porosidade total detectável da imagem.

Os semivariogramas foram obtidos pelo programa ImageJ (Rasband 2007 – 2011) através do plugin “Semivariance 3D” (Taina et al., 2012).

2.8 Análises Estatísticas – Funções Discriminantes

Baseado nos dados dos semivariogramas, atenuação de raios-X e variabilidade total e da matriz dos sólidos junto com a porosidade total detectável das análises de imagem foi feito um estudo estatístico para testar se essas variáveis serviriam como parâmetros para a distinção entre as classes de solos estudadas. Para tanto, utilizou-se as funções discriminantes de Fisher por meio do programa estatístico do SAS Institute (1992).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Morfologia dos Solos

Os solos utilizados foram objeto de estudo mais aprofundado do trabalho de Lima Neto (2008), no qual é possível obter vasta informação sobre diversos aspectos de dos perfis P1, P2 e P3. O foco neste trabalho é o uso da tomografia computadorizada de raios-X no estudo de solos com horizontes coesos. Será dado destaque aos atributos morfológicos dos horizontes utilizados para as análises tomográficas junto com uma breve explanação sobre os aspectos morfológicos observados no P4 (solo não-coeso), de modo a contribuir para a melhor compreensão das informações geradas pela TCX.

A caracterização morfológica completa dos perfis estudados é apresentada no Apêndice, juntamente com as análises físicas e químicas, de forma resumida na Tabela 1. Os solos estudados no Estado de Alagoas apresentam expressiva manifestação do caráter coeso principalmente no que se refere à estrutura (maciça coesa) e consistência seca (dura e extremamente dura).

O perfil P1, caracterizado morfológicamente como Argissolo Acinzentado. Sua coloração é predominantemente acinzentada nos primeiros

100 cm, como citado por Lima Neto (2008), destaca-se na matiz 10YR (valores ≥ 5 e cromas < 4), provavelmente ocasionadas pela redução e lixiviação do ferro, reflexo do ambiente redutor em que o solo se encontra. Tanto o caráter coeso quanto os horizontes fragipânicos em profundidade contribuem para dificultar a drenagem da água no perfil, implicando em alguns períodos de alagamento ao longo do ano.

O perfil apresenta sequência de horizontes do tipo Ap – AB – BA – Bt - Bt/Btx1 - Bt/Btx2 (Figura 6). Nele os horizontes amostrados para as análises tomográficas foram AB (18-32 cm); Bt (63-77 cm) e Bt/Btx1 (90-104 cm).

Morfologicamente foi observada no horizonte AB de cor bruno-acinzentado (10YR 6/1, seca; 10YR 5/2, úmido); a textura como argilo-arenosa; a estrutura foi fraca pequena média blocos subangulares; com consistência variando entre muito dura (seca), friável (úmida), ligeiramente plástica e pegajosa (molhada); a transição entre horizontes foi plana e abrupta. Este horizonte apresentou morfologicamente um grau extremo de coesão, sendo por isso classificado como coeso. Tal coesão estende-se até o topo do horizonte BA.

Tendo em vista este grau extremo de coesão, Silva (1996) afirma que através do estudo mineralógico e micromorfológico bem como por meio de análises físicas e morfológicas evidencia-se que solos coesos têm suas características acentuadas pelo cultivo da cana-de-açúcar, pelo preenchimento dos poros com argila iluvial.

No horizonte Bt, a cor foi bruno-claro-acinzentado (10YR 7/1, seca; 10YR 6/3, úmido), com presença de mosqueado comum, médio e distinto bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/2, seco; 10YR 7/3, úmido); a textura foi classificada como argilosa; apresentando estrutura maciça e fraca coesa pequena a média blocos subangulares; a depender do grau de umidade, a consistência varia entre extremamente dura (seca), firme (úmida), plástica e pegajosa (molhada), tendo uma transição abrupta irregular entre os horizontes.

O horizonte Bt/Btx1 apresentou três cores (5YR 4/6; 10YR 7/3; 2,5YR 6/3) também sendo notada a presença de mosqueado comum, médio e proeminente vermelho (2,5YR 6/4, seco; 2,5YR 4/6, úmido), mosqueado comum, médio a grande e distinto bruno muito claro-acinzentado (10 YR 7/1,

seco; 10YR 7/4, úmido). A estrutura observada maciça coesa e fraca, pequena, média, blocos subangulares; e a consistência foi classificada como extremamente dura (seca), friável e extremamente firme (úmida), ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa (molhada) com transição gradual e ondulada (15-65 cm).

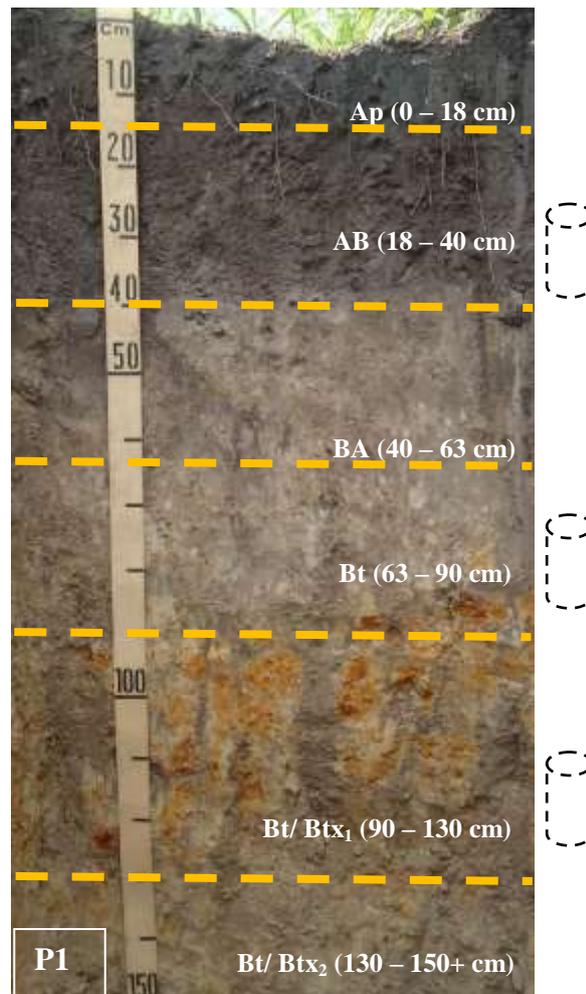


Figura 6 – Sequência de horizontes do Argissolo Acinzentado (P1), Usina Marituba (município de Penedo/AL). O cilindro pontilhado indica os horizontes analisados por TCX.

A estrutura maciça coesa observada nesses horizontes é uma característica marcante da coesão pedogenética encontrada de forma típica nos solos dos Tabuleiros Costeiros, servindo como parâmetro para a separação dos horizontes coesos, como observado por Silva e Ribeiro (1992), em Argissolos Amarelos latossólicos, e por Silva e Ribeiro (1998) em Latossolos Amarelos coesos.

Achá-Panoso (1995) estudando alguns aspectos sobre a classificação de solos de Tabuleiros cita com relação à coesão que o “aspecto maciço, compacto e coeso” é mais pronunciado nos solos de relevo plano, situação encontrada em todos os perfis de solos coesos aqui estudados.

Assim como citado por Lima Neto et al. (2009), no perfil P1 foi observada presença de mosqueados vermelhos nos horizontes Bt e Bt/Btx, que embora visualmente se assemelhem a plintita, são revestimentos de óxidos de ferro (filmes) em alguns planos de fraqueza do fragipã. Por esta razão, apesar de apresentar características semelhantes a classe dos Plintossolos, como hidromorfismo, imperfeitamente ou mal drenados (Amaral, 2000); não se foi observado um horizonte plíntico ou a presença de horizonte E acima de tal horizonte. Mesmo tendo horizontes com muitos mosqueados com cores acinzentadas além de, possivelmente, estar submetido a ciclos de umedecimento e secagem, pela presença de horizontes fragipânicos em profundidade, as demais características morfológicas bem como as análises físicas e químicas corroboram para a classificação como Argissolo.

O P2 foi caracterizado como Latossolo Amarelo, junto com os demais perfis estudados, apresentou coloração amarelada, atribuída a presença de óxidos de ferros, cores no matiz 10YR e 7,5YR. A sequência de horizontes é do tipo A - AB – BA - Bw1 - Bw2 (Figura 7), sendo amostrados para a tomografia os horizontes AB (15-29 cm); BA (38-52 cm) e Bw₂ (115-129 cm).

Segundo Jacomine (2001), os Latossolos Amarelos dos Tabuleiros são os que apresentam em condições naturais, o caráter coeso, coincidindo com uma faixa compreendida entre 20 e 60 cm, podendo atingir maiores profundidades. Ribeiro (2001a) acrescenta que os solos com B latossólico são os de maior representatividade nos Tabuleiros, sendo os primeiros a serem desenvolvidos da cobertura pedológica dos Sedimentos Barreiras.

O horizonte AB, apresentou-se bruno (7,5YR 5/3, úmido); com textura franco-argilo-arenosa; estrutura fraca pequena a média granular com blocos subangulares; a consistência variou entre dura (seca), friável (úmida), ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa (molhada); e com transição entre horizontes gradual e plana.

O horizonte BA, classificado como horizonte coeso, apresentou cor bruno-amarelado (7,5YR 5/4, úmido), com presença de mosqueado pouco, pequeno e distinto bruno-forte (10YR 5/6, úmido); a textura foi franco-argilo-arenosa; estrutura maciça moderadamente coesa; consistência muito dura e firme (úmida), ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa (molhada); apresentando transição gradual e plana.

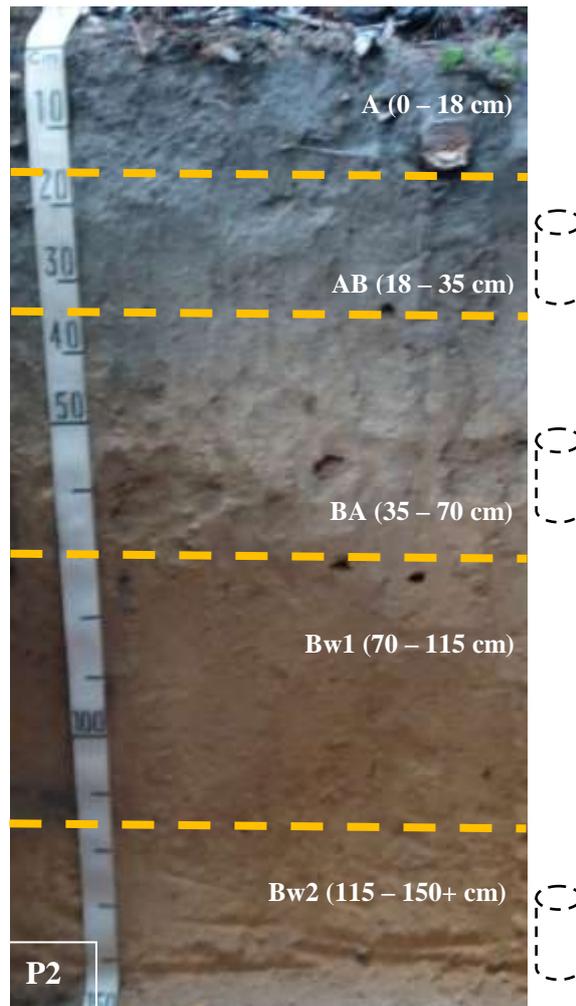


Figura 7 – Sequência de horizontes do Latossolo Amarelo (P2), Usina Caeté (município de São Miguel dos Campos/AL). O cilindro pontilhado indica os horizontes analisados por TCX.

Já o horizonte Bw2, mostrou cor bruno-amarelado (7,5YR 6/8, úmido); com textura argilo-arenosa; de estrutura fraca, pequena blocos subangulares, com aspecto maciço poroso; consistência dura e muito dura (seca), muito

friável (úmida), ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa (molhada); e sendo a transição difusa e plana.

Jacomine (2001), ainda destaca que as cores tipicamente amarelas dos Latossolos, apresentam matizes 10YR e 7,5YR com valores e croma via de regra iguais ou maiores a 5. A estrutura é fracamente desenvolvida em blocos nos horizontes AB, BA, e no Bw; com menor frequência apresentando-se granular muito pequena no Bw.

O perfil P3 apresenta sequência de horizontes A – AB – BA - Btx1 (Figura 8) e foi caracterizado morfologicamente como Argissolo Amarelo. Para os estudos tomográficos foram amostrados os horizontes A (11– 25 cm), BA (50-64 cm) e Btx1 (87-91 cm). Lima et al. (2004) comenta que identificação de Argissolos Amarelos e Acinzentados nos Tabuleiros Costeiros foi feita em vários estados (PB, PE, AL, SE e BA). Jacomine (2001), explica que justamente nos Tabuleiros estão as maiores extensões destes solos. As propriedades químicas e mineralógicas dos Argissolos Amarelos são muito similar a dos Latossolos Amarelos, residindo a distinção na mudança textural abrupta da primeira classe, observada no horizonte Bt (Lima et al, 2004).

O horizonte A, apresenta cor bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/1, seca; 10YR 4/2, úmido); a textura foi franco-arenosa; com estrutura fraca pequena a média granular; já a consistência foi macia e ligeiramente dura (seca), muito friável (úmida), ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa (molhada); sendo a transição gradual e plana.

No horizonte BA, a cor foi bruna (10YR 5/3, seca 10YR 6/3, úmido); de textura franco-argilo-arenosa; maciça moderada coesa (seca); muito dura, firme (úmida), plástica e pegajosa (molhada); enquanto a transição foi abrupta e ondulada (32-50 cm).

O horizonte Btx1 também apresentou cor brunada (10YR 5/3, úmido), observando-se mosqueado comum, médio e distinto bruno (10 YR 6/4, seco; 7,5YR 5/4, úmido); sendo de textura argilosa; maciça coesa (seca); muito dura e muito firme (úmida); plástica e pegajosa (molhada); e transição abrupta e ondulada (40-55 cm).

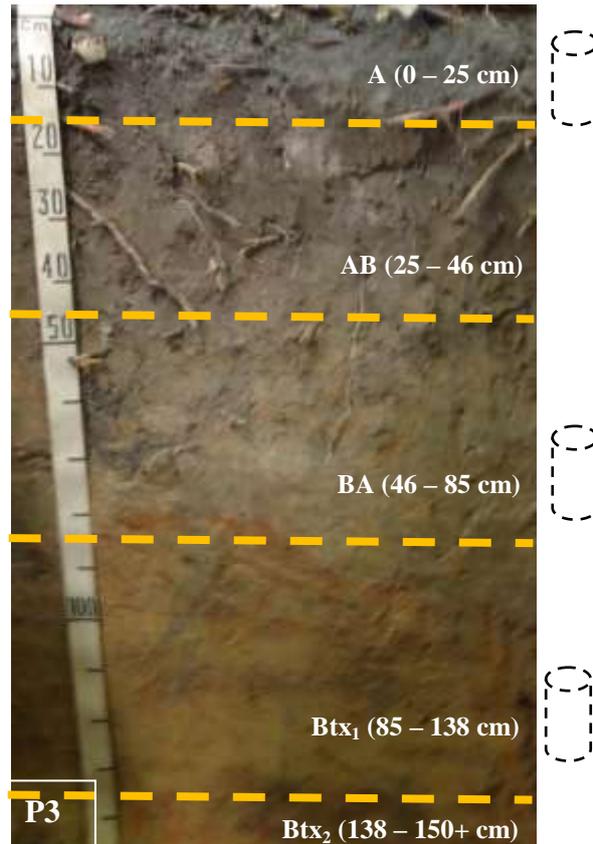


Figura 8 – Sequência de horizontes do Argissolo Amarelo (P3), Usina Coruripe (município de Coruripe/AL). O cilindro pontilhado indica os horizontes analisados por TCX.

A descrição morfológica em campo demonstra que nos perfis de solos coesos observam-se muitas raízes nos horizontes superficiais (P01 cana Ap, 0-18 cm; P02 mata A, 0 – 18 cm; P03 mata A, 0 – 25 cm), tornando-se comuns nos horizontes subsuperficiais dos perfis 01 (AB, 18-40 cm) e P02 (AB, 18 – 35 cm) porém ainda havendo muitas no P03 (AB, 25 – 46 cm).

A limitação física imposta pela coesão no crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas já foi comentada por Santana et al (2006), estudando crescimento radicular de citrus, onde observaram a maior concentração de raízes nos horizontes superficiais Ap, havendo uma redução em profundidade; também observado por outros autores e indicando que os horizontes coesos dificultam o aprofundamento do sistema radicular, servindo como um indicador direto da coesão.

Tabela 1 – Atributos morfológicos dos solos estudados

Horiz.	Prof. (cm)	Cor			Estrutura	Consistência (seca úmida e molhada)	Transição
		Úmida	Seca	Mosqueado			
Argissolo Acinzentado – P1 (cana de açúcar)							
Ap	0-18	10YR 5/2	10YR 5/1		Fraca pequena média blocos subangulares granular	Muito dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa	Plana e gradual
AB	18-40	10YR 5/2	10YR 6/1		Fraca pequena média blocos subangulares	Muito dura, friável, ligeiramente plástica, pegajosa	Plana e abrupta
BA	40-63	10YR 6/2	10YR 7/1		Maciça coesa	Extremamente dura, firme, plástica, pegajosa	Plana e gradual
Bt	63-90	10YR 6/2	10YR 7/1	10YR 7/3	Maciça coesa fraca pequena média blocos subangulares	Extremamente dura, firme, plástica, pegajosa	Abrupta irregular
Bt/Btx ₁	90-130	5YR 4/6 2,5YR 6/3	5YR 5/6 2,5YR 6/4	10YR 7/2 (Seco) 10YR 7/3	Maciça coesa fraca pequena média blocos subangulares	Dura, muito dura, friável e extremamente firme, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa	Clara e ondulada (15-65 cm)
Bt/Btx ₂	130-150+	2,5YR 7/2	10YR 7/1	5YR 5/6 (seco) 10YR 7/3 (seco)	Maciça coesa e pequena média blocos subangulares	Dura, extremamente dura, friável e extremamente firme, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa	---
Latossolo Amarelo – P2 (mata)							
A	0-18	7,5YR 3/2	7,5YR 5/2		Fraca a moderada pequena média blocos subangulares granular	Ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa	Gradual e plana
AB	18-35	7,5YR 5/3	7,5YR 6/2		Fraca pequena média blocos subangulares granular	Dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa	Gradual e plana
BA	35-70	7,5YR 5/4	10YR 6/4	10YR 5/6	Maciça coesa moderada	Muito dura, firme, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa	Gradual e plana
Bw ₁	70-115	7,5YR 5/6	10YR 6/4		Fraca pequena média blocos subangulares granular	Muito Dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa	Gradual e plana
Bw ₂	115-150+	7,5YR 6/8	10YR 6/4		Fraca com aspecto maciço poroso pequena média blocos subangulares granular	Muito duro a duro, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa	Difusa e plana
Argissolo Amarelo - P3 (mata)							
A	0-25	10YR 4/2	10YR 4/1		Fraca a moderada pequena média granular	Macia, ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa	Gradual e plana
AB	25-46	10YR 4/3	10YR 5/2		Fraca moderada pequena média granular blocos subangulares	Ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa	Gradual e plana
BA	46-85	10YR 5/3	10YR 6/3	7,5YR 4/4 10YR 6/4 (seco)	Maciça moderada coesa	Muito dura, firme, plástica, pegajosa	Abrupta e ondulada (32-50cm)
Btx ₁	85-138	10YR 4/2	10YR 6/6	2,5YR 4/6 7,5YR 5/6 7,5YR 4/4 (seco)	Maciça coesa	Muito dura, muito firme, plástica, pegajosa	Abrupta e ondulada (40-55cm)
Btx ₂	138-140+	10YR 6/6	---	2,5YR 5/6	Maciça coesa	Extremamente dura, muito firme, plástica, pegajosa	---
Latossolo Amarelo – P4 (mata)							
A ₁	0-15	10 YR 4/3	10YR 6/3		Moderada pequena média granular blocos subangulares	Ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa	Gradual e plana
A ₂	15-37	10 YR 4/4	10YR 5/4		Fraca a forte pequena granular blocos subangulares	Ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa	Gradual e plana
AB	37-50	10 YR 5/6	10YR 6/6		Fraca pequena média granular blocos subangulares	Ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa	Gradual e plana
BA	50-87	10 YR 5/6			Fraca pequena média blocos subangulares	Ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa	Difusa e plana
Bw	87-150+	10 YR 5/8			Fraca pequena blocos subangulares com aspecto maciço poroso	Ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa	---

Em consonância com tal afirmação, observou-se que, em profundidade, as raízes tornaram-se raras nos horizontes coesos BA (40-63 cm), Bt (63-90 cm) e ausentes no Bt/Btx1 (90-130 cm) do P01. Por outro lado, foram poucas e raras nos horizontes coesos BA (35-70 cm) e Bw1 (70 – 115 cm) do P02 bem como nos horizonte coesos BA (46 – 85 cm) e Btx1 (85 – 138 cm) do P03; ambos sob mata nativa. Lima Neto et al. (2009) explicam que nos perfis sob vegetação primária, observa-se um ligeiro aumento de raízes nos horizontes coesos em relação aos cultivados com cana, devido ao maior poder de penetração e das raízes pivotantes da vegetação primária.

É importante destacar uma prática agrícola comum nos solos de Tabuleiro com horizontes coesos, a subsolagem que consiste no rompimento de camadas compactadas do solo ou adensadas localizadas mais superficialmente ou em maiores profundidades, variando de 20 e 50 cm (Vasconcelos, 2006). Assim, permite-se que haja um desenvolvimento radicular mais efetivo da cana-de-açúcar, todavia é um efeito temporário no solo. Por essa razão justifica-se observar a presença de raízes no horizonte AB do P01, sendo este coeso e apresentando grau extremo de coesão como descrito acima.

O perfil P4 foi caracterizado como Latossolo Amarelo com seqüência de horizontes A1 - A2 – AB – BA - Bw (Figura 9), onde foram amostrados para a tomografia os horizontes A₂ (15-29 cm), BA (55-69 cm) e Bw (99-113 cm). Este perfil foi escolhido por não apresentar qualquer indício da presença de coesão, estando situado no topo plano da Chapada do Araripê, numa transição de Caatinga/Cerrado, na divisa entre os Estados de Pernambuco e Ceará (município de Exu – PE). O perfil descrito apresenta-se sob mata de capoeira em regeneração, em situação plana, sem a presença de erosão nem pedregosidade e, possuindo drenagem acentuada.

Segundo Mendonça et al. (2006), no topo da Chapada do Araripê, devido a grande permeabilidade dos terrenos oriundos dos arenitos, os cursos d'água superficial são fracamente desenvolvidos. Mesmo poucas horas após eventos de alta pluviosidade, não se encontra escoamentos superficiais ou água acumulada. Enfrenta-se, então, uma curiosa situação: apesar da elevada pluviosidade, comparável a da faixa costeira do Estado, água no topo da Chapada é escassa.

Estas condições causaram uma ocupação tardia e esparsa do topo da Chapada e permitiram a implantação da primeira reserva florestal (FLONA – Floresta Nacional do Araripe – criada em 1946, com área de 38.262 hectares).

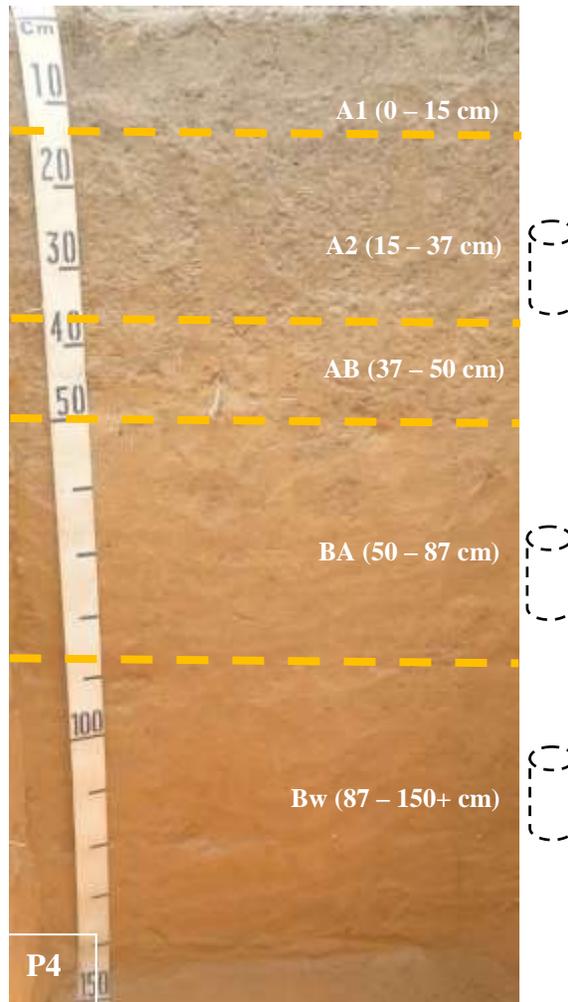


Figura 9 – Sequência de horizontes do Latossolo Amarelo (P4), Sítio Boa Esperança (município de Exu/PE). O cilindro pontilhado indica os horizontes analisados por TCX.

Os horizontes superficiais A1 (0-15 cm) e A2 (15-37 cm) assim como os transicionais AB (37 – 50 cm) e BA (50-87 cm) apresentaram a mesma coloração, bruno amarelada com matiz 10YR, apenas variando o valor e o croma. A textura descrita em campo foi franco-argilo-arenosa leve; a estrutura foi moderada pequena a média granular e blocos subangulares; com consistência ligeiramente dura (seca), friável (úmida) e muito friável (apenas nos horizontes AB e BA), ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa (molhada); apresentando transição

gradual plana em todos os horizontes, exceto o BA, onde a transição foi plana e difusa.

O horizonte diagnóstico Bw (87-150 cm+) apresentou cor bruno-amarelada (10YR 5/8, úmido); textura franco-argilo-arenosa; com estrutura fraca pequena granular e blocos subangulares com aspecto maciço poroso; a consistência foi ligeiramente dura (seca), muito friável (úmida), ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa (molhada).

Ker (1995) sucinta que os baixos teores de Fe_2O_3 (< 7%) e a ausência virtual de gibbsita, podem ser as causas principais da estrutura em blocos subangulares fracamente desenvolvida e de pouca estabilidade em água. O autor ainda comenta que Latossolos Amarelos (LA) encontram-se espalhados em muitas áreas do Brasil, englobando solos profundos, com matizes do horizonte B entre 7,5YR e 10YR, normalmente cauliníticos.

Diferente da situação observada nos solos coesos, no perfil P4 as raízes são muitas nos horizontes superficiais e subsuperficiais, tornando-se comuns em profundidade. Também foram observados muitos macroporos em todos os horizontes descritos.

Como destaca Cavalcanti e Lopes (1994), os solos que compõem a Chapada do Araripe são representados pelas classes dos Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho-Amarelo. São solos muito profundos, bem drenados, de ótimas condições físicas, ocorrem em relevo plano e oferecem fácil condição de manejo e mecanização.

3.2 Atributos Físicos e Químicos

Com relação aos atributos físicos, a variação das frações granulométricas nos perfis de solos coesos estudados, os Argissolos apresentam uma acentuada variação no conteúdo de argila entre os horizontes superficiais e subsuperficiais; nos Latossolos, essa variação é pequena e ocorre de forma muito gradual ao longo do perfil (Tabela 2). No caso do Latossolo Amarelo (P2), os horizontes mais profundos foram classificados como franco-argilosos. As duas situações, confirmam o que foi observado por Lima Neto (2008), que destaca o aumento do

teor de argila em profundidade. Já o Latossolo Amarelo (P4), todos os horizontes apresentaram textura média

Observam-se também os baixos teores de silte encontrados nos perfis de solos coesos, já comentado por Lima Neto (2008). Conforme destacado pelo Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (EMBRAPA, 2006) a relação silte/argila serve como base para avaliar o estágio de intemperismo presente em solos de regiões tropicais. Indica baixos teores de silte e, portanto, alto grau de intemperismo, quando apresenta, na maior parte do horizonte B, valor inferior a 0,7 nos solos de textura média ou inferior a 0,6 nos solos de textura argilosa/muito argilosa. Tais informações corroboram os resultados encontrados no presente trabalho; os quais estão bem abaixo dos valores citados, principalmente nos Latossolos.

Para caracterizar os horizontes coesos dos solos de tabuleiros, têm sido utilizadas propriedades físicas, como densidade do solo (D_s), porosidade e resistência à penetração (Silva e Carvalho, 2007). Em relação a D_s , os valores variaram entre 1,25 e 1,62 g.cm^{-3} nos perfis de solos coesos e entre 1,21 e 1,41 g.cm^{-3} no perfil não-coeso. Assim como observado por Lima Neto et al (2009), os maiores valores de densidade encontram-se nos horizontes coesos e corroboram com os dados apresentados na morfologia descrita em campo. A caracterização mais detalhada de solos com horizontes coesos iniciou-se com Oliveira et al. (1968) e Oliveira e Melo (1970), nesses trabalhos, foram descritos horizontes com densidade do solo de 1,75 g cm^{-3} ; o presente trabalho encontrou valores médios um pouco mais baixos em relação ao citado acima (P1 BA: 1,62 g cm^{-3} ; P2 BA: 1,40 g cm^{-3} ; P3 BA: 1,45 g cm^{-3}).

Souza et al. (2001) chama a atenção que a densidade do solo, por si só, não é um atributo adequado para identificar a coesão, já que a grande maioria dos valores observados em seu trabalho com solos coesos, situou-se abaixo daqueles considerados típicos para horizontes coesos de tais solos. Santana et al. (2006), complementam que a D_s é um bom atributo para avaliar a presença de horizontes coesos, porém a principal limitação, refere-se a interferência da granulometria na manifestação dos seus valores.

Todavia, a densidade elevada reflete também nos valores da porosidade total, que conforme citado por Giarola e Silva (2002), “os horizontes coesos apresentam-se muito duros e firmes sem uma organização estrutural visível (são maciços) com uma macroporosidade geralmente ligada à atividade biológica (biovazios), sendo difícil a observação dos poros finos”. Neste contexto, as menores porcentagens de poros foram observadas nos horizontes coesos, estando de acordo com a maioria dos trabalhos de caracterização desses solos. Os perfis coesos sob mata, apresenta porosidade, um pouco maior que 50% no Latossolo Amarelo (P2), o que apenas se observa no horizonte A do P3 (Argissolo Amarelo), ambos os casos provavelmente influenciados pela presença de material orgânico. Já no Latossolo Amarelo Distrófico típico (P4), onde não há o caráter coeso, observa-se que os valores foram maiores que 50%, inclusive aumentando em profundidade. Tal resultado também pode ser atribuído ao teor de material orgânico. Curiosamente há presença de colmeias de abelhas sem ferrão dentro do solo; fato testemunhado durante a abertura do perfil e comentado como de comum observação na região pelo ajudante contratado durante as escavações, que possivelmente contribuem com o aumento da porosidade do solo.

Vale ressaltar que o Argissolo Acinzentado (P1), é o único perfil somente sob cultivo neste estudo e que o manejo da cana pode em muito influenciar os resultados das análises físicas, principalmente nos horizontes superficiais (granulometria, densidade do solo e porosidade) com valores diferenciados. Conforme citado por Maia e Ribeiro (2004), ao longo do tempo, o cultivo contínuo do solo diminui a porosidade total, aumenta a densidade do solo e reduz a taxa de infiltração e, conseqüentemente, diminui também a rentabilidade, em decorrência do crescente aumento dos custos de produção.

Os atributos químicos dos solos estudados (Tabela 2) demonstram a limitada disponibilidade de nutrientes, comprovada pela maioria dos baixos valores de soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (T), com alta saturação por alumínio (m). No Estado de Alagoas, a maior parte das áreas cultivadas com cana-de-açúcar está localizada em solos de Tabuleiros Costeiros, que se caracterizam pela baixa fertilidade (Silva e Ribeiro, 1998).

De maneira geral, o pH em todos os horizontes apresentaram-se na classe fortemente ácida, com exceção dos horizontes superficiais do P1 (classe moderada), provavelmente pelo manejo da cultura da cana-de-açúcar na área; o mesmo ocorreu com os horizontes superficiais do P3, sob mata, podendo estar associado a reações do solo envolvendo os restos vegetais e microrganismos comuns sobre o material orgânico. Nos horizontes coesos (P1, AB; P2, BA e P3, BA), a reação do solo fortemente ácida está de acordo com os resultados encontrados por (Lima Neto et al, 2010; Lima et al, 2004; Souza et al, 2001) e se enquadram nas características atribuídas aos horizontes coesos (Jacomine, 1996).

Os demais atributos químicos também variam entre medianos (em superfície) e baixos/muito baixos (em profundidade) caracterizando tais solos como pobres quimicamente.

Apesar dos elevados valores em termos de saturação (m%), o teor de alumínio extraível não é $\geq 4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de solo, insuficientes para classificar os solos com “caráter alumínico” ou “caráter alítico” (EMBRAPA, 2006)

Os teores de carbono orgânico podem ser também considerados médios/baixos, destacando que os maiores teores encontram-se nos perfis sob mata, dentro do esperado e que tais valores podem refletir nas interpretações de resultados das análises tomográficas.

O Latossolo Amarelo Distrófico típico (P4), apresenta características marcantes da classe: são solos de grande potencial para agricultura mesmo havendo necessidade de correção do pH e da fertilidade; ocorrem normalmente em relevo plano, e suave ondulado, possuem boas propriedades físicas, como elevada profundidade efetiva e boa drenagem, porém, apresentam limitações pela saturação por alumínio e deficiência acentuada de micronutrientes. Além disso, mais de 95% desses solos são distróficos, ácidos (pH entre 4,0 e 5,5), com baixa a média capacidade de troca catiônica (Matias, 2006).

SOUZA, R. V. C. C. de. Tomografia computadorizada de raios-x de solos coesos...

Tabela 2 – Atributos físicos e químicos dos solos estudados

Horiz.	Prof. (cm)	Areia g kg ⁻¹	Argila g kg ⁻¹	Silte g kg ⁻¹	Silte/Argila	*ADA g kg ⁻¹	Dp g dm ⁻³	Ds g dm ⁻³	Poros %	pH		*ΔpH	K	Na	Ca+Mg	Al ⁺³	H ⁺ Al	SB	CTC	V %	m	C.O g kg ⁻¹
										Água	KCl											
Argissolo Acinzentado Distrocoeso fragipânico - P1 (cana-de-açúcar)																						
Ap	0-18	596	303	101	0,34	303	2,67	1,58	41	5,9	4,8	-1,1	0,32	0,03	2,30	0,45	2,60	2,65	5,25	50	15	16,0
AB	18-40	505	405	90	0,22	425	2,68	1,45	46	5,7	4,4	-1,3	0,24	0,02	1,78	0,48	2,93	2,04	4,97	41	19	11,8
BA	40-63	360	477	163	0,34	20	2,67	1,62	39	4,6	4,0	-0,6	0,09	0,03	1,10	1,00	3,38	1,22	4,60	27	45	8,1
Bt	63-90	310	559	131	0,23	20	2,65	1,44	46	4,9	4,0	-0,8	0,06	0,04	1,18	1,18	3,05	1,28	4,33	29	48	6,7
Bt/Btx1	90-130	316	523	161	0,31	21	2,65	1,43	46	4,9	4,3	-0,6	0,03	0,07	1,03	0,75	4,13	1,13	5,26	21	40	8,4
Bt/Btx2	130-150+	293	570	137	0,24	20	2,65	---	---	4,9	4,1	-0,7	0,05	0,04	0,85	1,03	2,97	0,94	3,91	24	52	6,3
Latossolo Amarelo Distrocoeso típico - P2 (mata)																						
A	0-18	702	243	55	0,23	263	2,67	1,28	52	4,7	4,0	-0,7	0,05	0,03	1,28	0,95	5,98	1,36	7,34	18	41	25,1
AB	18-35	663	304	33	0,11	334	2,67	1,38	48	4,8	4,4	-0,4	0,02	0,02	0,70	1,10	4,62	0,74	5,36	14	60	17,2
BA	35-70	514	448	38	0,09	51	2,67	1,40	48	4,9	4,2	-0,8	0,01	0,02	0,95	1,05	3,88	0,98	4,86	20	52	13,0
Bw1	70-115	526	427	47	0,11	20	2,67	1,25	53	4,8	4,2	-0,6	0	0,02	0,78	0,80	3,09	0,80	3,89	20	50	8,7
Bw2	115-150+	476	499	25	0,05	20	2,67	1,27	52	4,8	4,2	-0,6	0,01	0,02	0,85	1,08	2,68	0,88	3,56	25	55	6,7
Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico - P3 (mata)																						
A	0-25	865	111	24	0,22	121	2,67	1,28	52	5,4	4,3	-1,2	0,05	0,03	1,83	0,43	3,63	1,91	5,54	34	18	18,6
AB	25-46	676	101	223	0,15	263	2,70	1,39	49	5,3	4,1	-1,1	0,07	0,04	1,03	1,20	3,30	1,14	4,44	26	51	11,4
BA	46-85	469	497	33	0,07	467	2,67	1,45	46	5,1	4,0	-1,1	0,15	0,08	0,88	1,10	3,71	1,11	4,82	23	50	10,8
Btx1	85-138	253	663	83	0,13	531	2,78	1,43	48	5,2	4,2	-1,0	0,18	0,09	1,55	0,85	3,26	1,82	5,08	36	32	9,6
Latossolo Amarelo distrófico típico - P4 (mata)																						
A1	0-15	716	242	42	0,18	242	2,74	1,35	51	4,9	3,9	-1,0	0,04	0,02	0,78	0,85	4,66	0,84	5,50	15	50	20,3
A2	15-37	709	263	28	0,10	263	2,74	1,35	51	4,7	3,9	-0,8	0,02	0	0,40	1,08	4,17	0,42	4,59	9	72	14,8
AB	37-50	638	315	47	0,15	41	2,82	1,41	50	4,7	4,0	-0,6	0,01	0	0,30	1,35	3,96	0,31	4,27	7	81	12,6
BA	50-87	625	325	49	0,15	20	2,86	1,26	56	4,5	4,1	-0,4	0	0	0,25	1,23	2,89	0,25	3,14	8	83	8,7
Bw	87-150+	602	356	42	0,12	20	2,82	1,21	57	4,6	4,1	-0,5	0,01	0	0,28	0,85	2,48	0,29	2,77	10	75	16,7

*ADA: argila dispersa em água; ΔpH= (pH_{KCl} - pH_{H2O})

Cavalcanti e Lopes (1994) destacam que os Latossolos Amarelos da Chapada do Araripe apresentam boa estrutura física e drenagem, mas sua restrição recai justamente sobre sua baixa fertilidade natural, acidez e na presença de teores elevados de alumínio tóxico, principalmente na parte oriental da região (justamente onde foi descrito o perfil deste trabalho).

3.3 Atributos Mineralógicos

3.3.1 Ataque Sulfúrico, Fe e Al extraídos por DCB e Oxalato

Os teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , obtidos pelo ataque sulfúrico na fração argila das amostras do Latossolo Amarelo Distrófico (P4) localizado na Chapada do Araripe estão apresentados na Tabela 3. Observa-se, que mesmo havendo um aumento, em profundidade, nos teores de argila (Tabela 2), este não reflete diretamente nos valores.

Tabela 3 – Teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 extraídos na fração argila pelo ataque sulfúrico de amostras do Latossolo Amarelo distrófico (P4)

Horiz.	Prof. (cm)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Ki	Kr
		g Kg ⁻¹				
Latossolo Amarelo distrófico típico - P4 (mata)						
A2	15-37	336	332	80	1,72	1,49
BA	50-87	327	342	80	1,63	1,41
Bw	87-150+	333	337	80	1,68	1,46

Tanto o SiO_2 quanto Al_2O_3 tiveram valores muito próximos (em torno de 330 g Kg⁻¹). Todavia, enquanto houve um ligeiro decréscimo no teor de SiO_2 do horizonte mais superficial (A₂) para o transicional (BA), seguido de um ligeiro aumento no horizonte diagnóstico Bw; os teores de Al_2O_3 apresentaram-se de maneira inversa aumentando do horizonte mais superficial (A₂) para o transicional (BA), seguido de uma pequena redução no horizonte diagnóstico Bw. Dessa forma, nos três horizontes analisados, o SiO_2 foi mais elevado no horizonte mais

superficial (A2), enquanto o Al_2O_3 foi mais elevado em profundidade (BA, Bw).

Mesmo sendo observada essa irregularidade dos valores de SiO_2 e Al_2O_3 em profundidade, a partir da observação de outros atributos avaliados como a morfologia em campo, os difratogramas de raios-X (dados apresentados a SEGUIR) bem como os índices mineralógico obtidos por meio das análises de ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) e do Oxalato demonstram que o perfil estudado apresenta boa homogeneidade do material de origem.

Já os teores de Fe_2O_3 não variaram, apresentando-se com 80 g Kg^{-1} nos três horizontes estudados. Ker (1995) ressalta que os Latossolos Amarelos apresentam baixas quantidades de óxidos de ferro (normalmente representados pela goethita) e de alumínio (gibbsita), esses teores de Fe_2O_3 do ataque sulfúrico situam-se entre 1,5 a 7%.

Dentre as características físicas, químicas e mineralógicas que são citadas como índices do grau de intemperização dos solos, apenas o K_i é estabelecido como atributo diagnóstico em classes de solos, como a dos Latossolos (EMBRAPA, 1988).

No presente trabalho todos os valores de K_i foram abaixo de 1,8. Dessa forma, o índice K_i variou entre 1,63 - 1,72; observando-se a mesma tendência do SiO_2 e Al_2O_3 com pouca variação. Verdade (1972), estudando um Latossolo Vermelho-Amarelo do Vale do Paraíba observou o mesmo resultado; concluindo que o alumínio, ao migrar do horizonte mais superficial, acumula-se no horizonte Bw, justificando que não seria uma translocação de argila, pois não houve uma variação da relação molecular. Observa-se ainda que a relação K_r (variando entre 1,41 - 1,49) acompanha o K_i , indicando também a translocação de óxidos de ferro e de alumínio.

Conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), a classe dos Latossolos é caracterizada pela relação molecular $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (K_i) no seu horizonte diagnóstico (B latossólico) menor do 2,2, sendo normalmente inferior a 2,0. Acrescenta-se ainda que o solo pode ser qualificado mineralogicamente como caulíníticos (com predominância de argilominerais do grupo da caulinita) quando a apresenta $K_i > 0,75$ e $K_r > 0,75$. Segundo Verdade (1972), o $K_i < 1,8$ pode indicar a presença de hidróxidos de alumínio livre (gibbsita),

o que não foi observado no DRX.

Achá-Panoso (1995) considerou no aspecto químico que a diminuição do teor de Fe_2O_3 na camada endurecida desempenha papel importante na coesão desse solo; no aspecto mineralógico, admitiu que essa coesão se deve principalmente à fração argila e aos baixos teores de matéria orgânica e sesquióxidos de ferro e alumínio.

Na Tabela 4 são apresentados os teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 extraídos na fração argila obtidos por extrações sucessivas de DCB e extração única de oxalato de amônio e demais índices mineralógicos.

Os dados da extração com DCB mostram teores mais elevados de óxidos de ferro (Fe_d) em relação aos óxidos de alumínio (Al_d) nos três horizontes analisados. Tanto o Fe_d como Al_d , apresentou uma distribuição relativamente homogênea entre os horizontes.

Tabela 4 – Teores de Al_2O_3 e de Fe_2O_3 extraídos na fração argila obtidos por extrações sucessivas de ditionito-citrato-bicarbonato e extração única de oxalato de amônio e demais índices mineralógicos das amostras do Latossolo Amarelo Distrófico (P4)

Horiz.	Prof. (cm)	Fe_d			Fe_o	Al_d			Al_o	Índices Mineralógico		
		Extra 1	Extra 2-3	Σ		Extra 1	Extra 2-3	Σ		Fe_d/Fe_s	Fe_o/Fed	Al_o/Al_d
$g\ Kg^{-1}$												
Latossolo Amarelo distrófico típico - P4 (mata)												
A2	15-37	31,2	32,2	63,4	2,0	8,3	12,2	20,5	2,9	0,79	0,03	0,14
BA	50-87	29,4	32,4	61,8	1,7	9,1	12,6	21,7	3,0	0,77	0,03	0,14
Bw	87-150+	29,7	34,2	63,9	1,2	9,2	12,7	21,9	2,9	0,80	0,02	0,13

Os valores da extração de alumínio e ferro com oxalato de amônio mostram resultados bem modestos quando comparados ao DCB. Enquanto o Fe_o variou entre 1,2 - 2,0 $g\ Kg^{-1}$, reduzindo em profundidade o Al_o praticamente não apresentou variação (em torno de 3,0 $g\ Kg^{-1}$). Esses menores teores de Fe_o estão de acordo com as características do perfil de solo estudado, Latossolo Amarelo, com alto grau de desenvolvimento e maturidade. Valores elevados de Fe_o que correspondem à fase não cristalina do solo, pode ser exemplificada como a de óxidos de ferro jovens que ainda não tiveram tempo ou condições para cristalizarem-se em hematita ou goethita (Coelho e Vidal-Torrado, 2003).

Discutindo-se os índices mineralógicos, observa-se que a relação entre os teores de Fe determinados com DCB e com ácido sulfúrico (Fed/Fes), mostra que 77 a 80% do Fe apresenta-se sob a forma de óxidos, e uma parcela deste Fe ainda está fazendo parte da estrutura cristalina e não cristalina de fase minerais, ocorrendo o maior valor no horizonte diagnóstico do perfil (Bw). Conforme Cornell e Schwertmann (1996), essa relação mais próxima de 1 serve como indicador para maturidade do solo.

A relação entre os teores de Fe extraído com oxalato ácido de amônio e com DCB (Feo/Fed) vem sendo usada como índice qualitativo do grau de cristalinidade dos óxidos (Kämpf, 1988). Os valores da Feo/Fed neste trabalho foram todos menores que 0,05, evidenciando o predomínio de ferro cristalino (Coelho e Vidal-Torrado, 2003; Tremocoldi, 2003; Schwertmann e Kämpf, 1983; Pombo et al., 1982). Houve um decréscimo em profundidade da relação Feo/Fed, que segundo Andrade et al. (1997), indica a existência de uma maior proporção de óxidos “livres” nas formas mais cristalinas em sub-superfície. O maior teor de compostos orgânicos próximo à superfície atua como inibidor da cristalização dos óxidos, como também, a quantidade total de óxidos pode ser influenciada pelo tipo de material de origem.

A relação Alo/Ald não apresentou diferenças expressivas nos horizontes estudados, variando entre 0,13 – 0,14.

Os índices mineralógicos aqui apresentados, não são definidos como características diferenciais para distinção taxonômica de solos, como os índices k_i , k_r e a relação silte/argila, mas frequentemente são utilizados na avaliação do grau de pedogênese em várias classes de solos (Pereira e Anjos, 1999).

3.3.2 Difractometria de Raios-X

De acordo com os difratogramas obtidos (Figuras Figura 10 e Figura 11), a assembléia mineralógica da fração argila do P4 é constituída por caulinita, principalmente, e por goethita.

A caulinita foi identificada pela presença dos picos em 0,72, 0,36 e 0,44 nm (Figuras Figura 10 e Figura 11).

Conforme Ker (1995), nos Latossolos é previsível o domínio de caulinita e óxidos de ferro e alumínio, com menores proporções de outros componentes na fração argila, por serem solos considerados poligenéticos, submetidos a diferentes situações climáticas ao longo de sua formação, o que tende a homogeneizar características químicas, morfológicas e mineralógicas. Assim, são considerados solos de mineralogia relativamente simples.

Dessa forma, os resultados da DRX corroboram as características descritas por Cavalcanti e Lopes (1994), que destacam nos Latossolos Amarelos da Chapada do Araripe a moderada restrição ligada a sua baixa fertilidade natural, acidez e a presença de teores elevados de alumínio tóxico.

A goethita foi identificada, principalmente, através dos picos 0,41 e 0,251 nm. A relação Feo/Fed indicou a dominância de formas cristalinas de ferro, confirmadas nos difratogramas, tanto da argila em pó como da lâmina orientada, que apresentam picos expressivos de goethita (Figuras Figura 10 e Figura 11) em todos os horizontes estudados.

Este óxido de ferro, tido como a forma mais estável, é encontrada sob diversas condições ambientais, tendendo a ser forma dominante nos solos (Schwertmann, 1985). Apesar da presença de picos que podem ser considerados goethita ou hematita (0,26); entende-se que aliado as condições ambientais no local junto com a cor (valor e croma) do solo observada na descrição morfológica admitiu-se que o mineral predominante de fato é a goethita.

Tendo em vista o alto grau de intemperização do solo estudado, é comum encontrar minerais muito resistentes como o caso do anatásio (óxido de titânio), que foi identificado através dos picos de difração de 0,21 nm e 0,36 (após aquecimento da amostra com eliminação da caulinita).

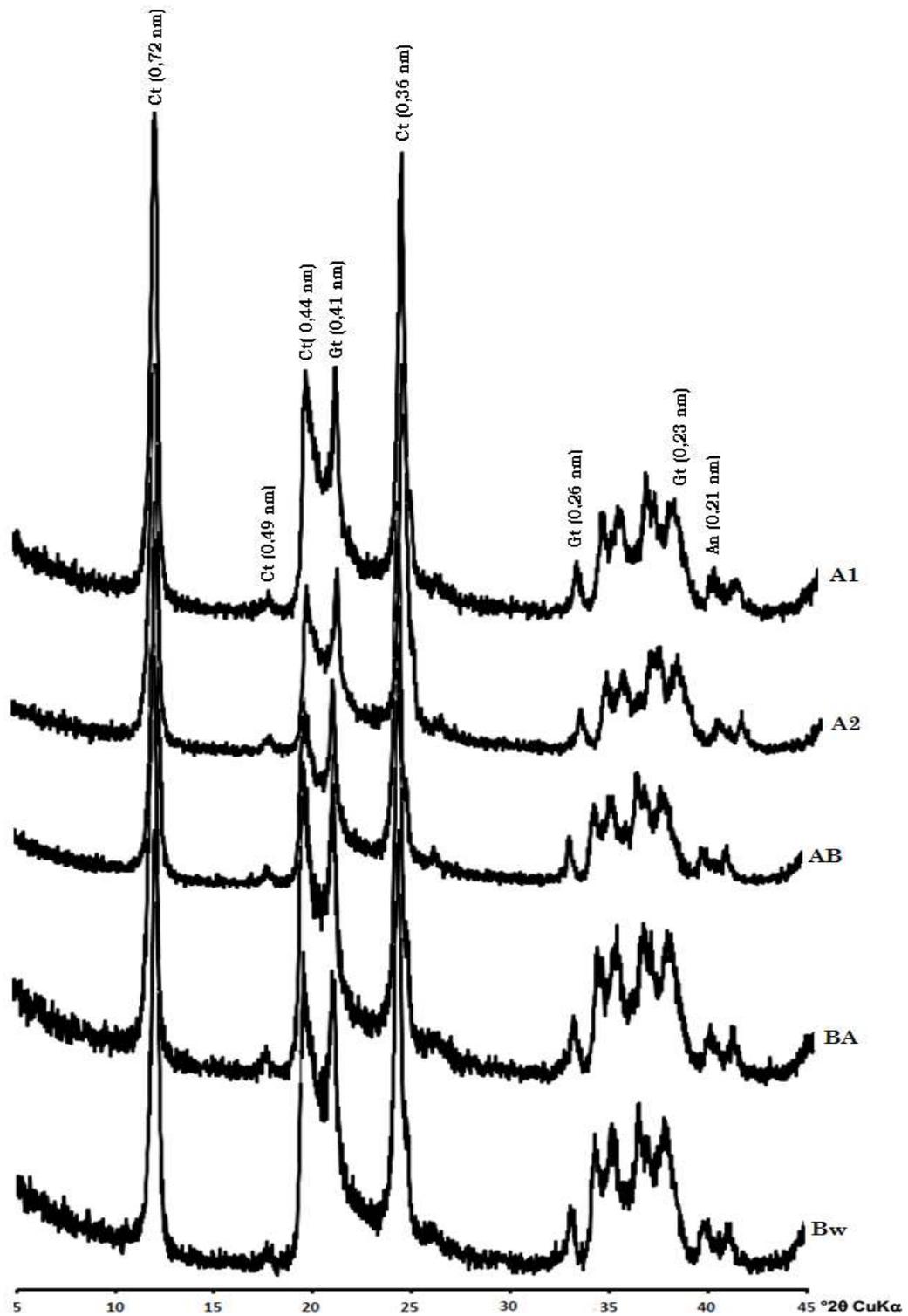


Figura 10 – Difractogramas de raios-X da fração argila não-orientada dos horizontes estudados no Latossolo Amarelo Distrófico típico – P4. (Ct-caulinita; An-anátasio; Gt-goethita).

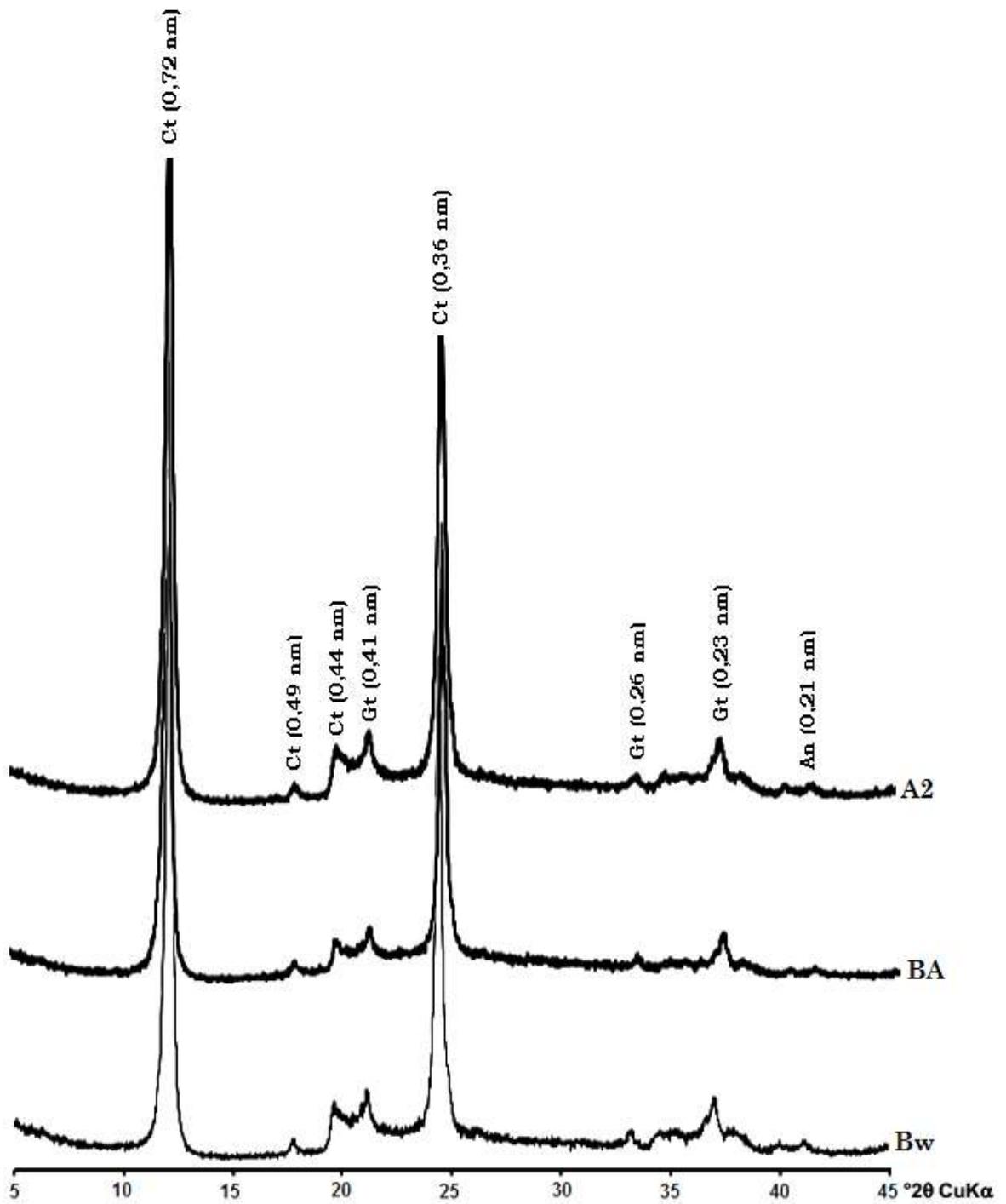


Figura 11 – Difractogramas de raios-X da fração argila orientadas dos horizontes estudados no Latossolo Amarelo Distrófico típico – P4. (Ct-caulinita; An-anátasio; Gt-goethita).

3.4 Micromorfologia do Solo

A análise micromorfológica foi realizada nos mesmos horizontes amostrados para as análises tomográficas (A2, BA e Bw) do Latossolo Amarelo Distrófico típico (P4), a fim de avaliar possíveis aspectos que contribuam para interpretação dos resultados da tomografia. As principais características micromorfológicas podem ser observadas na Tabela 5, segundo classificação de Brewer (1976) adaptada por Bullock et al (1985).

Tabela 5 – Principais características micromorfológicas das amostras do Latossolos Amarelo Distrófico típico (P4), segundo classificação de Brewer (1976) adaptada por Bullock et al (1985)

	A2	Bw
Fundo Matricial	Mat. Gros: 45% (maior que 60 µm) Mat. fino: 25% Poros: 30%	Mat. Gros.: 40% Mat. fino.: 30% Poros: 30%
Material Grosso	Composto por Quartzo - Qz (94%), nódulos de ferro (5%) e fragmentos de carvão (1%). Qz subang. a arred., mod. esf. a esf., mal selecionados.	Composto por Qz (97%) e nódulos de ferro (3%). Qz subang. a arred., mod. esf. a esf., mal selecionados.
Material fino	Isotrópico de comp. mineral, cor brunada, manchada por pontuações negras (frag. carvão).	Isotrópico de comp. mineral, cor amarela e límpida.
Poros	Empilhamento composto e cavidades. Intra-agregados presença de fissuras.	Empilhamento composto, raras cavidades. Intra-agregados presença de fissuras.
Microestrutura	Granular intergrânulos e blocos composto por coalescência de grânulos, mod. a forte pedalidade.	Granular, com forte pedalidade.
Distribuição relativa	Enáulica	Enáulica
Fábrica-b	Indiferenciada	Indiferenciada
Feições pedológicas	Excrementos biológicos em diferentes estágios de conservação, nódulos de ferro, fragmentos de raízes e carvões, pedorrelíquias como Qz com fraturas preenchidas por óxidos, e canais com preenchimento (ortotúbulo)	Excrementos biológicos em menor quant. e mais degradado que o A ₂ , nódulos de ferro, pedorrelíquias como Qz com fraturas preenchidas por óxidos.

O fundo matricial apresenta 45% de material grosseiro e 25% de material fino no horizonte superficial A2, enquanto no horizonte diagnóstico Bw há uma ligeira redução na proporção do material grosseiro (40%) e aumento do material fino (30%).

No material grosseiro destaca-se o predomínio do quartzo em ambos os horizontes (94% no A2; 97% no Bw). A forma dos grãos de quartzo varia de subangular a arredondado, moderadamente esférico a esférico. São grãos mal selecionados indicando a variedade de frações que o compõe. Também foi notada a presença de nódulos de ferro (5% no A2; 3% no Bw) conforme Figura 12d, que corrobora com os picos de goethita identificados no DRX.

Destaca-se ainda, que devido à situação do perfil sob uma capoeira em regeneração, observou-se a presença de fragmentos de carvão (1%) no horizonte superficial, o que pode denotar o uso do fogo em tempos pretéritos para o preparo da área para cultivo.

O material fino foi caracterizado como isotrópico de composição mineral, apresentando cor brunada em consonância com a descrição morfológica em campo, manchada por pontuações negras no horizonte superficial, identificadas como carvão. Por outro lado, em profundidade a coloração observada foi amarela e límpida, também sendo isotrópico de composição mineral.

As observações das lâminas delgadas demonstram que a porosidade se mantém na mesma proporção em profundidade nos horizontes estudados, em percentual de 30%. No horizonte superficial esses poros são de empilhamento complexo (arranjos estatísticos de poros, intercomunicantes ou não, cujas paredes correspondem às bordas entre grãos e pequenos agregados) e de cavidades (poros maiores frequentemente não intercomunicantes, arredondados, alongados ou irregulares), intra-agregados (reunião dos agregados em si, como fruto do mecanismo de agregação) com presença de fissuras; o horizonte diagnóstico apresenta as mesmas características, porém as cavidades são raras.

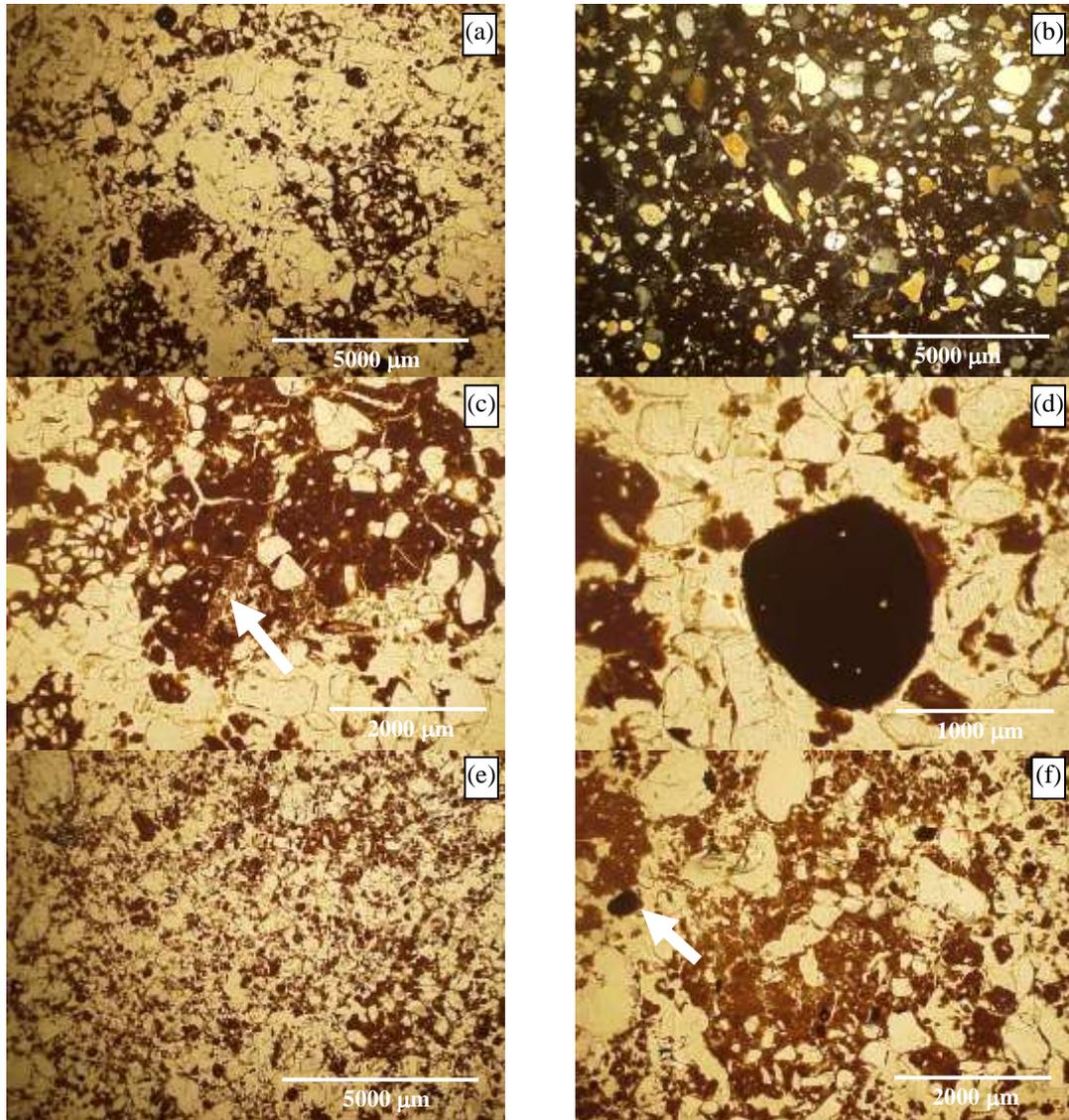


Figura 12 – Fotomicrografias dos horizontes A2 e Bw do Latossolo Amarelo Distrofíco típico (Perfil 04). (a) estrutura granular e microgranular do horizonte A2 em PPL; (b) imagem anterior em XPL; (c) estrutura em blocos formada pela coalescência de grânulos, com destaque para os excrementos biológicos (seta), horizonte A2 em PPL; (d) nódulo de ferro do A2 em PPL; (e) estrutura microgranular do Bw; (f) detalhe da estrutura granular, com destaque aos nódulos de ferro (seta).

A microestrutura é granular nos dois horizontes, apresentando blocos compostos por coalescência de grânulos (Figura 12a) apenas no horizonte superficial. O grau de pedalidade variou de moderado a forte no horizonte superficial, enquanto no horizonte diagnóstico foi classificada como forte

(mostrando individualização completa dos agregados com unidades subarredondadas separadas inteiramente por poros). Também em ambos os horizontes a distribuição relativa foi enáulica (distribuição onde os agregados de material fino apresentam-se dissociados do esqueleto, dispersos nos poros, mas sem preenchê-los) e a “fábrica” bi-refringente foi indiferenciada, não apresentando orientação específica; distinguindo-se do fundo matricial externo apenas pela concentração dos constituintes e pelos limites distintos.

Nas feições pedológicas foram observados excrementos biológicos/pelotas fecais (Figura 12c) em diferentes estágios de alteração, reduzindo a quantidade no horizonte mais profundo com maior grau de decomposição. Apenas no horizonte superficial foi identificados fragmentos de raízes e carvão, juntamente com canais com preenchimento (ortotúbulos). Por último, foram observadas pedorrelíquias (feições formadas em solo pré-existente, *in situ* ou submetido à erosão, transporte e sedimentação) como quartzos com fraturas preenchidas por óxidos; além de nódulos de ferro (Figura 12f) apenas no horizonte Bw.

Adicionalmente, algumas informações e micrografias relacionadas aos horizontes coesos amostrados, encontram-se nos anexos e foram retiradas do trabalho de Lima Neto et al. (2010).

3.5 Tomografia de Raios-X

3.5.1 Semivariogramas, Valores Médios da Atenuação de Raios-X e Variabilidade da Atenuação de Raios-X das Amostras (Total)

A apresentação dos dados em conjunto é feita porque tais parâmetros refletem bem a estrutura composição e distribuição espacial dos componentes.

Após teste e leitura do “script” do programa ImageJ® observou-se que os dados dos semivariogramas (Figura 13A, B, C; Figura 14A, B, C; Figura 15A, B, C; Figura 16A, B, C) são ajustados para o modelo teórico exponencial (a variância atinge o patamar gradativamente) e normalizado (a semivariância está numa escala de 0 a 1).

A interpretação visual dos semivariogramas indica uma anisotropia combinada, ou seja, tem diferentes patamares e diferentes alcances (Tabela 6).

Se tivesse mesmo alcance e diferentes patamares seria anisotropia zonal (o que não é comum em variáveis ambientais, como no caso deste estudo).

A anisotropia é uma característica muito frequente nos elementos da natureza, isto é, a variabilidade ou distribuição espacial de tais elementos ocorre mais intensamente numa direção e menos intensamente em outra direção (Camargo et al. 2001).

Não obstante, uma diferenciação pode ocorrer no eixo Z, que representa o sentido da profundidade do solo, devido à presença de materiais diferenciados (agregados de solo de composição mais adensada, nódulos ou concreções ferruginosas) ou mesmo material orgânico, atividade biológica ou ainda, a existência de poros interagregados.

Visualmente na Figura 13A, o eixo Z da amostra P01Cana_AB destaca-se dos demais; o mesmo é observado na figura Figura 14I, onde a amostra P03Mata_Btx1 apresenta o mesmo comportamento.

A análise conjunta dos gráficos de semivariograma, atenuação total e variabilidade da atenuação total de raios-X, bem como densidade do solo, porosidade total e teor de carbono orgânico contribui para refletir os diversos comportamentos observados (Tabela 6).

Os três componentes do solo (sólido, água e ar) especificamente contribuem para a atenuação total de raios – X em qualquer volume de solo. Existe uma relação linear entre o coeficiente de atenuação linear (μ) do solo e as três fases que o compõem (Rogasik et al, 2003)

No presente estudo, observa-se que a média de energia (em UH) da atenuação total de raios-x, que considera sólido, água e ar (Tabela 6), foi ligeiramente menor que a atenuação de raios-x na matriz do solo (melhor discutida no tópico a seguir), a parte não porosa - sólidos (Tabela 8), todavia a variabilidade dessas atenuações comportou-se de maneira inversa: sendo mais elevada na variabilidade da atenuação total de raios-x quando comparada com a variabilidade da atenuação na matriz do solo.

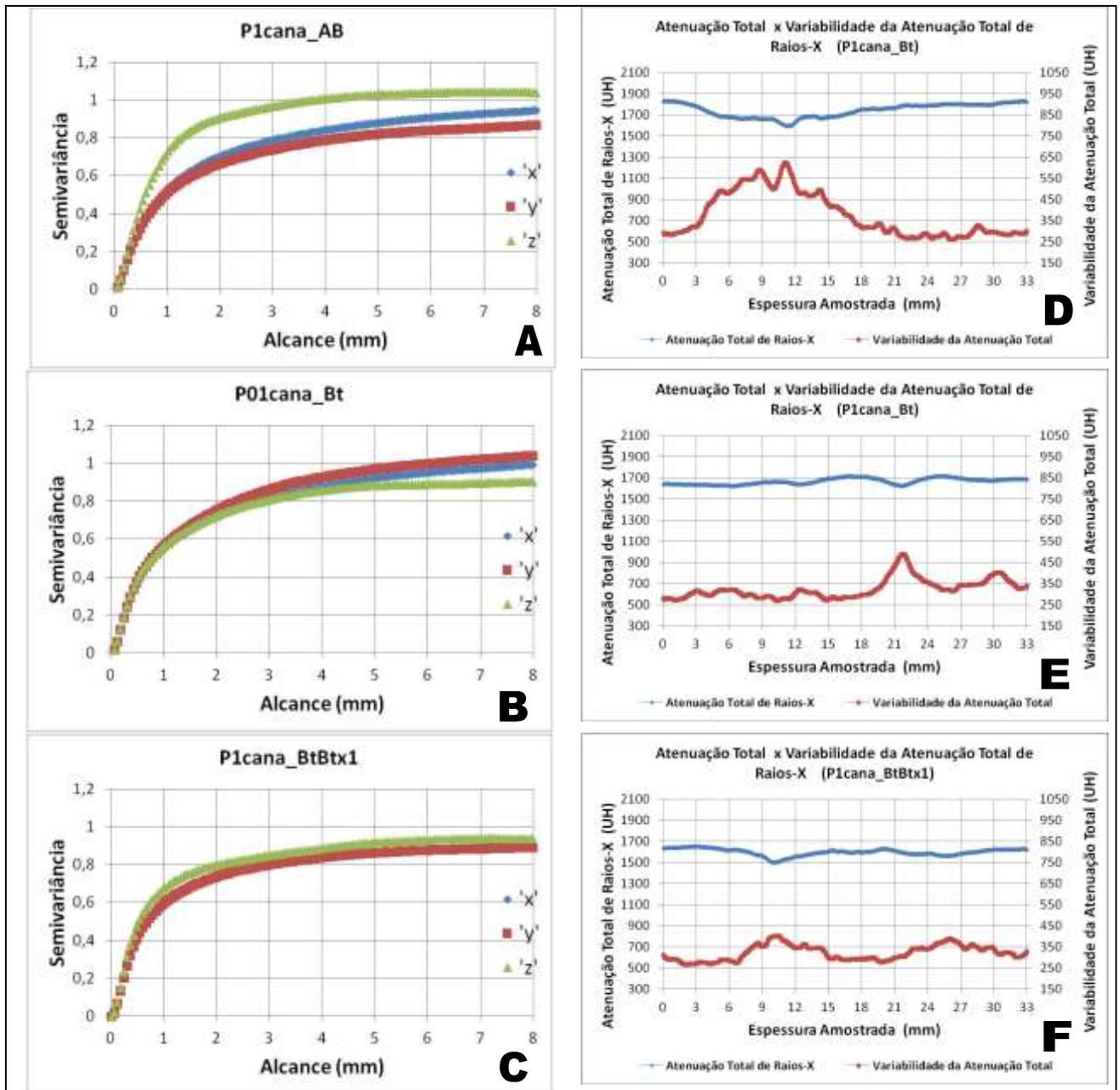


Figura 13 – A, B, C: Gráficos de semivariogramas (eixos “x”, em azul e “y”, em vermelho, representam a largura e comprimento das fatias da amostra; o eixo “z” em verde, representa a espessura amostrada); D, E, F: valores médios da energia de atenuação de Raios-X (linha azul) e variabilidade da Atenuação de Raios-X (linha vermelha), em Unidades Hounsfield (UH), das amostras do Argissolo Acinzentado Distrocioso fragipânico (P1), sob cana.

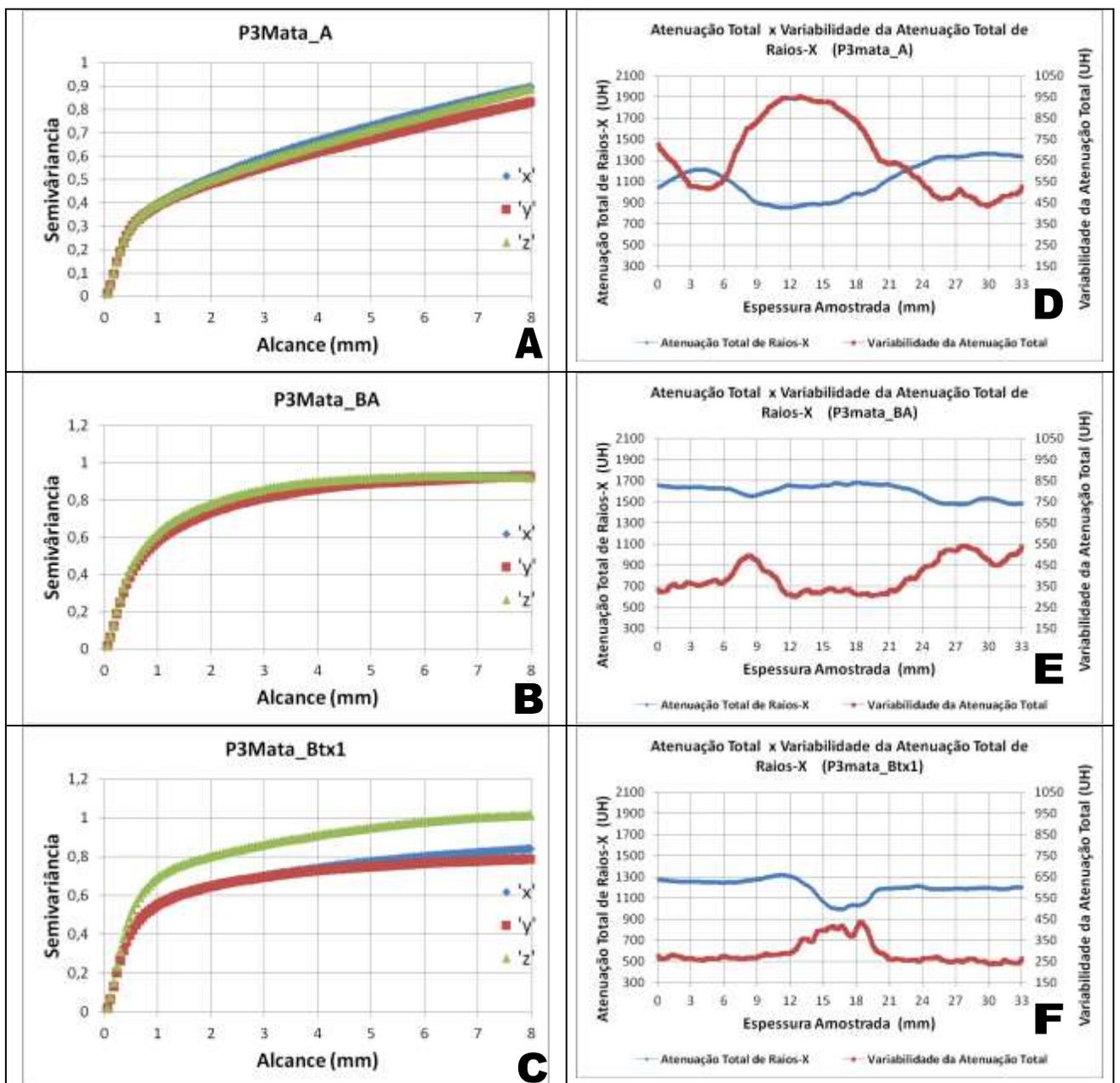


Figura 14 – A, B, C: Gráficos de semivariogramas (eixos “x”, em azul e “y”, em vermelho, representam a largura e comprimento das fatias da amostra; o eixo “z” em verde, representa a espessura amostrada); D, E, F: valores médios da energia de atenuação de Raios-X (linha azul) e variabilidade da Atenuação de Raios-X (linha vermelha), em Unidades Hounsfield (UH), das amostras do Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3), sob mata.

Assim, na Tabela 6 observa-se o patamar de 1,0 com alcance de 2,8mm para o eixo Z (P01Cana_AB); enquanto o eixo Z da amostra com P03Mata_Btx1 observa-se o mesmo patamar de 1,0; porém com alcance 4,1mm. No primeiro caso, vale lembrar que horizonte AB (P1) apresentou grau extremo de coesão nas análises morfológicas de campo. Além disso, associam-se tais resultados ao uso e manejo deste solo, onde o cultivo da cana-de-açúcar pode ter contribuído para essa diferenciação no eixo Z. A D_s está um pouco mais elevada ($1,45 \text{ g dm}^{-3}$) juntamente com o teor de carbono orgânico ($11,8 \text{ g kg}^{-1}$), quando comparados com os demais horizontes, a porosidade total é a mesma (46%). Tais atributos parecem contribuir para a variabilidade da atenuação total de raios-X neste horizonte, a maior média (375 Unidades Hounsfield - UH) dentre os demais horizontes do perfil.

Os valores médios da atenuação total corroboram com a afirmativa de que o uso do solo pode influenciar nas propriedades avaliadas pela tomografia, pois foram os mais elevados dentro do perfil (1742 UH), e mesmo entre os demais perfis estudados. Como já citado anteriormente, Silva (1996) afirma que através do estudo mineralógico e micromorfológico bem como análises físicas e morfológicas evidencia-se que solos coesos têm suas características (principalmente maior densidade) acentuadas pelo cultivo da cana-de-açúcar, pelo preenchimento dos poros com argila iluvial.

No segundo caso (P03Mata_Btx1), é possível que as características do horizonte fragipânico tenham influenciado na diferenciação do eixo Z, seja pela composição seja pela organização estrutural do material. Lima Neto et al. (2009) destaca que o horizonte fragipânico deste perfil (Argissolo Amarelo) apresenta uma D_s elevada ($1,43 \text{ g cm}^{-3}$) muito próxima ao do horizonte coeso. A argila dispersa em água (531 g kg^{-1}) foi bastante elevada e possui uma relação positiva com a resistência a penetração conforme citado por Corrêa et al (2008). Além disso, as análises mineralógicas demonstram que os teores de Fe_2O_3 obtidos pelo ataque sulfúrico (Tabela 8) no horizonte P03_Btx1 são muito mais elevados (o dobro) em relação ao P01_Bt/Btx1. Antecipando a discussão do tópico seguinte (atenuação dos sólidos), parece haver forte correlação entre os teores de ferro e as propriedades avaliadas pela tomografia. Segundo Ferreira et al. (1999), a

presença de óxidos de Al e Fe e a matéria orgânica tendem a desorganizar as partículas do solo em escala microscópica.

Tabela 6 – Valores médios dos Semivariogramas, Atenuação Total e Variabilidade de Raios-x relacionados com Ds, Poros e CO dos Solos as amostras estudadas

Horiz	Semivariograma						Atenuação Total	Variabilidade Aten. Total	Ds	Poros	C.O
	C	a	C	A	C	a					
	Eixo X		Eixo Y		Eixo Z						
Argissolo Acinzentado Distrocoeso fragipânico - P1 (cana-de-açúcar)											
AB	0,99	6,0	0,90	5,0	1,00	2,8	1742	375	1,45	46	11,8
Bt	1,00	6,0	1,00	5,9	0,91	3,3	1666	324	1,44	46	6,7
BtBtx1	0,91	4,0	0,91	4,0	0,94	2,9	1597	321	1,43	46	8,4
Latossolo Amarelo Distrocoeso típico - P2 (mata)											
AB	0,95	3,6	0,99	4,5	1,00	3,7	1420	489	1,38	48	17,2
BA	0,98	4,0	0,98	4,0	0,97	3,7	786	353	1,40	48	13
Bw2	0,95	2,3	1,00	3,0	0,96	2,5	996	405	1,27	52	6,7
Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico - P3 (mata)											
A	0,99	10,0	0,93	10,0	0,90	4,0	1115	669	1,28	52	18,6
BA	0,94	4,0	0,93	3,9	0,93	3,2	1598	396	1,45	46	10,8
Btx1	0,87	6,0	0,80	4,0	1,00	4,1	1198	289	1,43	52	9,6
Latossolo Amarelo Distrófico típico - P4 (mata)											
A2	0,97	2,3	0,99	2,6	1,00	2,5	701	355	1,35	51	14,8
BA	0,99	2,0	0,98	2,0	0,98	1,5	835	307	1,26	56	8,7
Bw	1,00	2,0	0,98	2,0	1,00	1,6	827	284	1,21	57	16,7

C: patamar; a: alcance (mm); Ds: densidade do solo; Poros: Porosidade Total; C.O: Carbono Orgânico

Em relação aos Latossolos, a composição mineralógica simplificada parecem contribuir para a pouca variação entre os semivariogramas apresentados (Figura 15A, B, C; Figura 16A, B, C). Em relação ao Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2), Lima Neto (2008) ressalta que os espectros de DRX sugerem grande homogeneidade na mineralogia das argilas, com predomínio da caulinita (Ct) em todos os horizontes. Da mesma forma, como comentado anteriormente a fração argila das amostras do Latossolo Amarelo Distrófico típico (P4) é constituída por caulinita, principalmente, e por goethita.

Nascimento (2001), estudando diversos Latossolos descreve a mineralogia de solos altamente intemperizados como predominantemente composta por filossilicatos 1:1 (caulinita, haloisita), oxi-hidróxidos de ferro

(hematita e goethita) e de alumínio (gibbista). O que Ker (1995) atribui as diferentes situações climáticas submetidas ao longo de sua formação.

Relacionando a atenuação total e a variabilidade da atenuação total de Raios-X observa-se, por meio dos gráficos (Figura 13D, E, F; Figura 15D, E, F; Figura 15 D, E, F; Figura 16 D, E, F) bem como dos valores dispostos na Tabela 6, que os níveis de energia nas classes (Argissolo e Latossolo) foram mais elevados e bastante variáveis dentro das amostras dos perfis com horizontes coesos (P1, P2, P3) quando comparados com as amostra do perfil não coeso (P4). Dentro dos níveis de organização pedológica adaptados por Castro (2008) a partir de Chauvel (1979), a organização estrutural desses solos tanto no aspecto da macroestrutura como da microestrutura tem forte influência sobre a atenuação e sua variabilidade.

Lima Neto et al. (2009) indicam que em condições naturais os solos coesos, apresentam uma fraca organização estrutural e são geralmente maciços. Silva e Ribeiro (1998) afirmaram que as camadas endurecidas observadas em Latossolos Amarelos dos tabuleiros costeiros do Espírito Santo devem-se ao acúmulo de partículas de argila oriundas dos horizontes superiores, as quais preencheriam poros (macro e microporos), aumentando a Ds e tornando o horizonte muito coeso e adensado.

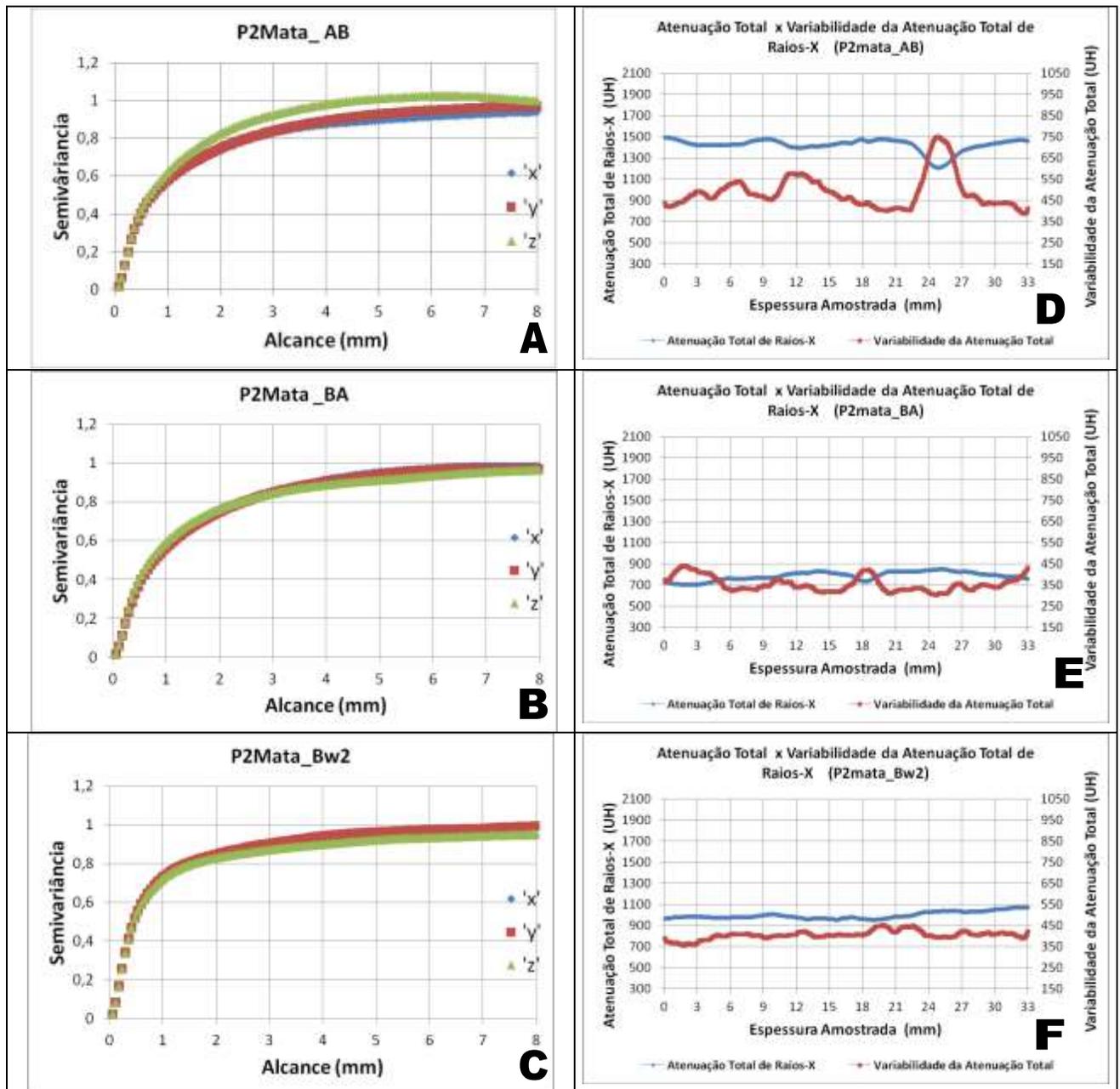


Figura 15 – A, B, C: Gráficos de semivariogramas (eixos “x”, em azul e “y”, em vermelho, representam a largura e comprimento das fatias da amostra; o eixo “z” em verde, representa a espessura amostrada); D, E, F: valores médios da energia de atenuação de Raios-X (linha azul) e variabilidade da Atenuação de Raios-X (linha vermelha), em Unidades Hounsfield (UH), das amostras do Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2), sob mata.

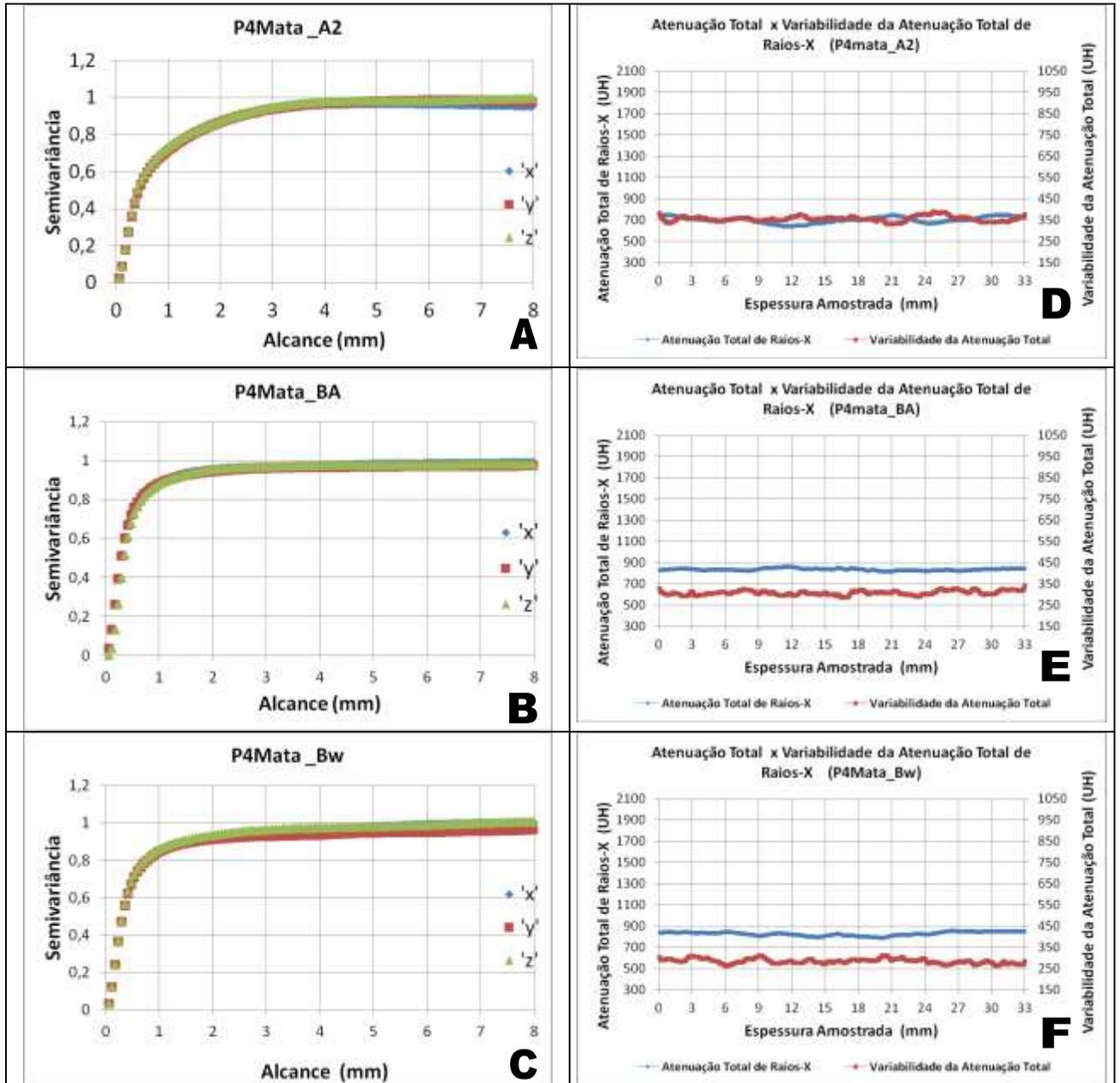


Figura 16 – A, B, C: Gráficos de semivariogramas (eixos “x”, em azul e “y”, em vermelho, representam a largura e comprimento das fatias da amostra; o eixo “z” em verde, representa a espessura amostrada); D, E, F: valores médios da energia de atenuação de Raios-X (linha azul) e variabilidade da Atenuação de Raios-X (linha vermelha), em Unidades Hounsfield (UH), das amostras do Latossolo Amarelo Distrófico típico (P4), sob mata.

Baseado nos conceitos relacionados a atenuação, entende-se que quanto maior a Ds será a quantidade de energia necessária para que o feixe de raios-x atravesse a amostra (Pires et al., 2010), estando os resultados encontrados de acordo com as características físicas dos solos estudados e a matriz de correlação entre a densidade do solo e a atenuação total de raios-x (Tabela 7).

Tabela 7 – Matriz de correlação entre Atributos Físicos e Químicos (Densidade do Solo, Porosidade Total e Carbono Orgânico) e a Atenuação Total e Variabilidade de Raios-x relacionados com as Amostras estudadas

	Ds	Poros	CarbOrg	AtenTot	VarAtenTot
Ds	1				
Poros	-0,88	1			
CarbOrg	-0,32	0,23	1		
AtenTot	0,70	-0,75	-0,29	1	
VarAtenTot	-0,13	-0,07	0,45	-0,03	1

A variabilidade da atenuação total via de regra refletiria os espaços vazios do solo, aqui considerado como porosidade, no entanto observa-se pela matriz de correlação (Tabela 7) que não há significância entre estas duas variáveis.

Por outro lado, há uma forte correlação inversa entre a porosidade e a atenuação de raios-x. Lima Neto et al. (2010) ressalta que as observações microscópicas das lâminas delgadas revelaram redução na porosidade dos horizontes coesos e diferenciações na geometria do espaço poroso. Os horizontes coesos apresentaram menor porosidade do que os não-coesos, confirmando as determinações físicas. De acordo com Cintra et al. (1999), uma das principais consequências negativas dos horizontes coesos é a diminuição no volume total de poros, já que a alteração na porosidade altera a atividade biológica, o movimento e a capacidade de retenção de água, bem como a sua disponibilidade para as plantas.

A variabilidade da atenuação total também poderia ser influenciada pela presença de matéria orgânica na amostra, que conforme comentada por

Pereira et al. (2006), é responsável pelo condicionamento físico do solo. Todavia, observa-se que não há uma correlação significativa entre a variabilidade da atenuação total de raios-x e os teores de carbono orgânicos determinados nas análises químicas (Tabela 7).

3.5.2 Atenuação Média de Raios-X e Variabilidade da Atenuação na Matriz do Solo

Na Tabela 8, são apresentados os valores de atenuação média de raios-x da parte sólida bem como sua variabilidade acompanhada dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ determinados pelo ataque sulfúrico na fração argila. Os valores de atenuação e variabilidade da atenuação dos sólidos acompanham as tendências observadas na atenuação total de raios-x.

Tabela 8 – Relação entre os resultados de Atenuação da Matriz dos Sólidos e Variabilidade de Raios-x com teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ obtidos por digestão sulfúrica total das Amostras estudadas

Horizonte	Análises Tomográficas		Digestão Sulfúrica Total				
	Atenuação Média (UH)*	Variabilidade da Atenuação (UH)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ki	Kr
			g Kg ⁻¹				
Argissolo Acinzentado Distrocoeso fragipânico - P1 (cana-de-açúcar)**							
AB	1853	206	182	158	4	1,96	1,93
Bt	1719	275	217	219	5	1,69	1,66
BtBtx1	1605	212	241	246	10	1,67	1,62
Latossolo Amarelo Distrocoeso típico - P2 (mata)**							
AB	1598	280	147	135	6	1,85	1,8
BA	897	217	186	202	10	1,56	1,52
Bw2	1128	277	192	220	11	1,49	1,44
Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico - P3 (mata)**							
A	1383	455	47	46	3	1,72	1,64
BA	1718	238	144	132	6	1,86	1,8
Btx1	1256	213	190	282	19	1,15	1,1
Latossolo Amarelo Distrófico típico - P4 (mata)							
A2	885	219	336	332	80	1,72	1,49
BA	982	249	327	342	80	1,63	1,41
Bw	895	234	333	337	80	1,68	1,46

*Unidade Hounsfield** teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Ki e Kr foram obtidos de Lima Neto et al. (2009)

De maneira geral, observa-se que os maiores valores de atenuação média dos sólidos foram para os solos coesos (P1, P2 e P3) em comparação ao não-coeso (P4). Na classe dos Argissolos, o P1 apresentou os maiores valores, em especial o horizonte mais superficial (Figura 18), variando entre 1750 – 2000 UH. Os demais horizontes deste perfil apresentaram variação entre 1500 – 1750 UH (Figura 17B, C). Quando comparado ao P3, um Argissolo Amarelo Distrocoeso, os valores de atenuação foram mais baixos no horizonte superficial (1250 – 1500 UH), aumentando no horizonte coeso BA (Figura 18E). De acordo com Fernandes et. al (2005), o coeficiente de atenuação depende da composição química do solo e da energia do feixe incidente, podendo ser obtido de forma experimental para tipo de solo e tomógrafo utilizado.

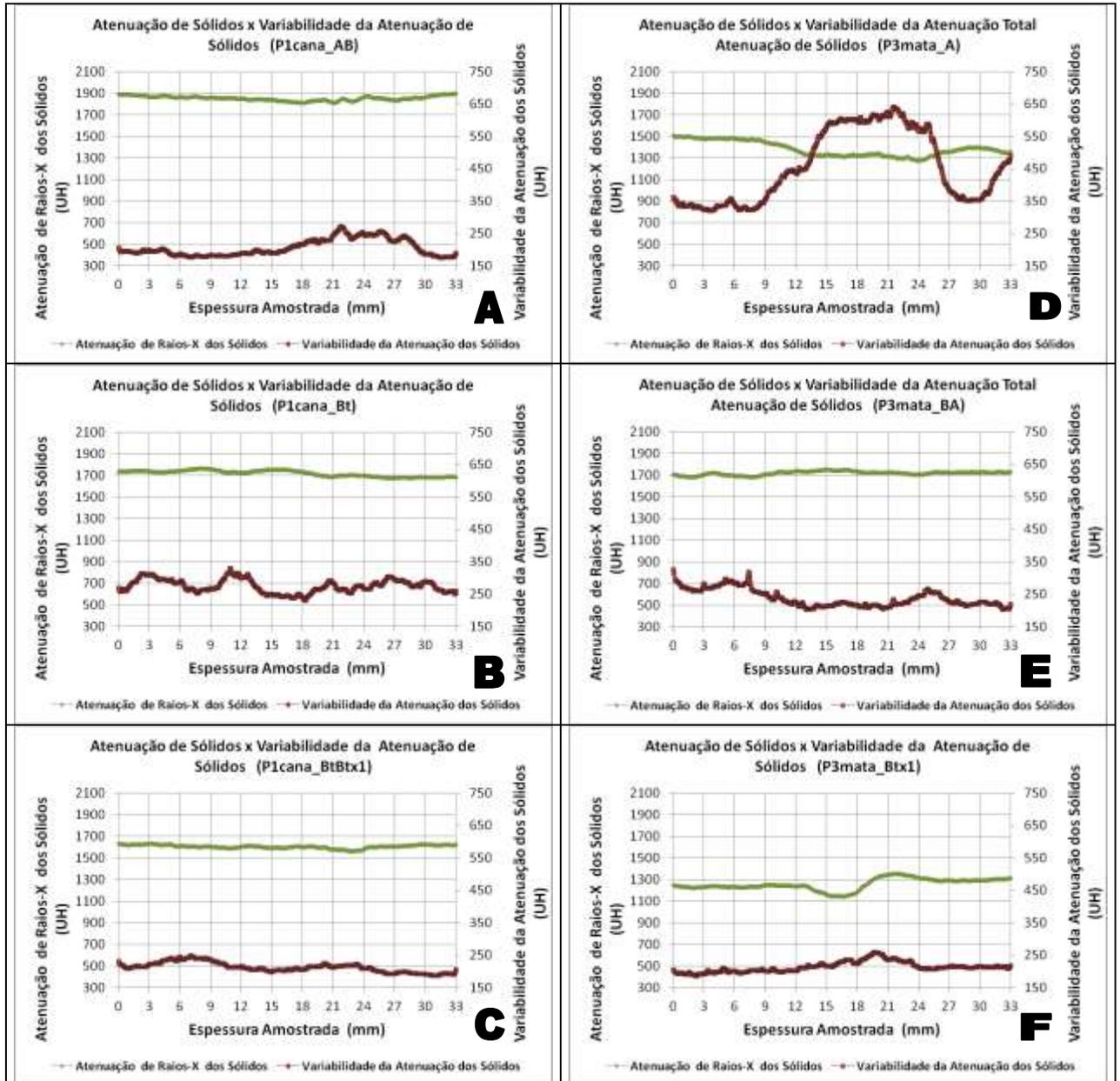


Figura 17 – Valores médios da energia de atenuação de Raios-X da matriz dos sólidos (linha verde) e variabilidade da Atenuação de Raios-X da matriz dos sólidos (linha marrom), em Unidades Hounsfield (UH). **A, B, C:** amostras do Argissolo Acinzentado Distrocoeso fragipânico (P1), sob cana-de-açúcar; **D, E, F:** amostras do Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3), sob mata.

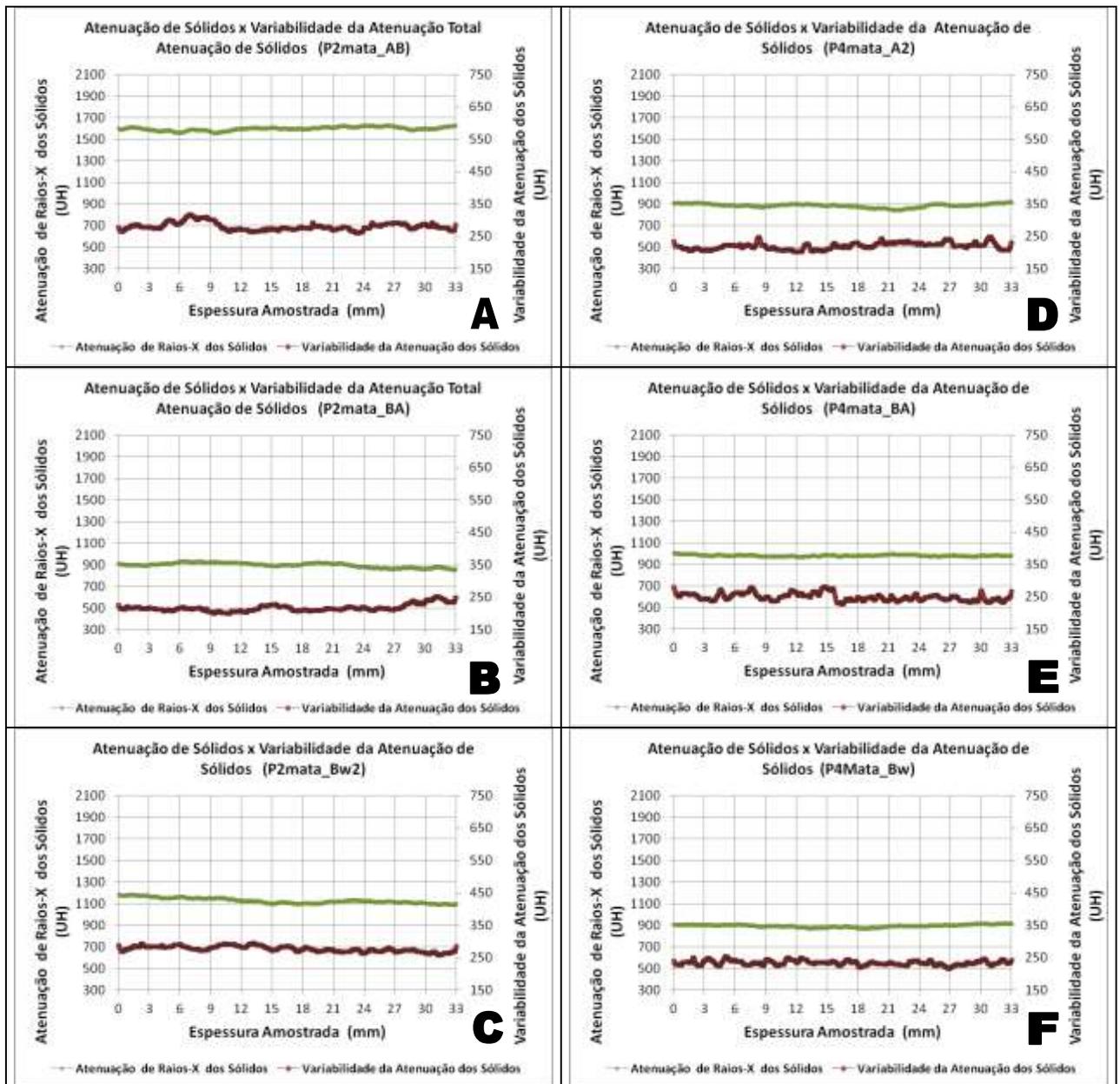


Figura 18 – Valores médios da energia de atenuação de Raios-X da matriz dos sólidos (linha verde) e variabilidade da Atenuação de Raios-X da matriz dos sólidos (linha marrom), em Unidades Hounsfield (UH). **A, B, C:** amostras do Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2), sob mata; **D, E, F:** amostras do Latossolo Amarelo Distrófico típico (P4), sob mata.

A fim de contribuir com o entendimento dos resultados encontrados, foram feitas correlações dos dados apresentados de forma a identificar o grau de influência dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , índices Ki e Kr sobre a atenuação e variabilidade da atenuação na matriz do solo.

Observa-se que os teores de ferro parecem interferir fortemente (correlação inversa) na atenuação média das amostras estudadas (Tabela 9), podendo-se afirmar que à medida que aumentam os seus teores reduz-se a energia de atenuação.

Tabela 9 – Matriz de correlação entre resultados de Atenuação da Matriz dos Sólidos e Variabilidade de Raios-x com Atributos Mineralógicos das Amostras estudadas

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Ki	Kr	AtenSol	VarAtenSol
SiO_2	1						
Al_2O_3	0,94	1					
Fe_2O_3	0,85	0,81	1				
Ki	-0,11	-0,41	-0,09	1			
Kr	-0,37	-0,63	-0,43	0,93	1		
AtenSol	-0,54	-0,62	-0,71	0,47	0,68	1	
VarAtenSol	-0,53	-0,53	-0,22	0,099	0,12	0,051	1

Essa influência dos teores de Fe_2O_3 da amostra sobre a atenuação é bem traduzido pelos valores de atenuação de sólidos que foram mais baixos nas amostras do P4; as quais apresentaram os maiores teores de ferro (Figura 17D, E, F; Tabela 8).

Os teores de Al_2O_3 parecem também influenciar a atenuação de raios-X, como confirmado por meio de uma correlação inversa moderada (Tabela 9), porém em menor proporção que o Fe_2O_3 . Entretanto, o SiO_2 apresenta uma fraca correlação com a atenuação de raios-x da matriz dos sólidos, corroborada diante da variação dos dados observados (Tabela 8).

Carvalho et al (2011) indica que os óxidos de Fe e de Al são importantes na agregação do solo, uma vez que, sendo considerados agentes desorganizadores em nível microscópico, com aumento dos seus teores, as partículas tendem a um arranjo mais casualizado e a estrutura tende a granular, influenciando as propriedades físicas do solo. Apesar de influenciar a

energia de atenuação de raios-x, os teores de ferro não parecem estar ligados diretamente a variabilidade da atenuação, tendo em vista a fraca correlação observada entre as variáveis. No entanto, os teores de alumínio e silício parecem estar correlacionados de maneira negativa (ainda que moderadamente) com a variabilidade, onde o aumento de ambos implica na redução da variabilidade da atenuação.

3.5.3 Porosidade Total Detectável da Imagem

A função “Analyze Particles” do ImageJ® foi utilizada para obter dados relacionados com os poros em cada fatia analisada. Didaticamente os poros foram separados de acordo com seu tamanho, circularidade e inclinação, ajudando na interpretação dos dados. Todavia, aqui serão apresentadas e discutidas apenas a porosidade total da imagem, chamada de porosidade total detectável.

Comparativamente, os maiores valores de porosidade detectável foram observados nos horizontes superficiais e subsuperficiais coesos e não coesos dos perfis sob mata em ambas as classes de solos estudadas (Figura 19 e Figura 20, Tabela 10).

Conforme Lima Neto et al. (2010), o estudo micromorfológico das lâminas delgadas do Latossolo Amarelo Distrocoeso (P2) mostra poros interagregados do tipo empilhamento complexo (60%) e cavidades arredondadas (40%) no horizontes AB (com 30% de porosidade) enquanto no BA (20% de porosidade), os poros são interagregados do tipo cavidades arredondadas (20%); canais (10%) e fissuras (70%). Já no Argissolo Amarelo Distrocoeso (P3), os poros do horizonte AB (30% de porosidade) apresentam-se como interagregados do tipo empilhamento complexo (80%) e cavidades subarredondadas com tamanho médio de 1,14 mm; por sua vez o horizonte BA (30% porosidade) apresenta poros interagregados do tipo empilhamento complexo (60%) e cavidades subarredondadas com tamanho médio de 0,76 mm. No caso do Latossolo Amarelo Distrófico (P4), a porosidade foi de 30%

representada por poros do tipo Empilhamento composto e cavidades. Intra-agregados presença de fissuras no horizonte A2.

Downuona et al. (2009) estudando porosidade por TCX em Argissolos de Gana, também indicou que os horizontes superficiais eram mais porosos. Os autores enumeraram alguns dos principais fatores responsáveis pela diferença no volume total de vazios (poros) dos solos estudados como a distribuição e desenvolvimento de raízes, atividade de organismos, textura do solo e grande número de fragmentos de rocha.

Tabela 10 - Distribuição percentual (φ %) e coeficiente de variação (C.V %) da porosidade total detectável nos horizontes de perfis de solos coesos e não-coesos sob diferentes usos (mata e cana-de-açúcar)

Amostra	φ %	CV		φ %	CV
Argissolo Acinzentado Distrocoeso fragipânico - P1(CANA)			Latossolo Amarelo Distrocoeso típico - P2 (MATA)		
P01canaAB	9	21	P02mataAB	12	16
P01canaBt	8	15	P02mataBA	11	15
P01canaBtBx1	10	16	P02mataBw2	11	12
Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico - P3 (MATA)			Latossolo Amarelo distrófico típico - P4 (MATA)		
P03mataA	14	27	P04mataA2	20	9
P03mataBA	10	30	P04mataBA	21	4
P03mataBtx1	5	44	P04mataBw	9	11

Também contribui para este resultado a diversidade de organismos vivos ligados a estes solos, responsáveis diretamente pela geração e decomposição de material orgânico nos diversos níveis de organização destes ambientes, assim como, estar associado a diversidade dos sistemas radiculares que exploram estes solos. No presente trabalho, observa-se pelo estudo micromorfológico das lâminas delgadas no perfil P4 (Latossolo Amarelo Distrófico), excrementos biológicos em diferentes estágios de conservação presença de ortotúbulos; pelotas fecais, ortotúbulos e fragmentos de raízes também foram observados por Lima Neto et al. (2010) nas amostra dos perfis coesos sob mata aqui estudados (P2 e P3).

Observa-se ainda que nos perfis sob mata, a porosidade total detectável diminui em profundidade, o que pode ser associada às características físicas do solo, em especial a textura, associada com a diminuição da exploração do

sistema radicular em profundidade. O mesmo resultado foi observado por Downuona et al. (2009), que associaram a textura mais fina do solo como responsável por esse fato.

No caso do perfil sob cultivo de cana, ocorrem o inverso, havendo um aumento, ainda que discreto, da porosidade em profundidade; tal resultado está fortemente associado ao uso da área com emprego de máquinas e implementos agrícolas normalmente provocam a compactação do solo em subsuperfície (chamado “pé-de-arado”).

Os perfis de Latossolos (Figura 20) apresentaram os maiores percentuais de porosidade detectável quando comparados aos Argissolos (Figura 19), acompanhando a tendência observada em estudos de porosidade total do solo. Em relação ao Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2) e o Latossolo Amarelo distrófico típico (P4) – ambos sob Mata – observamos claramente a influência do caráter coeso bem como das condições de formação do solo, influenciam na porosidade detectável do P2 em relação ao P4, formado em outra condição completamente diferente (Chapada do Araripe) e sem qualquer indicio de coesão. O P4 apresentou porcentagens de porosidade detectável (em torno de 20%) muito mais elevadas que o P2 (em média 11 %).

A porosidade detectável, por si só, não dá subsídios para a diferenciação dos solos coesos e não coesos. Ela permite a percepção por meio da análise gráfica da redução da porosidade nas imagens analisadas. É possível que o estudo do formato desses poros, por outro lado, dê mais subsídios para tal diferenciação; todavia com os estudos preliminares desenvolvidos neste trabalho não foi possível uma exploração mais a fundo dos dados nesse sentido.

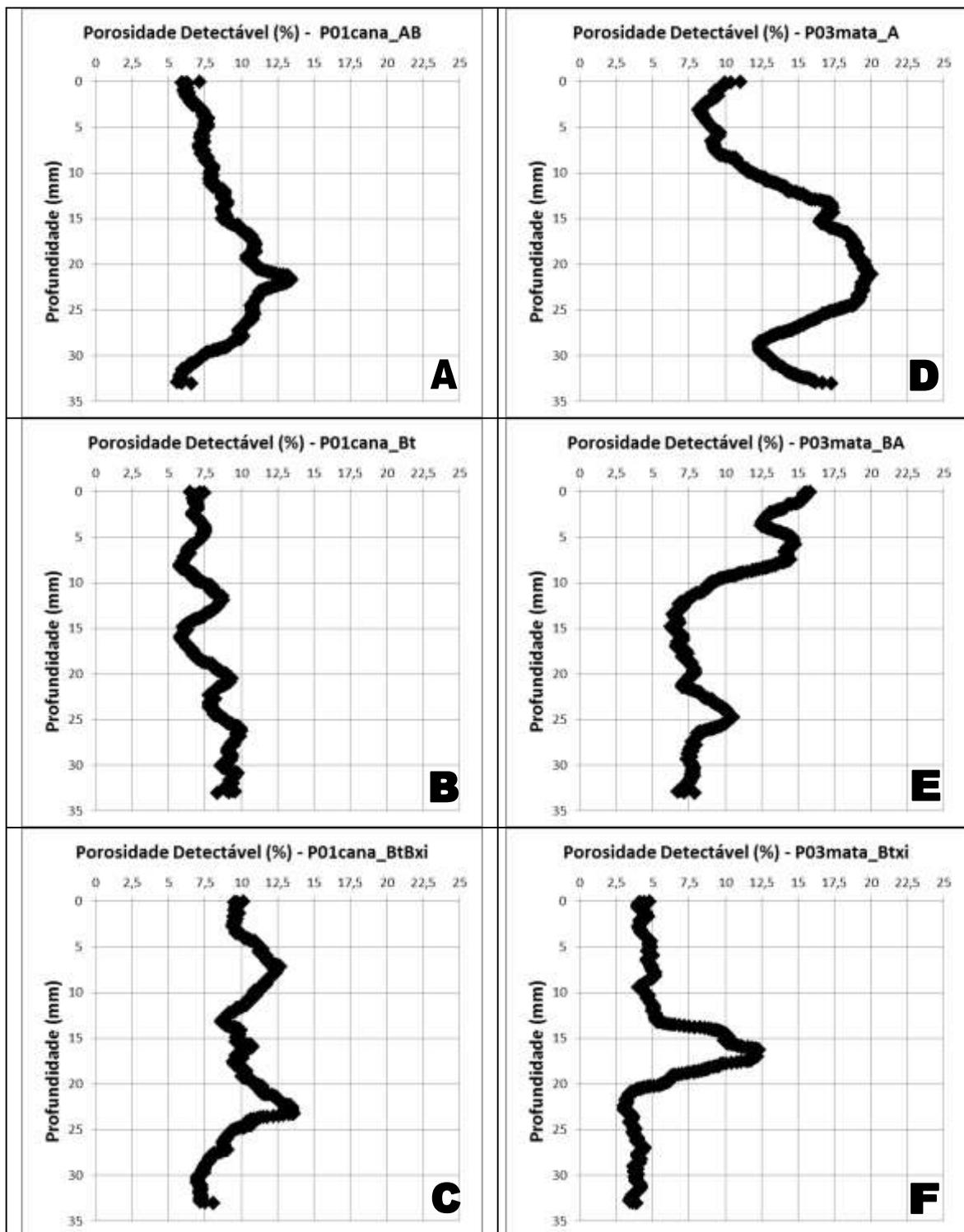


Figura 19 – Porosidade total Detectável dos perfis de Argissolos estudados. **A, B, C:** Argissolo Acinzentado Distrocoeso fragipânico (P1) sob cana-de-açúcar; **D, E, F:** Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3), sob mata.

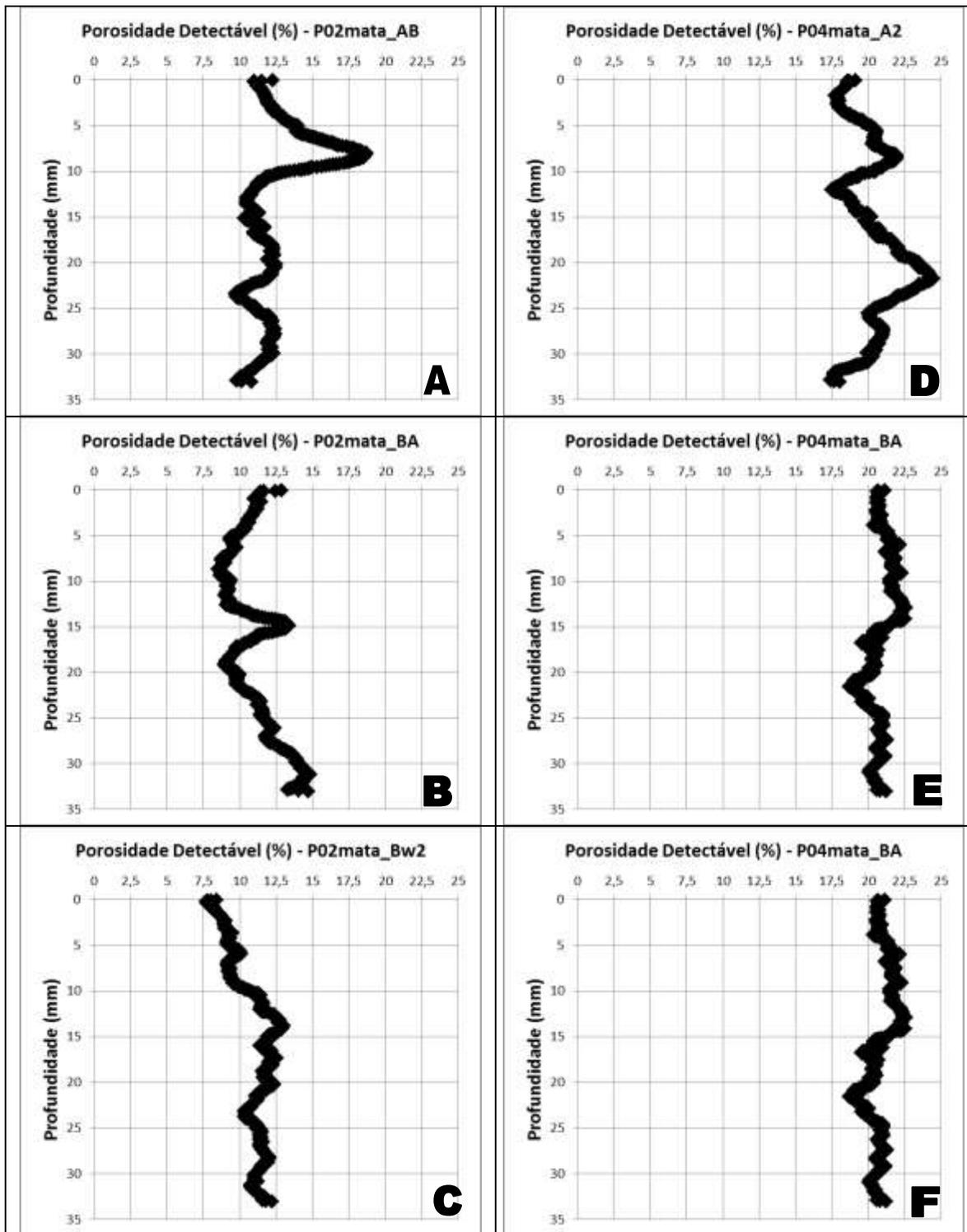


Figura 20 – Porosidade total Detectável nos perfis de Latossolos estudados. A, B, C: Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2); D, E, F: Latossolo Amarelo distrófico típico (P4); ambos sob mata.

Cavalcanti e Lopes (1994) destacam que os Latossolos da Chapada do Araripe apresentam-se profundos, bem drenados e de boas condições físicas. Tais afirmações ajudam a entender a maior porosidade observada nesse estudo para tais amostras.

Esses resultados de porosidade detectável observados estão de acordo com as análises micromorfológicas realizadas nas amostras deste estudo. Conforme Lima Neto et al. (2010), as observações microscópicas das lâminas delgadas revelaram redução na porosidade (de 20 para 10%) dos horizontes coesos e diferenciações na geometria do espaço poroso; que na sua maioria apresentou-se em forma de fissuras e poros interagregados do tipo empilhamento complexo, estando a distribuição do material fino organizada como porfírica, onde as partículas maiores distribuem-se numa matriz de material bem mais fino. Já no P4, as observações microscópicas das lâminas delgadas demonstram que a porosidade se mantém na mesma proporção em profundidade nos horizontes estudados, em percentual de 30%, os poros são de empilhamento complexo e de cavidades. As fissuras foram apenas observadas intragregados.

Destaca-se ainda que, em nenhuma das situações, os perfis de Latossolos apresentaram percentagens de porosidade detectável menores que 8,5%, reforçando que a característica de mudança textural em profundidade nos Argissolos implica no possível aumento da D_s e redução da porosidade detectável total. Todavia, curiosamente, o horizonte diagnóstico (Bw) de ambos os perfis apresentam porosidade detectável muito semelhantes, sendo passível de investigações mais profundas no futuro.

Os menores percentuais de porosidade detectável nos solos coesos também podem ser explicados por Ribeiro (2001b), que destacou que os horizontes com caráter coeso não apresentam uma organização estrutural visível (são maciços), motivo pelo qual os grandes torrões se quebram em fragmentos de tamanhos menores e angulosos. Apresentam uma macroporosidade geralmente ligada à atividade biológica (biovazios), sendo difícil a observação dos poros finos.

O perfil de Argissolos Acinzentado cultivado com cana-de-açúcar apresentou menores percentuais de porosidade detectável (Figura 19A, B, C). Também observou-se que a porosidade foi mais homogênea neste perfil em relação aos perfis sob mata. Carvalho et al. (2011), indicam uma intensa degradação da qualidade física do solo pelo tráfego de máquinas de forma repetitiva durante o ciclo da cana

Isso induz a mudanças no comportamento das partículas dos agregados do solo, ocasionando a deterioração de sua estrutura provocando, assim, o processo de compactação do solo, evidenciado por alterações nos valores de vários atributos, como D_s , resistência mecânica à penetração, porosidade total, porosidade de aeração, armazenagem e disponibilidade de água às plantas, dinâmica de água na superfície e no seu perfil, assim como na consistência e na máxima compactabilidade do solo.

Também a D_s e os atributos morfológicos observados em campo vem corroborar com estes resultados, principalmente no horizonte coeso do Argissolo Acinzentado que apresentou os maiores de D_s entre os horizontes coesos dos perfis estudados ($1,62 \text{ t m}^{-3}$), e uma estrutura maciça coesa, com consistência extremamente dura.

Papadopoulos et al. (2009) quantificando aspectos físicos de estrutura de solo associado a práticas de manejo orgânico por meio de imagens tomográficas demonstraram que o manejo de matéria orgânica nestes solos também implementou o aumento da porosidade, principalmente de poros menores favorecendo o desenvolvimento de raízes.

No horizonte Btx1 do Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3) sob mata e Bt/Btx1 do Argissolo Acinzentado Distrocoeso fragipânico (P1) sob cana-de-açúcar a variação da porosidade detectável está fortemente associada ao horizonte fragipânico, inclusive apresentando os menores valores. Os fragipãs da região costeira do Nordeste Brasileiro são similares aos horizontes endurecidos das regiões áridas; distinguem-se, contudo, por estarem presentes em áreas de alta pluviosidade ($1.500 \text{ a } 2.000 \text{ mm ano}^{-1}$) e por um teor de argila nitidamente maior, tendo sua formação nas áreas de depressão associadas a migração do ferro (Filizola et al., 2001). Apresenta-se endurecido quando seco

e é aparentemente cimentado, tendo então consistência dura, muito dura ou extremamente dura; quando úmido, o fragipã tem uma quebradiceza fraca a moderada e seus elementos estruturais ou fragmentos apresentam tendências a romperem-se subitamente, sob pressão (EMBRAPA, 2006).

3.5.4 Avaliação da Tomografia como Ferramenta na Distinção das Classes de Solos Estudadas

A partir dados obtidos e já discutidos anteriormente (semivariogramas, atenuação e variabilidade tanto total como em sólidos bem como a porosidade total detectável) das análises de imagem foi feito um estudo estatístico para testar se todas essas variáveis serviriam como parâmetros para a distinção entre as classes dos solos estudados independente dos demais resultados das análises morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas determinadas no campo e no laboratório. Assim, optou-se pela construção de uma base de dados como todos os perfis estudados aplicando a técnica estatística da Análise Discriminante.

Inicialmente, fez-se o estudo da probabilidade por meio da função discriminante linear de Fisher (Figura 21). Todavia pode-se observar que a distinção entre as classes estudadas não ficou clara, apresentando um valor de desvio (dados não apresentados) muito elevado.

Segundo Kitani (2007) a análise de imagens sempre mostrou-se complexa dada as características de alta dimensionalidade dos dados e o baixo número de exemplos do conjunto de dados, dessa forma aplicação direta do análise de discriminantes linear é evitada optando-se por outros modelos.

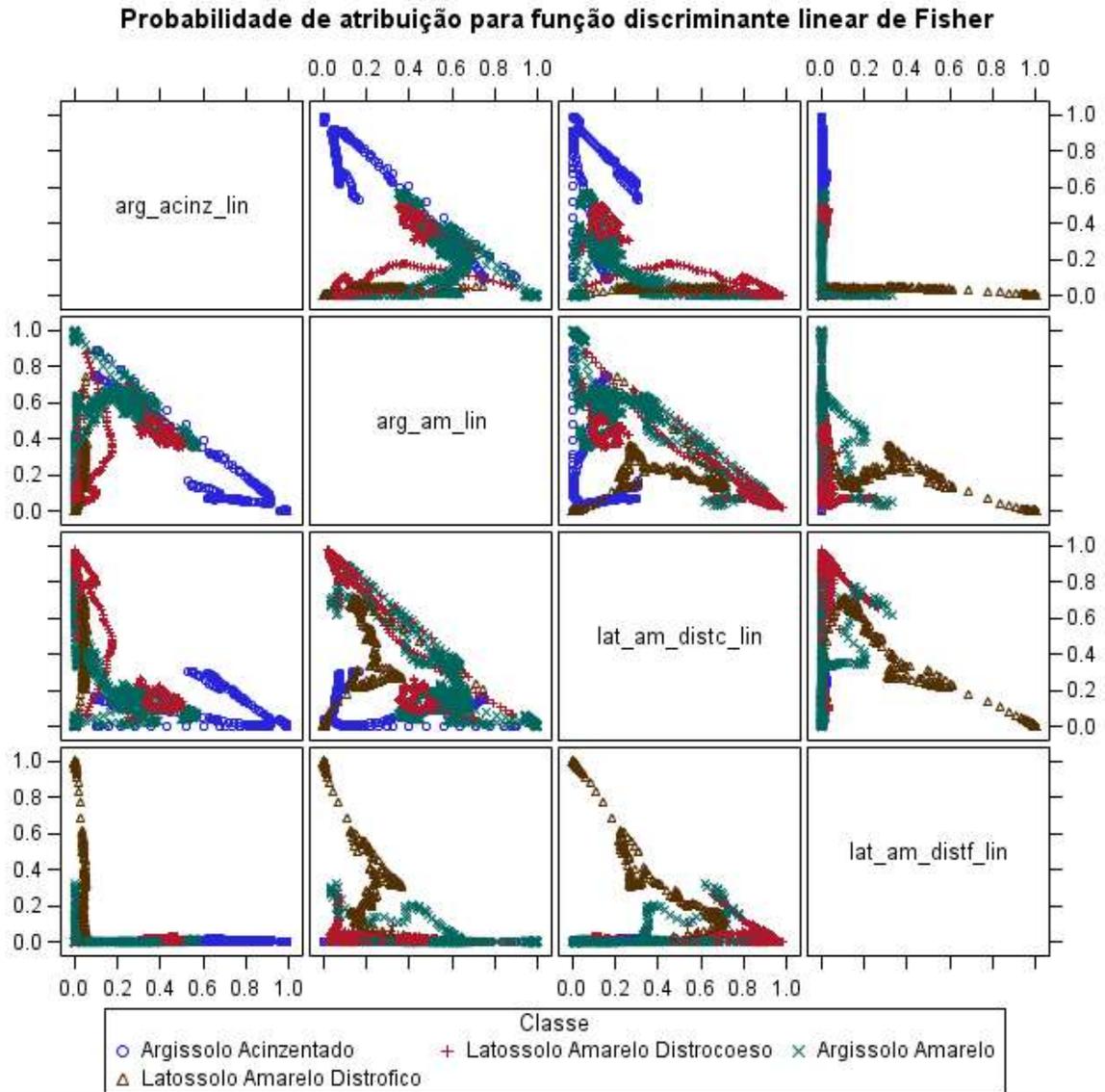


Figura 21 – Estudo da probabilidade por meio da função discriminante linear de Fisher para distinção dos perfis dentro da classificação de solos vigente baseada nos propriedades obtidas por tomografia computadorizada.

Para os casos em que as populações se distribuíam normalmente, mas possuíam diferentes matrizes de covariâncias, Smith (1947) provou que as funções discriminantes quadráticas eram mais adequadas, significando que a superfície discriminadora era uma quádrlica no espaço p-dimensional. Por meio de dois exemplos numéricos, para os quais foram calculados os dois tipos de funções discriminantes – linear (considerando-se a variância comum) e quadrática (sem considerar variância comum) – comprovou-se que a

quadrática era mais adequada apresentando a melhor discriminação com probabilidade de erro menor que a função linear.

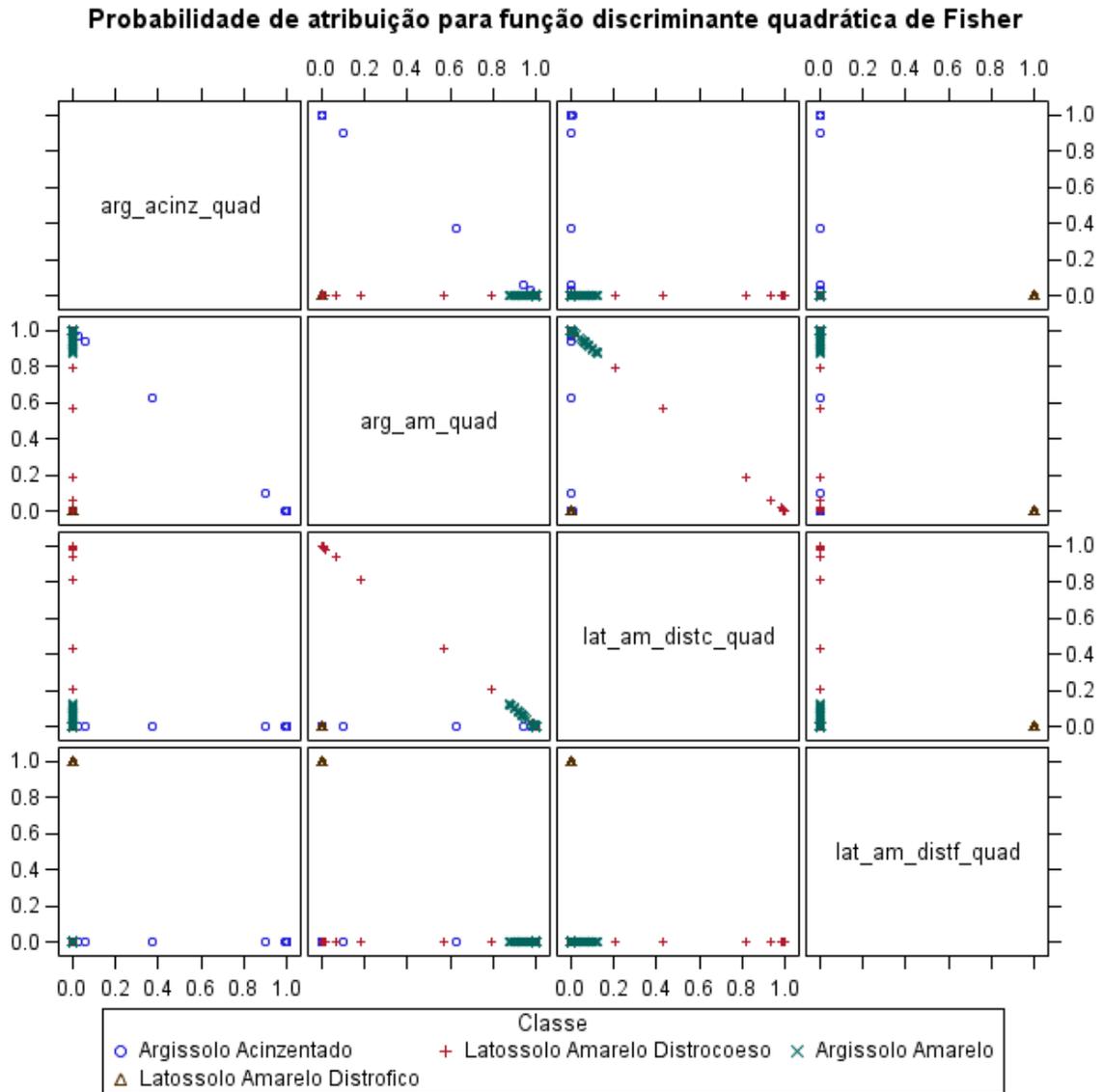


Figura 22 – Estudo da probabilidade por meio da função discriminante quadrática de Fisher para distinção dos perfis dentro da classificação de solos vigente baseada nos propriedades obtidas por tomografia computadorizada.

Assim, na Figura 22, é possível perceber que os parâmetros analisados pela tomografia são suficientes para separar (distinguir) os perfis dentro das classes de solos estudadas, de forma altamente significativa, através da análise discriminante quadrática de Fisher.

A função discriminante quadrática trata de um procedimento bastante útil nas ciências agrárias, como, por exemplo, em estudos nas áreas de solos, cultivos diversos, criação de animais e classificação e seleção de madeiras; porém, subutilizada frente à dificuldade de programas computacionais de fácil manuseio e acesso a pesquisadores das áreas de ciências aplicadas (Simeão, 2007).

Conforme Benites et al. (2010), a análise multivariada é importante ferramenta para a análise exploratória de dados de solos, permitindo o agrupamento de amostras segundo sua similaridade e ainda permitindo a seleção de variáveis de maior importância na discriminação de grupos pré-selecionados. No caso do presente estudo, não foi feito nesse primeiro momento uma análise mais aprofundada para determinar qual/quais propriedades avaliadas pela tomografia seriam mais importantes na discriminação dos grupos.

Como citado anteriormente, não foram encontrados trabalhos que utilizassem a TCX associada a estudos de classificação do solo. O presente trabalho, tendo em vista a proposta de avaliar essa técnica como uma forma de complemento para estudos de classificação de solos, principalmente aqueles que apresentam horizontes coesos, demonstra que a TCX constitui-se como uma ferramenta a mais nesses estudos.

3.5.5 Influência do uso do solo avaliada por Tomografia Computadorizada de Raios-X (TCX) em Solos Coesos

A partir dos resultados obtidos com a TCX, propôs-se avaliar a influência do uso do solo. Dessa forma, para os dois perfis de solos coesos sob mata (Latosolos Amarelo Distrocoeso típico – P2 e; Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico – P3) foram retiradas duas amostras (horizonte superficial e subsuperficial) em mini trincheiras, próximas ao perfil descrito, sob cultivo de cana-de-açúcar para estudo comparativo.

Os semivariogramas, valores médios da atenuação total de raios-x e

variabilidade da atenuação total de raios-x dos horizontes AB e BA (P2 sob mata) e A e BA (P3 sob mata) foram apresentados nas figuras Figura 13 (pag. 79) e Figura 14 (pag. 80); podendo ser comparados com as figuras Figura 23 e Figura 24 (a seguir), que se referem às amostras ApAB e BA (P2 sob cana) bem como os horizontes e Ap e BA (P3 sob cana).

Em relação aos semivariogramas, observa-se que os mesmos estão ajustados para o modelo teórico exponencial (Figura 23A, B; Figura 24A, B). Da mesma forma a análise visual dos semivariogramas permite classifica-los como de anisotropia combinada, que como já citado anteriormente é uma característica bastante frequente em elementos da natureza (Camargo et al. 2001).

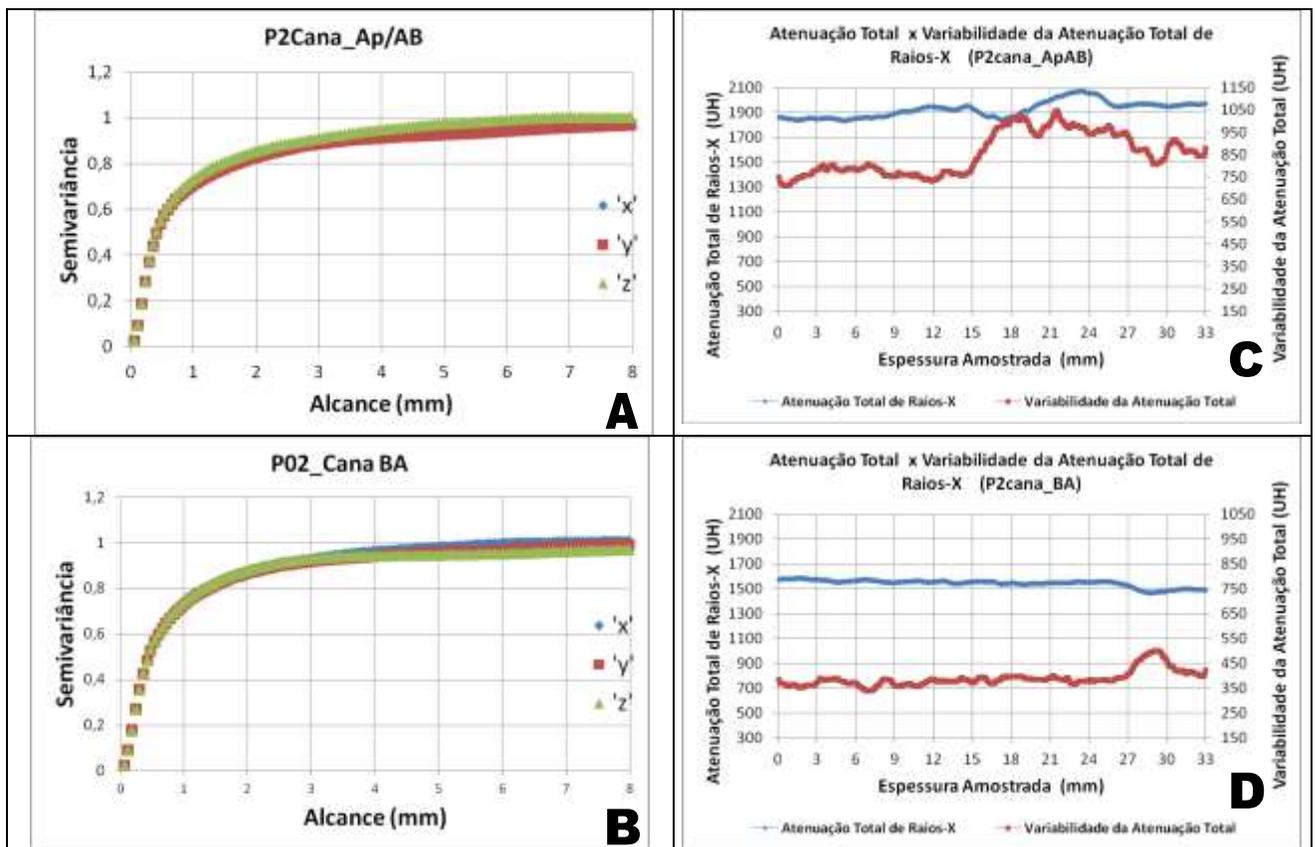


Figura 23 – A, B: Gráficos de semivariogramas (eixos “x”, em azul e “y”, em vermelho, representam a largura e comprimento das fatias da amostra; o eixo “z” em verde, representa a espessura amostrada); **C, D:** valores médios da energia de atenuação de Raios-X (linha azul) e variabilidade da Atenuação de Raios-X (linha vermelha), em Unidades Hounsfield (UH), das amostras do Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2), sob cana-de-açúcar.

Na observação geral dos semivariogramas nota-se que não há qualquer diferenciação no eixo de Z (que representa o sentido da profundidade do solo), demonstrando aparentemente a ausência de materiais diferenciados como agregados ou concreções ferruginosas que pudessem influenciar tal eixo.

Conforme a Tabela 11, observa-se que os patamares e alcances no eixo Z pouco variaram quando comparados entre as classes (Latosolos e Argissolos) e os usos (mata e cana).

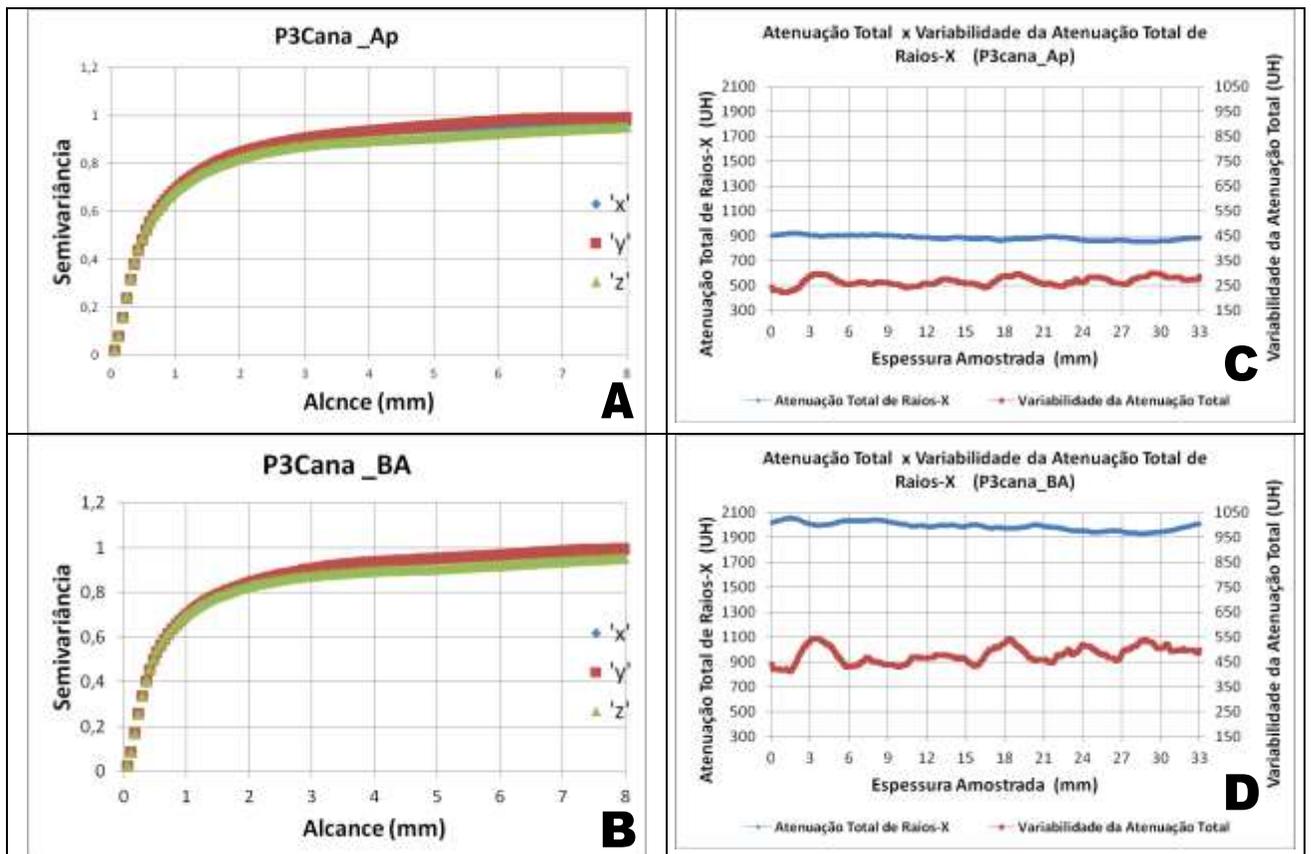


Figura 24 – A, B: Gráficos de semivariogramas (eixos “x”, em azul e “y”, em vermelho, representam a largura e comprimento das fatias da amostra; o eixo “z” em verde, representa a espessura amostrada); **C, D:** valores médios da energia de atenuação de Raios-X (linha azul) e variabilidade da Atenuação de Raios-X (linha vermelha), em Unidades Hounsfield (UH), das amostras do Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3), sob cana-de-açúcar.

Por outro lado, é nos valores de atenuação total de raios-x e variabilidade da atenuação total de raios-x que se observa a influência do uso dos solos. Nos horizontes superficiais sob cultivo de cana (Figura 23A; Figura 24A), os valores foram mais elevados (1926 UH no ApAB do Latossolo Amarelo

SOUZA, R. V. C. C. de. Caracterização micromorfológica por tomografia...

– P2 e ; 1988 UH no Ap do Argissolo Amarelo – P3) quando comparados aos horizontes superficiais sob mata nativa (1420 UH no A do Latossolo Amarelo – P2 e ; 1115 UH no A do Argissolo Amarelo – P3), figuras Figura 13A (pag. 79) e Figura 14A (pag. 80). Estando também a variabilidade da atenuação mais elevada quando comparada as duas situações.

Com isso, é possível reafirmar o uso do solo pode influenciar nas propriedades avaliadas pela tomografia, tendo em vista que anteriormente foi observado que o perfil P1 sob cultivo de cana-de-açúcar até então tinha apresentado os valores de atenuação mais elevados quando comparados com os demais.

Tabela 11 - Valores médios dos semivariogramas, atenuação e variabilidade da atenuação total de raios-x, atenuação e variabilidade da matriz dos sólidos

Perfil	Horiz	Semivariograma						Atenuação Total (UH)*	Var. da Aten. Total (UH)	Aten. Matiz dos Sólidos (UH)	Var. da Aten. Matiz dos Sólidos (UH)
		C	a (mm)	C	a (mm)	C	a (mm)				
		Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Média	Média	Média				
Latossolo Amarelo Distrocoeso típico - P2											
P02 (mata)	AB	0,95	3,6	0,99	4,5	1,00	3,7	1420	489	1598	280
P02 (mata)	BA	0,98	4,0	0,98	4,0	0,97	3,7	786	353	897	217
P02 (cana)	ApAB	1,00	3,0	0,99	3,0	1,00	3,1	1926	855	2184	604
P02 (cana)	BA	1,01	2,6	1,00	2,9	0,97	2,4	1543	389	1652	278
Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico - P3											
P03 (mata)	A	0,99	10,0	0,93	10,0	0,90	4,0	1115	669	1383	455
P03 (mata)	BA	0,94	4,0	0,93	3,9	0,93	3,2	1598	396	1718	238
P03 (cana)	Ap	0,99	3,0	1,00	3,0	0,96	2,7	1988	478	2136	312
P03 (cana)	BA	0,99	2,7	1,00	3,0	0,96	2,6	834	246	964	174

C: patamar; a: alcance (mm); UH: Unidade Hounsfield.

Conforme Maia e Ribeiro (2004), estudando as propriedades de um Argissolo Amarelo fragipânico sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar, o uso

do solo alterou morfologicamente o horizonte superficial, desenvolvendo um horizonte Ap, e modificou a estrutura dos dois primeiros horizontes do perfil; aumentando a microporosidade e reduzindo significativamente a condutividade hidráulica dos horizontes superficiais.

Os valores da atenuação média de raios-X na matriz do solo (parte sólida) acompanhou a tendência anterior e também foi muito mais elevada nos horizontes superficiais sob cultivo. Como constatado anteriormente, os maiores valores de atenuação média dos sólidos são mais elevados nos solos coesos em comparação ao não-coeso; conforme a Tabela 11 o uso do solo acentua esses valores.

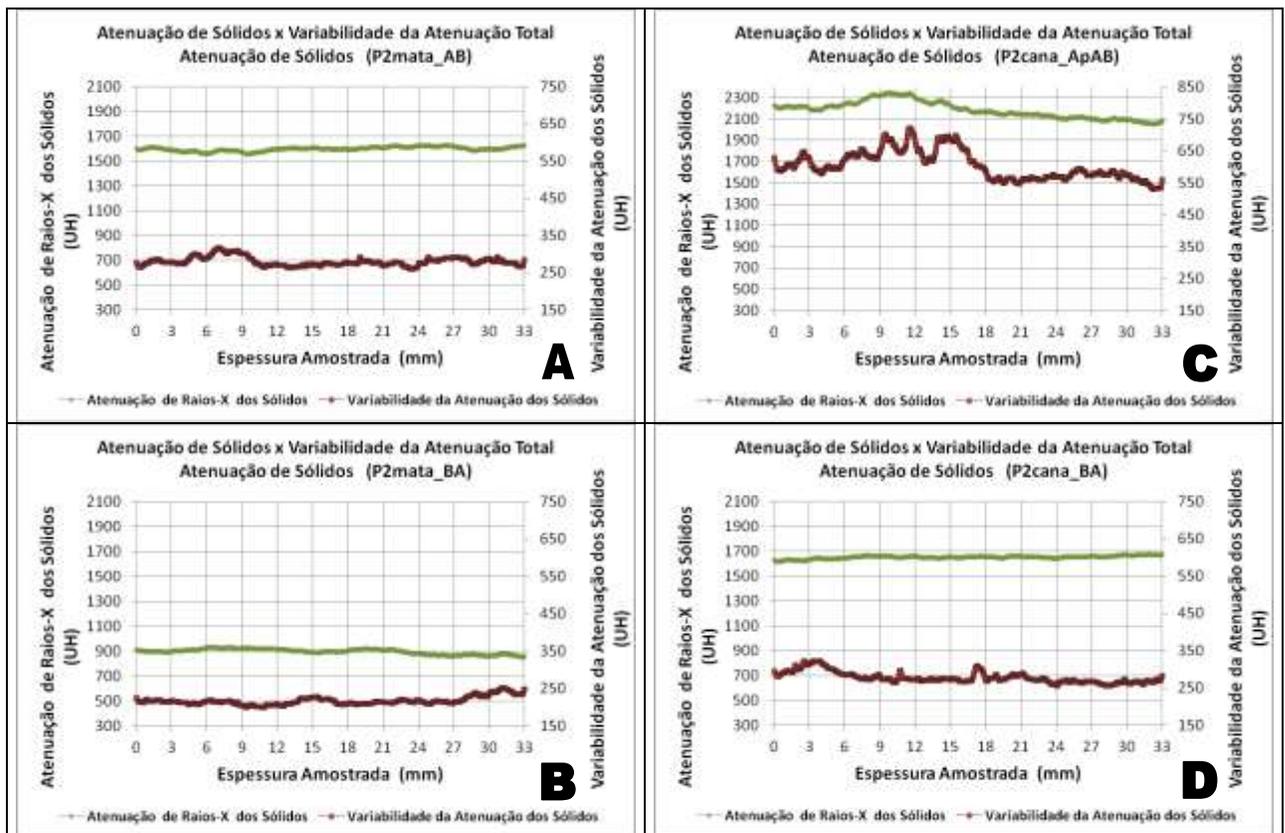


Figura 25 – Valores médios da energia de atenuação de Raios-X da matriz dos sólidos (linha verde) e variabilidade da Atenuação de Raios-X da matriz dos sólidos (linha marrom), em Unidades Hounsfield (UH). **A, B:** amostras do Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2), sob mata; **C, D:** amostras do Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2), sob cana-de-açúcar.

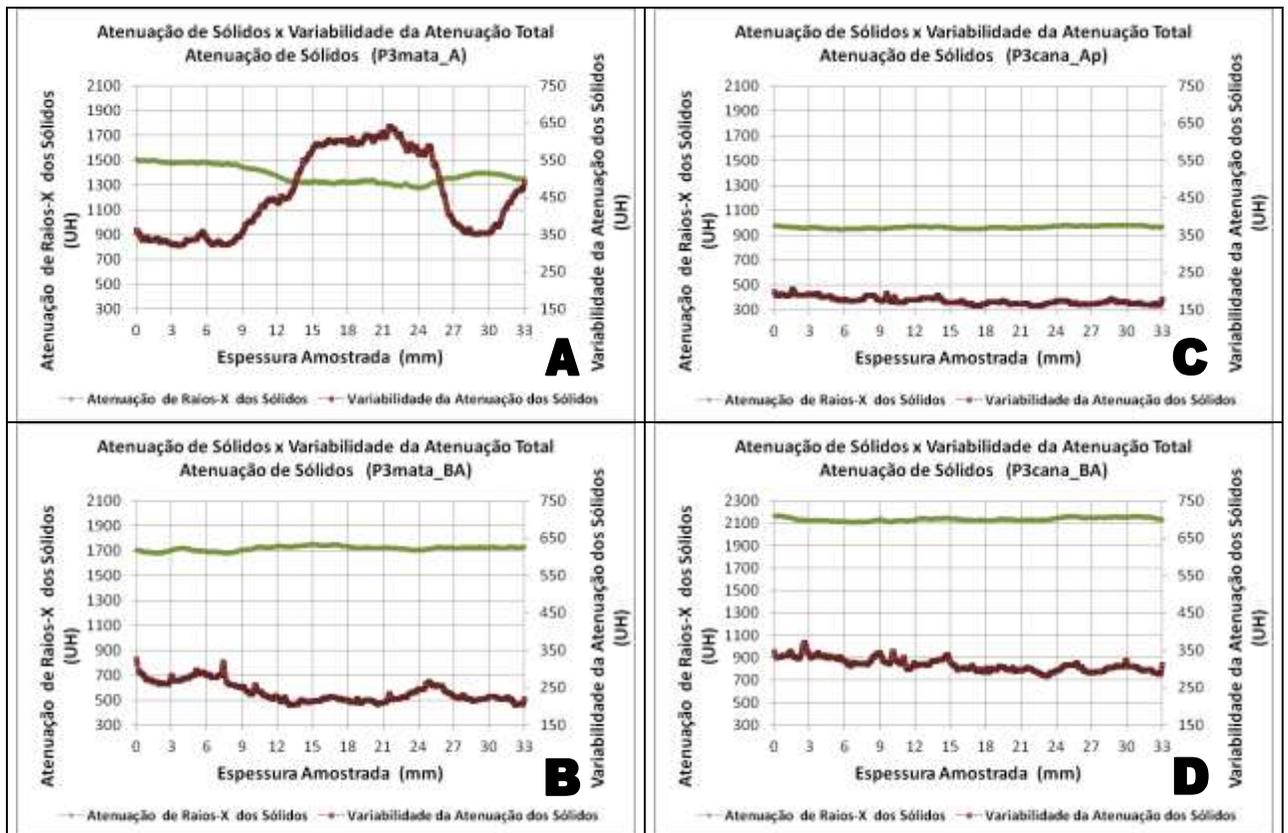


Figura 26 – Valores médios da energia de atenuação de Raios-X da matriz dos sólidos (linha verde) e variabilidade da Atenuação de Raios-X da matriz dos sólidos (linha marrom), em Unidades Hounsfield (UH). **A, B:** amostras do Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3), sob mata; **C, D:** amostras do Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3), sob cana-de-açúcar.

O perfil P2 (Latosolo Amarelo) sob cana, apresentou os maiores valores, em especial o horizonte mais superficial ApAB (Figura 25C), com 2184 UH. O horizonte subsuperficial (BA) deste perfil apresentou valor de 1652UH (Figura 25D). Quando comparado ao Argissolo Amarelo Distrocoeso (P3), os valores de atenuação de sólidos foram ligeiramente mais baixos no horizonte superficial (2136 UH), reduzindo consideravelmente no horizonte coeso BA (Figura 26A, B). Todavia, a variabilidade da atenuação dos sólidos foi menor quando comparada com a variabilidade da atenuação total (Tabela 11).

Por conseguinte, avaliando a porosidade detectável da imagem novamente observa-se que sob cultivo de cana-de-açúcar, os horizontes apresentam um percentual menor (10%) quando comparados aos horizontes sob mata nativa (de 10 – 14%), independente da classe de solo; destacando-se ainda a pouca variação da porosidade em profundidade dentro de cada perfil (Tabela 12).

Tabela 12 – Distribuição percentual (ϕ %) e coeficiente de variação (C.V %) da porosidade total detectável nos horizontes de perfis de solos coesos sob diferentes usos (mata e cana-de-açúcar).

Amostra	ϕ %	CV		ϕ %	CV
Latossolo Amarelo Distrocoeso típico - P2			Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico - P3		
P02mataAB	12	16	P03mataA	14	27
P02mataBA	11	15	P03mataBA	10	30
P02canaApAB	10	11	P03canaAp	10	15
P02canaBA	10	10	P03canaBA	10	15

Cintra (2001) discutindo sobre a distribuição de raízes de citrus em horizontes coesos destaca que 90% do sistema radicular encontra-se nos primeiros 40 centímetros de profundidade e, que mais grave ainda foi constatar que 61% do total do sistema radicular está concentrado nos primeiros 20 centímetros.

No Latossolo Amarelo (P2), os horizontes sob mata apresentaram o percentual ligeiramente mais baixo (11-12%) com pouca variação (15%) em profundidade (Figura 27A, B). Já o Argissolo Amarelo (P3) sob mata, apresentou porosidade entre 10 – 14%, porém com maior variação (27-30%) dentro dos horizontes analisados (Figura 28A, B).

Lima Neto (2008), destaca que nos perfis sob vegetação primária, foi observado um ligeiro aumento na presença de raízes nos horizontes coesos em relação aos perfis cultivados com cana, devido ao maior poder de penetração e da presença de raízes pivotantes nas espécies da vegetação primária. O autor acrescenta ainda que, o sistema radicular fasciculado da cana-de-açúcar apresenta pouca capacidade de penetração no horizonte coeso.

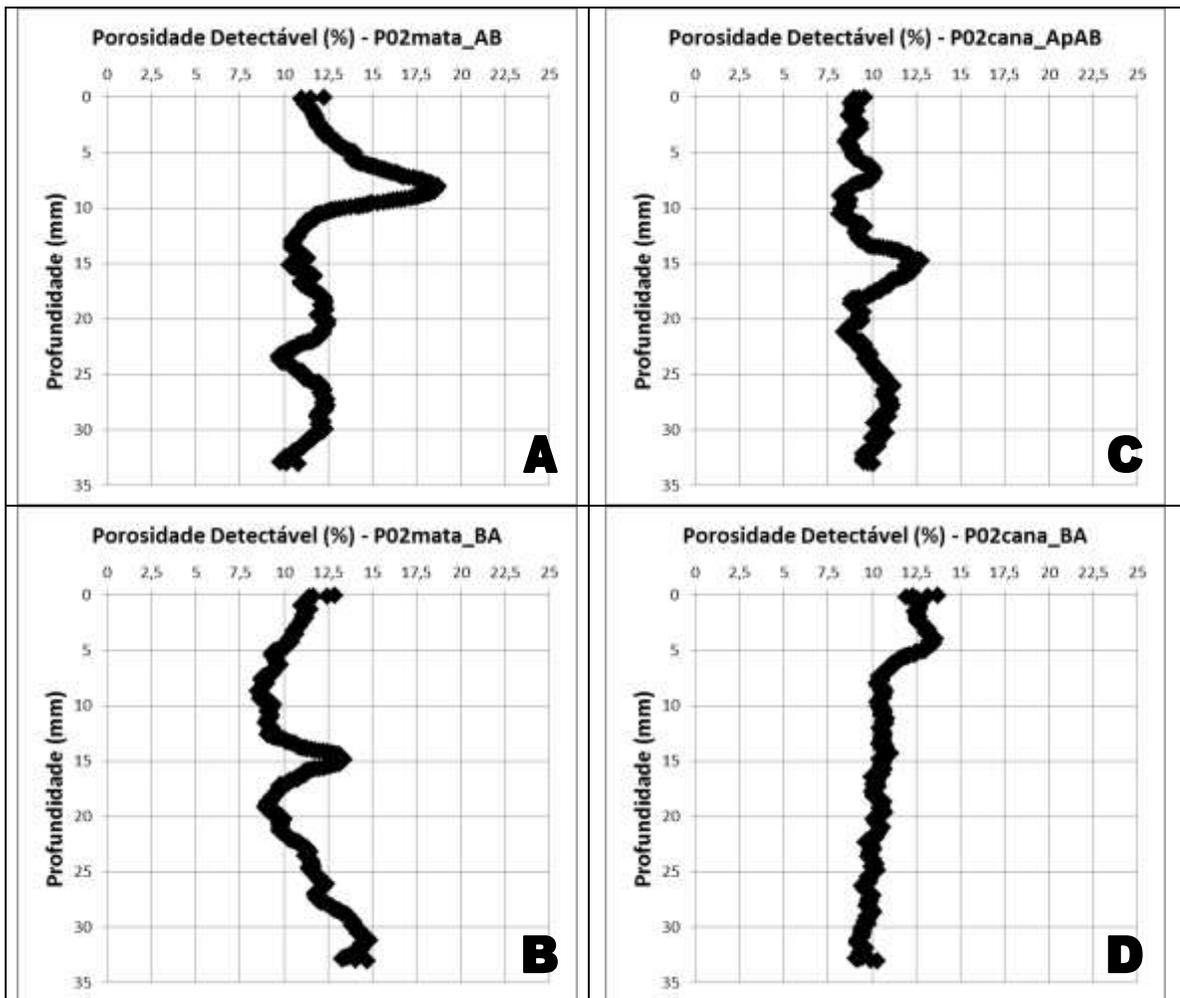


Figura 27 - Porosidade total detectável nos horizontes do perfil de Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (P2) sob diferentes usos. **A, B:** sob mata; **C, D:** sob cana-de-açúcar.

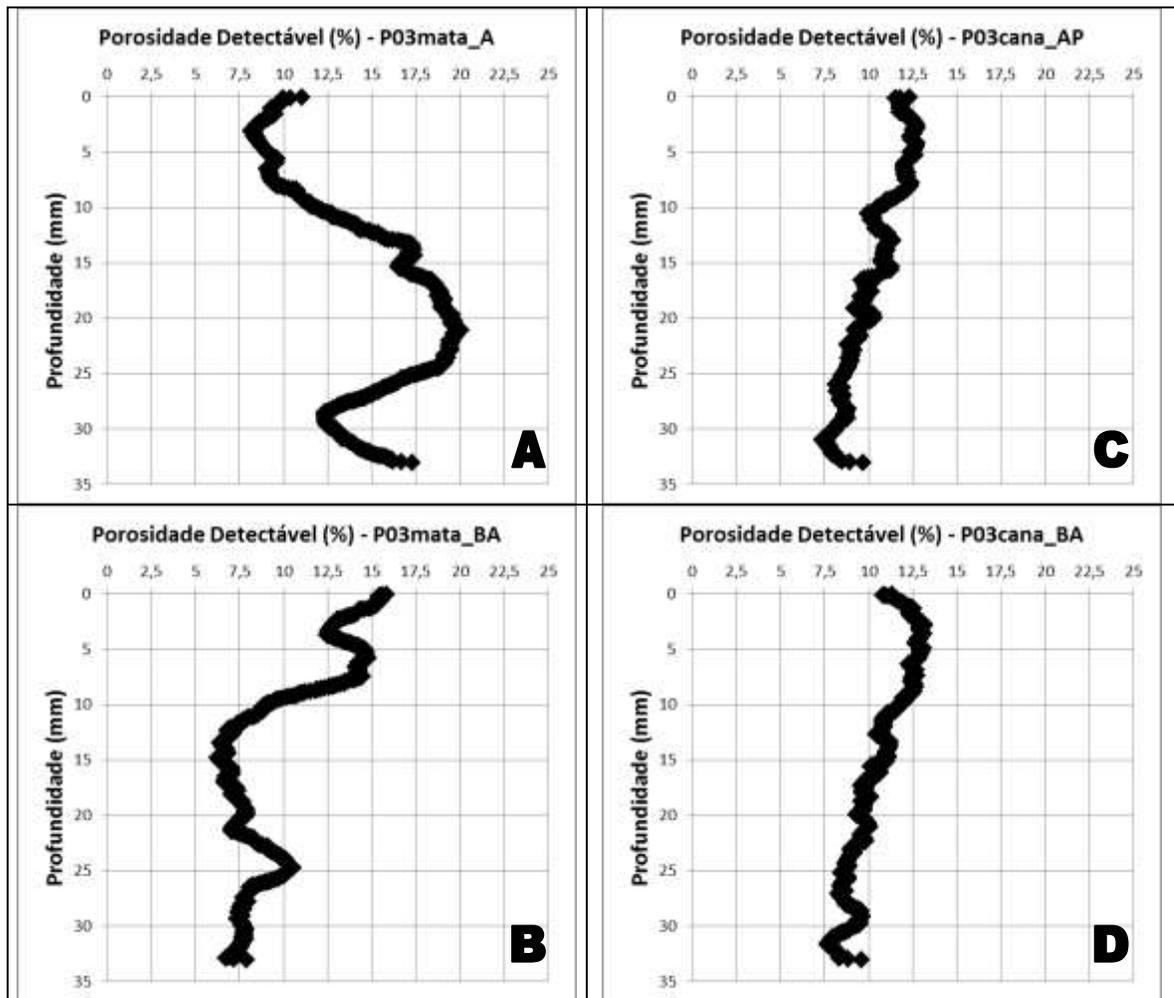


Figura 28– Porosidade total detectável nos horizontes do perfil de Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico (P3) sob diferentes usos. A, B: sob mata; C, D: sob cana-de-açúcar.

4. CONCLUSÕES

A tomografia computadorizada de raios-x mostrou-se como uma excelente ferramenta complemento no estudo de solos coesos, todavia isoladamente ela não dispensa a utilização de outras técnicas para a separação entre horizontes coesos e não-coesos.

Na análise de imagem por meio de semivariogramas observa-se que o caráter coeso e o caráter fragipânico influenciaram nos resultados da caracterização estrutural.

As propriedades avaliadas pela tomografia computadorizada de raios-x (valores médios e variabilidade da atenuação total de raios-x, média e variabilidade da atenuação de raios-x da matriz do solo e porosidade total detectável da imagem) também foram influenciadas pelo tipo de uso do solo.

No estudo da atenuação total de raios-x das amostras, observou-se que houve uma forte correlação positiva entre a atenuação total de raios-x e a densidade do solo e uma forte correlação inversa entre a porosidade física e a atenuação de raios-x. Todavia, não houve correlação positiva significativa entre a variabilidade da atenuação total e o carbono orgânico do solo bem como com a porosidade física do solo, contrariando o esperado.

Já no estudo da atenuação de raios-x da matriz do solo (sólidos) houve uma forte correlação inversa com os teores de Fe_2O_3 e uma correlação moderada com Al_2O_3 e SiO_2 obtidos por digestão sulfúrica total.

Na porosidade detectável da imagem, os perfis de Latossolos apresentaram os maiores percentuais de porosidade detectável quando comparados aos Argissolos. Entre os Latossolos, observou-se que as maiores percentagens foram no Latossolo Amarelo Distrófico típico (P4), sem qualquer característica de coesão. Entre os solos coesos, observaram-se os maiores valores de porosidade detectável foram observados nos horizontes superficiais e subsuperficiais coesos sob mata em detrimento do perfil cultivado.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHÁ PANOSO, L. Aspectos de classificação de solos de Tabuleiros. In: **Reunião de classificação, correlação e aplicação de levantamento de solos, 4., 1994**, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. p. 127-131.

ACHÁ PANOSO, L. Levantamento detalhado dos solos da Estação Experimental de Itapirema. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura - Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, 1969. 84 p. (EPFS. Boletim Técnico, 12).

ACHÁ PANOSO, L.; PIRES FILHO, A. M.; BONELLI, S. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Espírito Santo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1978. 461 p. (EMBRAPA-SNLCS. Boletim Técnico, 45).

ACHÁ-PANOSO, L. **Latossolo Vermelho-amarelo de Tabuleiro do Espírito Santo: formação, características e classificação**. UFRPE, 1976. 11f. Tese (Doutorado em Livre Docência) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

ADDERLEY, W. P.; SIMPSON, I.A.; MACLEOD, G .W . Testing high-resolution X-ray computed tomography for the micromorphological analyses of archaeological soils and sediments. **Archeol. Prosp., 8:107-112, 2001**.

ALVES, M. B.; SOUZA, R. L.; RODRIGUES, L. C. Visualização de imagens médicas com recursos em 3D *in*: **Anais do IX Congresso Brasileiro de Informática em Saúde**. Ribeirão Preto, 2004.

AMARAL, E. F. **Recomendações para a implantação de sistemas agroflorestais em plintossolos no estado do acre**. Rio Branco: EMBRAPA, No 29, ago/2000, p.1–2

ANDERSON, S.H.; PEYTON, R.L.; GANTZER, C.J. Evaluation of constructed and natural soil macropores using X-ray computed tomography. **Geoderma, 46:13-29, 1990**.

ANJOS, L.H.C. dos. **Caracterização, gênese, classificação e aptidão agrícola de uma seqüência de solos do Terciário na região de Campos-RJ**. Itaguaí, RJ: UFRRJ, 1985. 194p. (Dissertação de Mestrado)

ARAÚJO FILHO, J.C.; CARVALHO, A.; SILVA, F.B.R. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos em solos dos tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 2001, Aracaju. **Anais**. Aracaju: EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 2001. p.123-142.

BARROS, H. da C. ; DRUMOND, J. L. ; CAMARGO, M. N. LEMOS, P. de O. e C.; LEMOS, R. C. de; MENDES, W. **Levantamento de Reconhecimento dos solos do Estado do Rio de Janeiro e Distrito Federal.** Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura - Serviço Nacional de Pesquisas Agronômicas - Comissão de Solos, 1958. 350 p. (SNPA. Boletim, 11).

BENITES, V. M. et al. Análise discriminante de solos sob diferentes usos em área de mata atlântica a partir de atributos da matéria orgânica. **Revista Árvore, Viçosa-MG, v.34, n.4, p.000-000, 2010.**

BOYER, J. L. **Dinâmica dos elementos químicos e fertilidade dos solos.** Salvador: Instituto de Geociências - Universidade da Bahia. 1985. 311 p.

BRASIL. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Espírito Santo.** Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro, 1976. 380p. (Boletim técnico, 53).

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA – DNPA/DPP. **Levantamento Exploratório/reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco.** Recife, 1973. 2v. (DNPEA. Boletim Técnico 26; SUDENE-DRN. Série Pedologia, 14).

BRASIL. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA – Secretaria Geral. Pedologia. IN: Folhas SF.23/24-Rio de Janeiro/Vitória. **Projeto RADAMBRASIL**, 1983. p. 385-552. (Levantamento de Recursos Naturais-Vol. 32).

BREWER, R. **Fabric and mineral analysis fo soils.** New York: R.E. Krieger, 1976. 482p.

BRINDLEY, G.W.; BROWN, G. (Editors) **Crystal structures of clay minerals and their X-ray Identification.** Mineralogical Society, 41 Queen's Gate, London SW7 5HR, 1980.

BROWN, G.; BRINDLEY, G.W. X-ray Diffraction Procedures for clay mineral Identification *In*: BRINDLEY, G.W; BROWN, G. London: **Mineralogical Society**, 1980 chapter 5, p. 305-360.

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G. & TURSINA,T. **Handbook for soil thin section description.** Albrington, Waine Research, 1985. 152p.

BULLOCK, P.; MURPHY, C.P. (Eds.). Soil Micromorphology. In: Proc. 6th Int. W. Meeting of Soil Micromorphology. Berkamsted: AB Academic Publs., v. I- Techniques and Applications, v. II- Soil Genesis, 1983. 705p.

BUSHONG, S. C. **Ciência radiológica para tecnólogos: física, biologia e proteção.** Elsevier Editora Ltda.; 9 edition 2010. 728p.

CAMARGO, E. C. G .; FELGUEIRAS, C. A.; MONTEIRO, A. M. V . A importância da modelagem da anisotropia na distribuição espacial de variáveis

ambientais utilizando procedimentos geoestatísticos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., Foz do Iguaçu. Anais...São José dos Campos: INPE, 2001. p. 395-402.

CAMARGO, E.C.G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. 1998. *In: Curso de Geoprocessamento em projetos ambientais* . p. 1 - 36. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf . Acesso em: 28/02/2012.

CAMARGO, O.A. & ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1997. 132p

CARVALHO, Laércio A. de et al . Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.*, Campina Grande, v. 15, n. 9, Sept. 2011

CASTRO, S. S. de. et al. Micromorfologia de solos: bases e aplicações. In: **Tópicos Ci. Solo, 3:107-164, 2003.**

CASTRO, S. S. de. **Micromorfologia de solos: bases para descrição de lâminas delgadas.** Goiânia: UFG, 143p. 2008.

CAVALCANTI, A. C.; LOPES, O. F. **Condições edafoclimáticas da Chapada do Araripe e viabilidade de produção sustentável de culturas.** EMBRAPA/CPATSA: Brasília, 1994. 41 p.

CHANCELLOR, W. J. Effects of compaction on soil strength. In: BARNES, K. K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H. M.; THROCKMORTON, R. I.; BERG, G. E. V., (Org.). **Compaction of agricultural soils. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1971. p.190-222.**

CHARTRES, C.J.; NORTON, L.D. Micromorphology na chemical properties of Australian soil with hardsetting and duric horizons. In: WORKING MEETING ON SOIL MICROMORPHOLOGY, 9., Townsville, 1992. Soil micromorphology: studies in management and genesis; proceedings, edited by A.J. Ringrose-Voase, and G.S. Humpheys. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.825-834. (Developments in Soil Science, 22).

CHAUVEL, A. **Iniciação à Análise Microscópica dos Solos.** ESALQ / USP, 1979. (Mimeografado).

CINTRA, F. L. D. Distribuição do sistema radicular de plantas na presença de horizontes coesos. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Aracaju, 2001. **Anais.** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.229-239.

CINTRA, F.L.D.; LIBARDI, P.L. & SILVA, A.P. Tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil: Uma análise dos efeitos do regime hídrico e da presença de camadas coesas dos solos. **B. Inf. SBCS., 18:81-95, 1997.**

CINTRA, F.L.D.; LIBARDI, P.L.; JORGE, L.A. de C. Distribuição do sistema radicular de porta-enxertos de citros em ecossistema de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 21, n. 3, p. 313-317, 1999.

CÍSLEROVÁ, M.; VOTRUBOVÁ, J. CT derived porosity distribution and flow domains. **J. Hydrol.267: 186-200. 2002.**

COELHO, M. R.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização e gênese de perfis plínticos desenvolvidos de arenito do grupo Bauru I - química. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 27, p.483-494, 2003**

computed tomography in the geosciences. Geological Society,

CORNELL, R.M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrence and uses.** New York: VCH Publishers, 1996. 573p.

CORRÊA, M. M. et al. Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente tabuleiros costeiros. **R. Bras. Ci. Solo, 32: 297-313, 2008.**

CORRÊA, M. M. et al. Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente tabuleiros costeiros. **R. Bras. Ci. Solo, 32: 297-313, 2008.**

CORRÊA, M. M. **Gênese de horizontes coesos e fragipã de solos do ambiente Tabuleiros Costeiros.** 2005. 72f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de plantas)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CORRÊA, M. M. **Óxidos de ferro e tipificação de caulinitas na gênese de solos coesos do ambiente dos tabuleiros costeiros.** Viçosa: UFV, 2005. 203f. (Tese de Doutorado)

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: diagnóstico do município de Exu, Estado de Pernambuco.** Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. 16 p.

CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R.S. Static and dynamic threedimensional studies of water in soil using computerized tomography scanning. **Soil Science, Baltimore, v.140, p.326-332, 1985.**

CRUVINEL, P. E.; BALOGUN, F. A. Tomografia Compton em aplicações agrícolas. In: MARTIN NETO, L. et al. **Instrumentação avançada em ciência do solo.** EMBRAPA/CNPDIA: 2007, p.235-259

DE GRYZE, S., et al Pore structure changes during decomposition of fresh residue: X-ray tomography analyses. **Geoderma**134:82-96. **2006**

de Mestrado)

DEDAVID, B. A. Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras. Porto Alegre : EDIPUCRS, 2007. 60p.

DIXON, J. B.; WEED, S. B. **Minerals in soil environments**. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, 1977. 2. ed. 1244 p.

DOWUONA, G. N. N. et al. Porosity analysis of two acrisols by x-ray computed microtomography. Soil Science. Volume 174, Number 11, p. 583-593 November 2009

DUARTE, M.N.; CURI, N.; PÉREZ, D.V.; KÄMPF, N.; CLAESSEN, M.E.C. Mineralogia, química e micromorfologia de solos de uma microbacia nos Tabuleiros Costeiros do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.6, p.1237-1250, **2000**.

DURIEZ, M.A. de M.; JOHAS, R.A.L. **Alumínio extraível em solos. Determinação espectrofotométrica pelo alaranjado de xilenol**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1982. 16p. (EMBRAPA-SNLCS. Boletim de Pesquisa, 6).

ELLIOT, T. R.; HECK, R. J. A comparison of 2D vs. 3D thresholding of X-ray CT imagery. **Can. J. Soil Sci.** **87: 405–412, 2007a**.

ELLIOT, T.; HECK, R. J. A comparison of optical and X-ray technique for void analysis in soil thin section. **Geoderma (2007) 141:60-70**.

EMBRAPA **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p. il. Inclui apêndices.

EMBRAPA/SNLCS. **Crítérios para a distinção de classes de solos e de fases de unidades de mapeamento, normas em uso pelo SNLCS**. Rio de Janeiro: 1988. 67p. (Documento 11)

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF, 1999. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. In: Reunião de Classificação,

SOUZA, R. V. C. C. de. Caracterização micromorfológica por tomografia...

Correlação e Aplicação de Levantamento de Solos, 4., 1995, Rio de Janeiro, R.J. **Anais...** Rio de Janeiro: EMBRAPA, SNLCS/SBCS, 1995. 157p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Espírito Santo**, Rio de Janeiro, 1978. 461p. (Boletim técnico, 45).

FANTE JUNIOR, L. et al. Tomografia computadorizada na avaliação da densidade de um solo do semi-árido brasileiro. **R. Bras. Ci. Solo**, **26:835-842, 2002**

FARBER, L., TARDOS, G.; MICHAELS, J. Use of X-ray tomography to study the porosity and morphology of granules. **Powder Technol.** (2003) **132:57-63**.

FERNANDES, H. C. et al. Utilização da tomografia computadorizada para determinação da densidade do solo na região da semente. Revista de Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v.13, n.2, 82-94, Abr./Jun., 2005

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B. & CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região Sudeste do Brasil. **R. Bras. Ci. Solo**, **23:507-514, 1999**.

FERREIRA, T B.; RASBAND, W. ImageJ User Guide. IJ 1.46. Disponível em: <http://rsbweb.nih.gov/ij/docs/user-guide.pdf>. Acessado em 28 de fevereiro de 2012.

FILIZOLA, H.F.; GOMES, M.A.F. **Introdução à descrição micromorfológica de lâminas delgadas de solos: parte 1**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 8p. (Embrapa Meio Ambiente. Comunicado Técnico, 41).

FILIZOLA, H.F.; LAMOTTE, M.; FRITSCH, E.; BOULET, R.; ARAÚJO FILHO, J.C.; SILVA, F.B.R. & LEPRUN, J.C. Os fragipãs e duripãs das depressões dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste brasileiro. **R. Bras. Ci. Solo**, **25:947-964, 2001**.

FISHER, R.A. The use of multiple measurements in taxonomic problems. *Annals of Eugenics*, v.7, p.179-188, 1936

FITZPATRICK, E.A. **Soil microscopy and micromorphology**. New York, John Wiley & Sons, 1993. p.???

FITZPATRICK, E.A. **Soil microscopy and micromorphology**. New York: John Wiley, 1993. 304p.

FITZPATRICK, E.A.; GUNDMUNDSON, T. The impregnation of wet wet peat for the production of thin sections. In: J. Soil Science. Oxford: nº 29, 1978. p.585-587.

FONSECA, O.O.M.; **Caracterização e classificação de solos Latossólicos e Podzólicos desenvolvidos nos sedimentos do terciário no litoral Brasileiro.** 1986. 185f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Itaguaí.

FRANZMEIER, D. P., CHARTRES, C.J., WOOD, J.T. Hardsetting soils in southeast, Australia: landscape and profile processes. **Soil Sci. Soc. Am. J. 60: 1178-1187. 1996.**

FREITAS, P. L. DE. Manejo físico do solo. In: Simpósio Sobre Manejo E Conservação Do Solo No Cerrado, Goiânia, 1990. Anais..., Campinas, Cargill, 1992. p.117-39.

GANTZER, C. J. AND ANDERSON, S. H. Computed tomographic measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage seedbeds. **Soil Tillage Res. (2002) 64: 101-111**

GANTZER, C.J. & ANDERSON, S.H. Computed tomographic measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage seedbeds. **Soil Till. Res., 64:101-111, 2002.**

GE Healthcare. 2006. Microview Analysis 2.2. Technical Publication. Direction 2407688. Revision 1. [Online] Available: <http://www.oucom.ohiou.edu/ou-microct>.

GE Healthcare. **eXplore Locus user guide.** Technical Publication Direction 2394683 Revision 1a: 1 74. 2005

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. **Scientia Agricola**, v. 59, p.613-620, jul/set 2002.

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; DEXTER, A.R. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. **Geoderma**, v.113, p.95-108, 2003.

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P.; TORMESA, C.; SOUZA, L.S.; RIBEIRO, L.P. Similaridade entre o caráter coeso dos solos e o comportamento hardsetting: estudo de caso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.239-247, 2001.

GREENE, R.S.B. Hardsetting soil. In: **The Encyclopedia of Soil science.** (Ed. R. Lal). Marcel Dekker, Inc., 2001.

GREVERS, M.C.J.; DE JONG, E. & ST. ARNAUD, R.J. The characterization of soil macroporosity with CT scanning. **Canadian J. Soil Sci.**, **69:629-637**, **1989**.

HAINSWORTH, J.M.; AYLMOORE, L.A.G. The use of computer-assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. **Australian Journal of Soil Research, Collingwood**, **v.21,p.435-443**, **1983**.

HARPER, R.J.; GILKES, R.J. Hardsetting in the surface horizons of sandy soils and its implications for soil classification and management. **Australian Journal of Soil Research**, **v.32**, **p.603-619**, **1994**.

HECK, R. J. X-ray computed tomography of soil. *In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo* **Tópicos em Ciência do Solo**, **6:1-30**, **2009**

ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York, Oxford University Press, 1989. 561p.

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

JACOMINE P. K. T.; CAVALCANTI, A. C.; PESSOA, S. C. P.; SILVEIRA, C. O. da. **Levantamento exploratório reconhecimento de solos do Estado de Alagoas**. Recife: EMBRAPA Centro de Pesquisas Pedológicas, 1975. 532 p. (EMBRAPA-CPP. Boletim Técnico, 35; SUDENEDRN. Série Recursos de Solos, 5).

JACOMINE, P.K.T. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. *In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS*, 1996, Cruz das Almas. **Anais**. Aracaju: EMBRAPA, CPATC, 1996. p.13-24.

JACOMINE, P.K.T. Evolução do conhecimento sobre solos coesos no Brasil. *In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS*, 2001, Aracajú. **Anais**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.19-46

JACOMINE, P.K.T. **Fragipãs em Solos de "Tabuleiros"**: características, gênese e implicações no uso agrícola. 1974, 85f. Tese (Doutorado em Livre Docência)- Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

JACOMINE, P.K.T.; ALMEIDA, J.C.; MEDEIROS, L.A.R. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Ceará**. Recife: [s.n.] 1973. 2v. 830p. (DPP, Boletim Técnico, 28. SUDENE, Série Pedologia, 16).

JACOMINE, P.K.T.; MONTENEGRO, J.O.; RIBEIRO, M.R. Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Sergipe. Recife: EMBRAPA, 1975. 506p. (**Boletim Técnico**, 36. Série Recursos de Solos, 6).

JONGERIUS, A.; HEINTZBERGER, G. **The preparation of mammoth-sized thin sections.** Wageningen: Soil Survey Institute, 1963. p.3-37. Soil Survey Paper, 1

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **R. Geonomos, 5(1):17-40. 1995**

KESTENBACH, H. J. et al. Resolução lamelar num novo microscópio Eletrônico de Varredura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia - Jan/Mar 1997**

KETCHAM, R. A. Three-dimensional grain fabric measurements using high-resolution X-ray computed tomography. **J. Struct. Geol. (2005) 27: 1217-1228.**

KETCHAM, R.A.; CARLSON, W.D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences **Computers & Geosciences 27 (2001) 381-400**

KHATTREE, R.; NAIK, D.N. **Multivariate data reduction and discrimination with SAS software.** Cary, NC, USA: SAS Institute Inc., 2000. 558 p.

KIEHL, E. J. Manual de Edafologia; relações solo-planta. São Paulo: Ceres. 264 p.1979

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia:** relações solo-planta. São Paulo: Ceres, 1979. 262p.

KILMER, V.J. Silicon. In: Black, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis.** Madison: ASA, 1965. pt1, p.959-962. (Agronomy, 9).

KITANI. E. C. Análise de discriminantes lineares para modelagem e reconstrução de imagens de faces. Edson Caoru Kitani. – São Bernardo do Campo, 2007 165f: il. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Centro Universitário da FEI)

LIMA NETO, J. A. de. **Caracterização e gênese do caráter coeso em Latossolos Amarelos e Argissolos da região dos tabuleiros costeiros do Estado de Alagoas.** Recife: UFRPE, 2008. 83p. (Dissertação de Mestrado)

LIMA NETO, J. A. de. et al. Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos de horizontes coesos de latossolos e argissolos dos tabuleiros costeiros do Estado de Alagoas. **R. Bras. Ci. Solo, 34:473-486, 2010**

LIMA NETO, J. A. de. et al. Caracterização e gênese do caráter coeso em Latossolos Amarelos e Argissolos dos tabuleiros costeiros do Estado de Alagoas. **R. Bras. Ci. Solo, 33:1001-1011, 2009.**

LIMA, H. V. de; et al. Comportamento físico de um argissolo acinzentado coeso no Estado do Ceará. **R. Bras. Ci. Solo, 29:33-40, 2005.**

SOUZA, R. V. C. C. de. Caracterização micromorfológica por tomografia...

LIMA, H. V. et al. Identificação e caracterização de solos coesos no estado do Ceará. **R. Bras. Ci. Solo**, **28**: 467-476, 2004.

LIMA, H. V. **Identificação e caracterização do comportamento físico de solos coesos no Estado do Ceará**. Piracicaba: USP, 2004. 85p. (Dissertação de Mestrado)

LIMA, P. C de. Micromorphological observations of some soils from the Tablelands of Brazil. 1981. 104 f. Dissertation (Master in Pedology and Soil Science) - Department of Soil Science, University of Reading.

LOU, H. L. L.; HALLECK, P. Quantifying soil structure and preferential flow In intact soil using x-ray computed tomography. **Soil Sci. Soc. Am. J.** **72**:1058-1069, July–August 2008

MAIA, J. L. T.; RIBEIRO, M. R. Propriedades de um Argissolo Amarelo fragipânico de Alagoas sob cultivo contínuo da cana-de-açúcar. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.39, n.1, p.79-87, jan. 2004

MALISKA, A. M. **Microscopia eletrônica de varredura e microanálise**. UFSC: ????. 98p.

MATIAS, M. DA C. B. DA S. **Atributos químicos e biológicos de um latossolo amarelo sob diferentes sistemas de manejo no cerrado do Piauí**. Teresina: EDUFPI, 2006. Universidade Federal do Piauí. Dissertação (Mestrado em Agronomia) 46fl.

McKeague, J. A., 1978. **Manual on Soil sampling and methods of analysis**, 2nd ed.

MCKEAGUE, J.A.; DAY, J.H.; Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 46, p. 13-22, 1966.

MEES, F., SWENNEN, R., VAN GEET, M. AND JACOBS, P. Applications of X-ray computed tomography in the geosciences. **Geological Society, Special Publications (2003) 215**: 1-6.

MEIRELES, M.C.S.; RIBEIRO, L.P. Caracterização da sílica em horizontes coesos de solos de tabuleiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995, Viçosa. **Resumos...** Viçosa, MG: SBCS UFV, 1995. p. 1688-1689.

MELO, F.J.R.; SANTOS, M.C. Micromorfologia e mineralogia de dois solos de Tabuleiros Costeiros de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.99-108, 1996.

MENDES JÚNIOR, B. O. **Perfil econômico de Alagoas**. Fortaleza: Banco do Nordeste, 2002. 58 p.

MENDONÇA, Luiz Alberto Ribeiro. **Qualidade da água na chapada do araripe e sua vulnerabilidade.** In: 1ST JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 2000, Fortaleza. Anais do 1st Joint World Congress on Groundwater. 2000. v.1. p.1-16.

MOORE, D. M.; REYNOLDS, R.C. **X-ray diffraction and identification and analysis of clay minerals.** Oxford: Oxford University Press, 1989. 332 p.

MOREAU, A.M.S.S. **Gênese, mineralogia e micromorfologia de horizontes coeso, fragipã e duripã em solos do tabuleiro costeiro no sul da Bahia.** 2001. 138f. Tese (Doutorado em solos e Nutrição de Plantas)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MOREAU, A.M.S.S; KER, J.C.; COSTA, L.M.; GOMES, F.H. Caracterização de solos de duas toposseqüências em tabuleiros costeiros do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.1007-1019, 2006.

MULLINS, C.E. Hardsettings soil. In: SUMME, M.E., ed. Handbook of Soil Science Mandson, CRG Press, 1999. p.G65-G87.

MUNKHOLM, L. J HECK, R. J; DEEN, B. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability, **Geoderma, Volumes 181–182, July 2012, Pages 22-29**

MURPHY, C.P. **Thin section preparation of soils and sediments.** Berkhamsterd: Academic Publis., 1986. 145p.

NAIME, J. M. et al. **Tomografia computadorizada aplicada ao estudo de solos colapsíveis.** São Carlos: EMBRAPA-CNPDIA, 1997. 5p. (EMBRAPA-CNPDIA. Comunicado Técnico, 17).

NANNI, M. R et al. Análise discriminante dos solos por meio da resposta espectral no nível terrestre. **Pesq. agropec. bras., Brasília, v.39, n.10, p.995-1006, out. 2004**

NASCIMENTO, G. B. do. **Caracterização dos solos e avaliação de propriedades edáficas em ambientes de tabuleiros costeiros da Região Norte Fluminense (RJ).** 2001. 162 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

NORTHCOTE, K.H.; HUBBLE, G.D.; ISBELL, R.F.; THOMPSON, C.F.; BETTANY, E. **A description of Australian soils.** Melbourne: CSIRO, 1975.

OLIVEIRA, I. de. **Função discriminante quadrática aplicada no reconhecimento e classificação de nascidos vivos quanto à sobrevivência ou óbito no primeiro ano de vida.** UFPR: Curitiba. 132 p. il. (Dissertação de Mestrado)

OLIVEIRA, L. B. de, et al. **Contribuição aos estudos de compactação, adensamento e coesão do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. Cd-rom. – (Embrapa Solos. Documentos, n. 44)

OLIVEIRA, L. B. de; DANTAS, H. S.; CAMPELO, A. S. B.; GALVÃO, S. J.; GOMES, I. F. Caracterização de adensamento no subsolo de uma área de Tabuleiro da Estação Experimental do Curado, Recife. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 3, p. 207-214. 1968.

OLIVEIRA, L.B. de.; MELO, V. de. Caracterização físico-hídrica do solo. I. Unidade Itapirema. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.5, p.35-48, 1970.

OLSON, V.J. Iron. *In: Methods of Soils Analysis*. Part 2. Chemical and microbiological properties. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p. 959-962. (Agronomy, 9).

ORIGIN LAB. 1999 2006.OriginPro 7.5 SR6. [Online] Available: <http://www.originlab.com> [2007 Sep. 20].

PAPADOPOULOS A. et al. Investigating the effects of organic and conventional management on soil aggregate stability using X-ray computed tomography. **European Journal of Soil Science**, June 2009, 60,360–368

PEDROTTI, A. et al. Tomografia computadorizada aplicada a estudos de um planossolo. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 38, n. 7, p. 819-826, jul. 2003

PEREIRA, M. G. et al. Organic carbon determination in histosols and soil horizons with high organic matter content from Brazil. **Sci. agric.** , Piracicaba, v. 63, n. 2, Apr. 2006.

PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Formas extraíveis de ferro em solos do Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 371-982, 1999.

PERRET , J.; PRASHER, S.O.; KANTZAS, A. & LANGFORD, C. Three-dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 63:1530-1543, 1999.

PETROVIC, A.M.; SIEBERT, J.E.; RIEKE, P.E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, p.445-450, 1982.

PEYTON, R.L.; HAEFFNER, B.A.; ANDERSON, S.H. & GANTZER, C.J. Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores. **Geoderma**, 53:329-340, 1992.

PIERRET, A.; CAPOWIEZ, Y .; BELZUNCES, L. & MORAN, C.J. 3D reconstruction and quantification of macropores using computed tomography and image analysis. **Geoderma**, **106:247-271, 2002.**

PIRES, L.F. et al. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil & Tillage Research** **110 (2010) 197–210**

PIRES, L.F.; BACCHI, O. O. S. Mudanças na estrutura do solo avaliada com uso de tomografia computadorizada. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.45, n.4, p.391-400, abr. 2010

PONTE, C.M.; RIBEIRO, L.P. **Estudo da gênese de horizontes coesos em uma toposseqüência na área do Candéal.** Salvador: Escola de Agronomia da UFBA, 1990.

RACHMAN, A.; ANDERSON, S.H. & GANTZER, C.J. Computed-tomographic measurement of soil macroporosity parameters as affected by stiff-stemmed grass hedges. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, **69:1609-1616, 2005.**

RACHMAN, A., ANDERSON, S. H. AND GANTZER, C. J. Computed-tomographic measurement of soil macroporosity parameters as affected by stiff-stemmed grass hedges. **Soil Sci. Soc. Am.(2005) J.69: 1609-1616.**

RASBAND, W. 1997 2012. **ImageJ.** Research Services Branch, National Institute of Mental Health, Bethesda, MDRASIAH, V.; AYLMORE, L. A. G. Computed tomography data on soil structural and hydraulic parameters assessed for spatial continuity by semivariance geostatistics. **Aust. J. Soil Res.**, **1998, 36, 485-93.**

RASIAH, V.; AYLMORE, L. A.G. Computed tomography data on soil structural and hydraulic parameters assessed for spatial continuity by semivariance geostatistics. **Aust. J. Soil Res.**, **1998, 36, 485{93**

REGAZZI, A.J. Análise multivariada, notas de aula INF 766, Departamento de Informática da Universidade Federal de Viçosa, v.2, 2000.

REIS, E. **Estatística multivariada aplicada.** Lisboa: Edições Silabo, 1997. 343 p

RESENDE, M. Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soil of Central Plateau of Brazil. 1976. 237f. Tese (Doctor)- Purdue University, West Lafayette.

RESENDE, M. **Pedologia.** Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1982. 100p.

REZENDE, J. de O. **Solos coesos dos tabuleiros costeiros**: limitações agrícolas e manejo. Salvador: SEAGRI, 2000. 117p. (Série Estudos agrícolas, 1).

RIBEIRO, L. P. Sílica em horizontes coesos de solos da Bahia. **Universitas**, n.38, p.59-80, 1986.

RIBEIRO, L.P. Evolução da cobertura pedológica dos tabuleiros costeiros e a gênese dos horizontes coesos. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Aracaju, 2001. **Anais**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001a. p.93-121.

RIBEIRO, L.P. Gênese, evolução e degradação dos solos amarelos coesos dos tabuleiros costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 1996, Cruz das Almas. **Anais**. Aracaju : Embrapa-CPATC, 1996. p.27-35.

RIBEIRO, L.P. Os **Latossolos Amarelos do Recôncavo Baiano**: gênese, evolução e degradação. Salvador: Seplantec, CADCT, 1998. 99p.

RIBEIRO, L.P. Premiers resultas sur la genése des sols a horizons indures dans la region du Cruz das Almas, BA, Brésil. In: TABLE RONDE SUR L.ORGANIZATION ET DINAMIQUE INTERNE DE LA COUVERTURE PEDOLOGIQUE, 1991, Caen. **Anais**. Caen: CNRS, 1991.

RIBEIRO, L.P. Primeira avaliação sobre a gênese de solos coesos da região de Cruz das Almas-BA. In: "Table ronde: organization, dynamique interna de la couverture pedologique et son importance pour la comprehension de La morfogenese. Caen, France. 1991.

RIBEIRO, L.P. Sílica em horizontes coesos de solos da Bahia. **Universitas**, n.38, p.59-80, 1986.

RIBEIRO, M.R. Características morfológicas dos horizontes coesos dos tabuleiros costeiros. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Aracaju, 2001b. **Anais**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001b. p.162-168.

ROGASIK et al; Assessment of soil structure using X-ray computed tomography *in*: MEES, F., SWENNEN,R.; VANGEET,M.; JACOBS,P. **Applicationsof X-ray Computed Tomography in the Geosciences**. Geological Society, London, 2003. Special Publications, 215, 151-165.

ROSSINI, D. F.; LIMA, R.R. de. A importância da correção da anisotropia em análises geoestatísticas. **Revista da Estatística UFOP, Vol II, 2012**, ISSN 2237-8111, XI Encontro Mineiro de Estatística – MGEST.

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Rev. Bras. de Ciência do Solo**, vol. **29**, núm. **2**, 2005, pp. **297-300**.

SANDER, T; GERKE, H. H.; ROGASIK, H. Assessment of Chinese paddy-soil structure using X-ray computed tomography. **Geoderma** **145** (2008) **303–31**

SANTANA, M. B et al. Atributos físicos do solo e distribuição do sistema radicular de citros como indicadores de horizontes coesos em dois solos de tabuleiros costeiros do Estado da Bahia **R. Bras. Ci. Solo**, **30:1-12**, 2006

SANTOS, M.C.; SILVA, M.S.L.; ALMEIDA, B.G.; KLAMT, E.; CAVALCANTI, A.C. Caracterização micromorfológica e considerações sobre a gênese de solos de Tabuleiro do semi-árido do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1031-1046, 2002.

SANTOS, R. D. dos; OLMOS ITURRI LARACH, J.; PALMIERI, F.; MOTHCI, E. P.; PIRES FILHO, A. M.; SANTOS, H. G. dos; CARVALHO, L. G. de O. **Levantamento exploratório dos solos que ocorrem ao longo da rodovia Transamazônica (trecho Itaituba-Estreito)**. Rio de Janeiro: MADivisão de Pesquisas Pedológicas, 1973. 39 p. (DNPEA-DPP. Boletim técnico, 33).

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C. & ANJOS, L.H. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. 5.ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100p.

SILVA, A. J. N. da; CARVALHO, F. G. de. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um latossolo amarelo de tabuleiro costeiro. **R. Bras. Ci. Solo**, **31:853-862**, 2007.

SILVA, A.J.N **Caracterização de latossolos amarelos sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas**. 1996. 133f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

SILVA, A.J.N.; RIBEIRO, M.R. Caracterização de Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas: Propriedades químicas. **R. Bras. Ci. Solo**, **22:291-299**, 1998.

SILVA, A.J.N.; RIBEIRO, M.R.; MERMUT, A.R. & BENKE, M.B. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em Latossolos Amarelos coesos do Estado de Alagoas: Propriedades micromorfológicas. **R. Bras. Ci. Solo**, **22:515- 525**, 1998.

SILVA, F. B. R. **Duripãs em solos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste do Brasil: características e gênese**. Relatório do Programa de Pesquisa a nível de Pós-doutorado. Strasbusg, França: EMBRAPA. DOD, 1995.

SILVA, M.S.L. **Efeito do cultivo da cana-de-açúcar em propriedades do solo de tabuleiro do estado de Alagoas**. 1989. 106f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

SILVA, M.S.L.; KLAMT, E.; CAVALCANTI, A.C. & KROTH, P.L. Adensamento subsuperficial em solos do semi-árido: processos geológicos e/ou pedogenéticos pedogenéticos. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.314-320, 2002.

SILVA, M.S.L.; RIBEIRO, M.R. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades morfológicas e físicas de solos argilosos de tabuleiro no estado de Alagoas. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Campinas, v.16, p.397-402, 1992.

SILVEIRA, D. C, MELO FILHO, J. F., SACRAMENTO, J. A. A.S.,SILVEIRA, E.C.P. Relação umidade versus resistência à penetração para um argissolo amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Rev. Bras. Ciênc. Solo, Viçosa , v. 34, n. 3, 2010 .**

SIMEÃO, S. F. de A. P. **Aplicativo computacional da função discriminante quadrática para utilização em ciências experimentais**. Botucatu: UNESP, 2007. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”. Tese (Doutorado em Agronomia) 143fl.

SIMEÃO, S. F. de A. P.; PADOVANI, C. R. Utilização da função discriminante quadrática em ciências experimentais. **Revista Energia na Agricultura (Botucatu), vol. 23, n.1, 2008, p.116-134**

SMITH, C. A. B. Some examples of discrimination. **Annals of Eugenics**, London, v. 13, p. 228-237, 1947.

SOUZA, L.S. Aspectos sobre o uso e manejo dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. **Boletim Informativo. SBCS**, v.22, p.34-39, 1997.

SOUZA, L.S.; SOUZA, L.D.; CALDAS, R.C. Identificação da coesão com base em atributos físicos convencionais em solos dos Tabuleiros Costeiros. *In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS*, Aracaju, 2001. Anais. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.169-190.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; URLANI NETO, V.L. Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto – modelo IAA/Planalsucar - Stolf. São Paulo, MIC/IAA/ PNMCA-Planalsucar, 1983. 8p. (Boletim, 1)

STOOPS, G.J.; JONGERIUS, A. Proposal for a micromorphological classification of soil materials I. A classification of related distribution of coarse and fine particles. **Geoderma, v.13, p.189-200, 1975.**

TAINA, I. A., HECK, R. J. AND ELLIOT, T. R. Application of X-ray computed tomography to soil science: A literature review. **Can. J. Soil Sci. (2008) 88: 1-20.**

TAINA, I. A.; HECK, R. J; DEEN, W. AND MA, E. Y. T. Quantification of freeze-thaw related structure in cultivated topsoils using X-ray computer technology. **CJSS 2013 Special Issue – Freeze-Thaw Processes and Frozen Soils**

TAUD, H. et al. Porosity estimation method by X-ray computed tomography. **Journal of Petroleum Science and Engineering 47 (2005) 209–217**

TAUHATA, L.; SALATI, I. P. A.; DI PRINZIO, R.; DI PRINZIO, A. R. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. 5 revisão. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2003. 242 p

TORRANCE, J. K., et al. Xray computed tomography of frozen soil. **Cold Reg. Sci. Technol. 53:75-82. 2008.**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV. **Caracterização de solos e avaliação dos principais sistemas de manejo dos tabuleiros costeiros do Baixo Rio Doce e das Regiões Norte do Estado do Espírito Santo e sua interpretação para uso agrícola.** Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1984. 153p. Relatório

VAN GEET, M., LAGROU, D. AND SWENNEN, R. Porosity measurements of sedimentary rocks by means of microfocus X-ray computed tomography (μ CT). *In*: MEES, F., SWENNEN, R.; VANGEET, M.; JACOBS, P. **Application of X-ray Computed Tomography in the Geosciences.** Geological Society, London, 2003. Special Publications, 215: 51-60.

VASCONCELOS, A.C.M. de. Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar como indicativo para subsolagem no preparo de solo e no cultivo de soqueiras. 2006. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/raiz/index.htm>. Acesso em: 19/5/2013

VERDADE, F.da C. Análise química total *in*: MONIZ, A. C. **Elementos de pedologia.** S. Paulo: EDUSP, 1972, p. 209-221 il.

VIANA, J. H. M. et al. Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de latossolos. **R. Bras. Ci. Solo, 28:11-19, 2004.**

WHITTING, L.D.; ALLARDICE, W.R. X-ray diffraction techniques. *In*: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.** Madison, Soil Sci. Soc of Am., 1986. p.331-359.

SOUZA, R. V. C. C. de. Caracterização micromorfológica por tomografia...

ZANGRANDE, M. B. Caracterização e interpretação para uso agrícola de um Podzólico Vermelho-Amarelo abrupto dos platôs litorâneos do Norte do Espírito Santo. Viçosa: UFV, 1984. 167 f. (Dissertação de Mestrado)

6. APÊNDICE

PERFIL – 01

Nº DE CAMPO: P1

DATA – 05/05/2010

CLASSIFICAÇÃO – ARGISSOLO ACINZENTADO Distrocoeso fragipânico, textura média/argilosa

LOCALIZAÇÃO – Usina Marituba, fazenda Pindoba, município de Penedo (AL). Coordenadas UTM 24 L 0776508mE e 8877567mN.

SITUAÇÃO, DECLIVIDADE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Trincheira situada em topo plano de tabuleiro, sob cultura de cana-de-açúcar.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA – Terciário. Formação Barreiras.

MATERIAL ORIGINÁRIO – Sedimentos argilosos.

RELEVO LOCAL – Plano.

RELEVO REGIONAL – Plano

EROSÃO – Não aparente.

DRENAGEM – Moderada a imperfeitamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Cerrado.

USO ATUAL – Cultura de cana-de-açúcar.

Clima – AS⁷ da classificação de Köppen

Descrito e coletado por – M. R. Ribeiro, R.V. C. C. Souza, J. F. W. F. Lima.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap 0-18 cm, cinzento-escuro (10 YR 5/1, seca; 10 YR 5/2, úmida); franco-argilo-arenosa; fraca pequena média blocos subangulares granular; Muito dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.

AB 18-40 cm, bruno-acinzentado (10 YR 6/1, seca; 10YR 5/2, úmida); argilo-arenosa; Fraca pequena média blocos subangulares; Muito dura, friável, ligeiramente plástica, pegajosa; transição plana e abrupta.

BA 40-63 cm, bruno-claro-acinzentado (10 YR 7/1, seca; 10YR 6/3, úmida); argila; maciça coesa; extremamente dura, firme, plástica e pegajosa; transição gradual e plana.

Bt 63-90 cm, bruno-claro-acinzentado (10 YR 7/1, seca; 10YR 6/3, úmida), mosqueado comum, médio e distinto bruno muito claro-acinzentado (10 YR 7/2, seca; 10YR 7/3, úmida); argila; fraca maciça coesa pequena média blocos subangulares; extremamente dura, firme, plástica, pegajosa, transição abrupta e irregular

Bt/Btx1 90 – 130 cm, bruno-claro-acinzentado (5 YR 4/6, seco; 10YR 6/3, úmida), mosqueado comum, médio e proeminente vermelho (2,5 YR 6/4, seco; 2,5YR 4/6, úmido), mosqueado comum, médio a grande e distinto bruno muito claro-acinzentado (10 YR 7/1, seco; 10YR 7/4, úmido); argila; Fraca maciça coesa pequena média blocos subangulares; dura, muito dura, friável e extremamente firme, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa, transição clara e ondulada (15-65).

Bt/Btx2 130-150 cm+, bruno-claro-acinzentado (10 YR 7/1, seca; 10YR 6/3, úmida), mosqueado pouco, pequeno a médio e proeminente vermelho (5 YR 5/6, seca; 2,5YR 4/6, úmido), mosqueado comum, médio a grande e distinto bruno muito claro-acinzentado (10 YR 7/3, seca; 10YR 7/4, úmido), argila; fraca pequena a média blocos subangulares; dura e extremamente dura; friável e muito firme, plástica e pegajosa.

RAÍZES: Muitas em Ap; poucas no AB; comuns no Bt; raras no BA, Bt/Btx1 e Bt/Btx2.

OBS: 1. Muito poros em Ap e Bt; poros comuns em AB, BA, Bt/Btx1 e Bt/Btx2.

SOUZA, R. V. C. C. de. Caracterização micromorfológica por tomografia...

2. Os horizontes Bt/Btx1 e Bt/Btx2 são horizontes fragipãs descontínuos.
3. Os mosqueados vermelhos embora visualmente se assemelhem a plintita, são revestimentos de óxidos de ferro (filmes) em alguns planos de fraqueza do fragipã.
4. Horizontes AB e BA são extremamente coesos.

ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS
Perfil 1. Penedo (AL)

Horizontes		Frações da amostra total (%)		Composição granulométrica da terra fina (g kg ⁻¹)				ADA (g kg ⁻¹)	GF (%)	Silte/argila	Densidade (g cm ⁻³)		Porosidade (%)
Símbolo	Prof (cm)	Cascalho 20-2mm	TFSA <2mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila <0,002 mm				solo	partículas	
Ap	0-18	0,09	99,91	351	244	102	303	303	---	0,34	1,58	2,67	41
AB	18-40	0,07	99,93	297	208	91	405	425	---	0,22	1,45	2,68	46
BA	40-63	0,13	99,87	193	167	163	477	20	---	0,34	1,62	2,67	39
Bt	63-90	0,09	99,91	153	157	131	559	20	---	0,23	1,44	2,65	46
Bt/Btx1	90-130	0,06	99,94	172	145	160	523	21	---	0,31	1,43	2,65	46
Bt/Btx2	130-150+	0,04	99,96	134	159	137	570	20	---	0,24	---	2,65	----

Horizontes	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)						Valor T (soma)	Valor V (%)	m (%)	Pdisp (mg dm ⁻³)
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	H ⁺ +Al ³⁺	Al ³⁺				
Ap	5,9	4,8	2,3	0,32	0,03	2,65	2,6	0,45	5,25	50	15	---
AB	5,7	4,4	1,78	0,24	0,02	2,04	2,93	0,48	4,97	41	19	---
BA	4,6	4	1,1	0,09	0,03	1,22	3,38	1	4,6	27	45	---
Bt	4,9	4	1,18	0,06	0,04	1,28	3,05	1,18	4,33	29	48	---
Bt/Btx1	4,9	4,3	1,03	0,03	0,07	1,13	4,13	0,75	5,26	21	40	---
Bt/Btx2	4,9	4,1	0,85	0,05	0,04	0,94	2,97	1,03	3,91	24	52	---

Horizontes	C orgânico (g kg ⁻¹)	Ataque sulfúrico (g kg ⁻¹)			SiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ (Ki)	R ₂ O ₃ (Kr)	Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃
Ap	16	13,10	10,95	0,33	2,03	2,00	---
AB	11,8	13,75	11,88	0,33	1,97	1,93	---
BA	8,1	18,17	15,78	0,38	1,96	1,93	---
Bt	6,7	20,58	18,07	0,43	1,94	1,91	---
Bt/Btx1	8,4	21,70	21,88	0,48	1,69	1,66	---
Bt/Btx2	6,3	24,12	24,59	1,00	1,67	1,62	---

SOUZA, R. V. C. C. de. Caracterização micromorfológica por tomografia...

PERFIL – 02

Nº DE CAMPO: P2

DATA – 05/05/2010

CLASSIFICAÇÃO – LATOSSOLO AMARELO Distrocoeso típico.

LOCALIZAÇÃO – Usina Caeté, município de São Miguel dos Campos (AL), UTM 24 L 0824976 mE e 8931591 mN.

SITUAÇÃO, DECLIVIDADE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Trincheira situada em topo plano de tabuleiro, sob vegetação de floresta subperenifólia.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA – Terciário. Formação Barreiras.

MATERIAL ORIGINÁRIO – Sedimentos argilo-arenosos.

RELEVO LOCAL – Plano.

RELEVO REGIONAL – Plano

EROSÃO – Não aparente.

DRENAGEM – Bem a moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta subperenifólia.

USO ATUAL – Área de preservação.

Clima – AS' da classificação de Köppen

Descrito e coletado por – M. R. Ribeiro, R.V. C. C. Souza, J. F. W. F. Lima.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A 0-18 cm, bruno-acinzentado muito escuro (7,5YR 3/2, úmida); franco-arenosa; fraca a moderada pequena a média granular e blocos subangulares; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual plana.

AB 18-35 cm, bruno (7,5YR 5/3, úmida); franco-argilo-arenosa; fraca pequena a média granular com blocos subangulares; dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.

BA 35-70 cm, bruno-amarelado (7,5YR 5/4, úmida), mosqueado pouco, pequeno e distinto bruno- forte (10YR 5/6, úmido); franco-argilo-arenosa; maciça moderadamente coesa; muito dura, firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.

Bw1 70–115 cm, bruno-amarelado (7,5YR 5/8, úmida); argilo-arenosa; fraca pequena blocos angulares; muito dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa e plana.

Bw2 115-145 cm, bruno-amarelado (7,5YR 6/8, úmida); argilo-arenosa; fraca, pequena blocos subangulares, com aspecto maciço poroso; dura e muito dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa e plana.

RAÍZES: Muitas no A; comuns no AB; poucas em BA e Bw1; raras em Bw2.

OBS: 1. Muitos poros em A, AB, BA, Bw1 e Bw2.

2. Perfil descrito úmido, prejudicando a determinação estrutura e consistência seco. A consistência foi determinada posteriormente em laboratório, em torrões devidamente preservados.

ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS
Perfil 2. São Miguel dos Campos (AL)

Horizontes		Frações da amostra total (%)		Composição granulométrica da terra fina (g kg ⁻¹)				ADA (g kg ⁻¹)	GF (%)	Silte/argila	Densidade (g cm ⁻³)		Porosidade (%)
Símbolo	Prof (cm)	Cascalho 20-2mm	TFSA <2mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila <0,002 mm				solo	partículas	
A	0-18	0,11	99,89	583	119	55	243	263	---	0,23	1,28	2,67	52
AB	18-35	0,21	99,79	549	114	33	304	334	---	0,11	1,38	2,67	48
BA	35-70	0,21	99,79	410	104	38	448	51	---	0,09	1,4	2,67	48
Bw ₁	70-115	0,37	99,63	414	112	47	427	20	---	0,11	1,25	2,67	53
Bw ₂	115-150+	0,08	99,92	373	103	25	499	20	---	0,05	1,27	2,67	52

Horizontes	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmolc kg ⁻¹)						Valor T (soma)	Valor V (%)	m (%)	Pdisp (mg dm ⁻³)
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	H ⁺ +Al ³⁺	Al ³⁺				
A	4,7	4	1,28	0,05	0,03	1,36	5,98	0,95	7,34	18	41	---
AB	4,8	4,4	0,7	0,02	0,02	0,74	4,62	1,1	5,36	14	60	---
BA	4,9	4,2	0,95	0,01	0,02	0,98	3,88	1,05	4,86	20	52	---
Bw ₁	4,8	4,2	0,78	0	0,02	0,8	3,09	0,8	3,89	20	50	---
Bw ₂	4,8	4,2	0,85	0,01	0,02	0,88	2,68	1,08	3,56	25	55	---

Horizontes	C orgânico (g kg ⁻¹)	Ataque sulfúrico (g kg ⁻¹)			SiO ₂ / Al ₂ O ₃ (Ki)	SiO ₂ / R ₂ O ₃ (Kr)	Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃			
A	25,1	11,58	10,27	0,51	1,92	1,86	---
AB	17,2	14,71	13,49	0,60	1,85	1,80	---
BA	13	18,57	20,19	0,97	1,56	1,52	---
Bw ₁	8,7	18,97	21,88	1,02	1,47	1,43	---
Bw ₂	6,7	19,21	21,97	1,12	1,49	1,44	---

SOUZA, R. V. C. C. de. Caracterização micromorfológica por tomografia...

PERFIL – 03

Nº DE CAMPO: P3

DATA – 06/05/2012

CLASSIFICAÇÃO – ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso abrupto fragipânico, textura média/argilosa.

LOCALIZAÇÃO – Usina Coruripe, fazenda Capiatã, Município de Coruripe (AL), UTM 24 L 0800616 mE e 8891598 mN.

SITUAÇÃO, DECLIVIDADE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Trincheira situada em topo plano de tabuleiro, sob vegetação de floresta subperenifólia.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA – Terciário. Formação Barreiras.

MATERIAL ORIGINÁRIO – Sedimentos argilo-arenosos.

RELEVO LOCAL – Plano.

RELEVO REGIONAL – Plano.

EROSÃO – Não aparente.

DRENAGEM – Moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta subperenifólia

USO ATUAL – Área de preservação. Formação secundária da floresta subperenifólia.

Clima – AS' da classificação de Köppen

Descrito e coletado por – M. R. Ribeiro, R.V. C. C. Souza, J. F. W. F. Lima.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A 0-25 cm, bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/1, seca; 10YR 4/2, úmida); franco-arenosa; fraca pequena a média granular; macia e ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana

AB 25-46 cm, bruno (10YR 4/1, seca; 10YR 4/2, úmida); franco-argilo-arenosa; fraca pequena a média granular blocos subangulares; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.

BA 46–85 cm, bruno (10YR 5/3, seca 10YR 5/3, úmida); franco-argilo-arenosa; maciça moderada coesa; muito dura, firme, plástica e pegajosa; transição abrupta e ondulada (32-50cm).

Btx1 85–138 cm, bruno (10YR 5/3, úmido), mosqueado comum, médio e distinto bruno (10 YR 6/4, seco; 7,5YR 5/4, úmido); argila; maciça coesa; muito dura, muito firme, plástica e pegajosa; transição abrupta e ondulada (40-55cm).

Btx2 138–140 cm+, bruno-amarelado (10YR 6/6, úmido), mosqueado comum, pequeno e proeminente vermelho (2,5YR 5/6, úmido); argila; maciça coesa; extremamente dura, muito firme, plástica e pegajosa.

RAÍZES: Muitas em A e AB; comuns no BA; poucas no Bt.

OBS: 1. Muitos poros em A, AB e BA; poros comuns no Bt; poucos poros no Btx.

2. O fragipã apresenta pontos com penetração do material do horizonte Bt.

ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS
Perfil 3. Coruipé (AL)

Horizontes		Frações da amostra total (%)		Composição granulométrica da terra fina (g kg ⁻¹)				ADA (g kg ⁻¹)	GF (%)	Silte/argila	Densidade (g cm ⁻³)		Porosidade (%)
Símbolo	Prof (cm)	Cascalho 20-2mm	TFSA <2mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila <0,002 mm				solo	partículas	
A	0-25	0,10	99,90	728	137	24	111	121	---	0,22	1,28	2,67	52
AB	25-46	0,42	99,58	510	165	223	101	263	---	0,15	1,39	2,7	49
BA	46-85	0,57	99,43	339	131	33	497	467	---	0,07	1,45	2,67	46
Btx1	85-138	0,64	99,36	168	85	83	663	531	---	0,13	1,43	2,78	48

Horizontes	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)						Valor T (soma)	Valor V (%)	m (%)	Pdisp (mg dm ⁻³)
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	H ⁺ +Al ³⁺	Al ³⁺				
A	5,4	4,3	1,83	0,05	0,03	1,91	3,63	0,43	5,54	34	18	---
AB	5,3	4,1	1,03	0,07	0,04	1,14	3,3	1,2	4,44	26	51	---
BA	5,1	4	0,88	0,15	0,08	1,11	3,71	1,1	4,82	23	50	---
Btx1	5,2	4,2	1,55	0,18	0,09	1,82	3,26	0,85	5,08	36	32	---

Horizontes	C orgânico (g kg ⁻¹)	Ataque sulfúrico (g kg ⁻¹)			SiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ (Ki)	R ₂ O ₃ (Kr)	Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃
A	18,6	4,67	4,63	0,33	1,72	1,64	---
AB	11,4	7,09	6,58	0,43	1,83	1,76	---
BA	10,8	14,43	13,19	0,66	1,86	1,80	---
Btx1	9,6	19,10	20,48	0,98	1,59	1,54	---

SOUZA, R. V. C. C. de. Caracterização micromorfológica por tomografia...

PERFIL – 04

Nº DE CAMPO: P4

DATA – 25/05/2010

CLASSIFICAÇÃO – LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico.

LOCALIZAÇÃO – Sítio Boa Esperança, Povoado de Estanciazinha, município de Exu (PE).

SITUAÇÃO, DECLIVIDADE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Topo plano da Chapada do Araripe, sob capoeira em recuperação de Transição Caatinga / Cerrado.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA – Terciário

MATERIAL ORIGINÁRIO – Sedimentos argilo-arenosos.

RELEVO LOCAL – Plano.

RELEVO REGIONAL – Plano

EROSÃO – Não aparente.

DRENAGEM – Acentuada.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Transição Caatinga/Cerrado.

USO ATUAL – Capoeira em recuperação.

Clima – BSw^h da classificação de Köppen

Descrito e coletado por – M. R. Ribeiro, R.V. C. C. Souza, J. F. W. F. Lima.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A1 0-15 cm, bruno-amarelado (10YR 6/3, seca; 10YR 4/3, úmido); franco-argilo-arenosa leve; moderada pequena a média granular e blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual plana.

A2 15-37 cm, bruno-amarelado (10YR 5/4, seca; 10YR 4/4, úmido); franco-argilo-arenosa; fraca a forte pequena granular e blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual plana.

AB 37-50 cm, bruno-amarelado (10YR 6/6, seca; 10YR 5/6, úmido); franco-argilo-arenosa; fraca pequena a média granular e blocos subangulares; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual plana.

BA 50–87 cm, bruno-amarelado (10YR 5/6, úmida); franco-argilo-arenosa; fraca pequena a média granular e blocos subangulares; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição difusa plana.

Bw1 87-150+ cm, bruno-amarelado (10YR 5/8, úmida); franco-argilo-arenosa; fraca pequena granular e blocos subangulares com aspecto maciço poroso; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

RAÍZES: Muitas no A1, A2, AB; comuns no BA e Bw1.

OBS: 1. Muitos poros em A1, A2, AB, BA e Bw1.

ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS
Perfil 4. Exu (PE).

Horizontes		Frações da amostra total (%)		Composição granulométrica da terra fina (g kg ⁻¹)				ADA (g kg ⁻¹)	GF (%)	Silte/argila	Densidade (g cm ⁻³)		Porosidade (%)
Símbolo	Prof (cm)	Cascalho 20-2mm	TFSA <2mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila <0,002 mm				solo	partículas	
A ₁	0-15	0,35	99,65	643	72	42	242	242	---	0,18	2,74	1,35	51
A ₂	15-37	0,20	99,80	635	74	28	263	263	---	0,1	2,74	1,35	51
AB	37-50	0,32	99,68	554	84	47	315	41	---	0,15	2,82	1,41	50
BA	50-87	0,28	99,72	519	106	49	325	20	---	0,15	2,86	1,26	56
Bw	87-150+	0,22	99,78	523	79	42	356	20	---	0,12	2,82	1,21	57

Horizontes	pH (1:2,5)		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)						Valor T (soma)	Valor V (%)	m (%)	Pdisp (mg dm ⁻³)
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	H ⁺ +Al ³⁺	Al ³⁺				
A ₁	4,9	3,9	0,78	0,04	0,02	0,84	4,66	0,85	5,5	15	50	---
A ₂	4,7	3,9	0,4	0,02	0	0,42	4,17	1,08	4,59	9	72	---
AB	4,7	4	0,3	0,01	0	0,31	3,96	1,35	4,27	7	81	---
BA	4,5	4,1	0,25	0	0	0,25	2,89	1,23	3,14	8	83	---
Bw	4,6	4,1	0,28	0,01	0	0,29	2,48	0,85	2,77	10	75	---

Horizontes	C orgânico (g kg ⁻¹)	Ataque sulfúrico (g kg ⁻¹)			SiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ (Ki)	R ₂ O ₃ (Kr)	Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃
A ₁	20,3	---	---	---	---	---	---
A ₂	14,8	336	332	80	1,72	1,49	---
AB	12,6	---	---	---	---	---	---
BA	8,7	327	342	80	1,63	1,41	---
Bw	16,7	333	337	80	1,68	1,46	---

7. ANEXO

Anexo 1. Principais características micromorfológicas dos solos coesos (P1, P2 e P3) discutidos neste trabalho (Extraído de Lima Neto et al., 2010):

Argissolo Acinzentado distrocoeso fragipânico (Perfil 1)			
	Ap 19-20 cm (856)	BA 40-50 cm (857)	Bt 68-78 cm (858)
Fundo matricial	mat. gros.: 30 % mat. fino: 20 % porosidade: 50 %	mat. gros.: 30 % mat. fino: 50 % porosidade: 20 %	mat. gros.: 20 % mat. fino: 50 % porosidade: 30 %
Material grosseiro	Grãos de quartzo com tamanho médio de 0,91 mm, arredondados e moderadamente selecionados.	Grãos de quartzo com tamanho médio de 0,38mm, arredondado e moderadamente selecionados. Ocorrência de fragmentos de carvão.	Grãos de quartzo com tamanho médio de 0,32 mm, arredondados e moderadamente selecionados. Ocorrência de fragmentos de carvão.
Material fino	Material isotóico de cor bruno muito escuro, apresentando pedalidade moderada.	Material isotóico de cor bruno escuro, apresentando pedalidade moderada.	Material isotóico de cor bruno escuro, apresentando pedalidade fraca.
Poros	Poros interagregados do tipo empilhamento complexo (80 %) e cavidades arredondadas	Poros intra-agregados do tipo cavidades arredondadas (50 %) e fissuras (45 %). Presença de fissuras intra-agregados (5 %).	Poros interagregados do tipo cavidades arredondadas (20 %); Canais (15 %) e fissuras (60 %). Presença de fissuras intra-gregados (5 %).
Microestrutura	Composta por microagregados entre grãos e granular	Blocos subangulares	Blocos subangulares.
Distribuição relativa	Gefúrica-enáulica.	Porfírica	Porfírica.
Fábrica birrefringente	Indiferenciada	Indiferenciada	Ocorrências de algumas zonas com birrefringência do tipo salpicada granida
Feições pedológicas	Presença pelotas fecais; ortotúbulos e nódulos criptocristalinos.	Textural na parte superior da lâmina (Iluviação de argila); Feição de depleção (ferrãs); Presença de ortotúbulos; nódulos criptocristalinos e pelotas fecais.	Textural (Iluviação de argila); Presença de ortotúbulos; nódulos criptocristalinos e pelotas fecais.
Material orgânico básico	Fragmentos de raízes	Fragmentos de raízes	Fragmentos de raízes.

Latossolo Amarelo distrocoeso típico (Perfil 2)			
	AB 18-35 cm (853)	BA 35-55 cm (854)	Bw2 100-145 cm (855)
Fundo matricial	mat. gros.: 40 % mat. fino: 30 % porosidade: 30 %	mat. gros.: 30 % mat. fino: 50 % porosidade: 20 %	mat. gros.: 20 % mat. fino: 50 % porosidade: 30 %
Material grosseiro	Grãos de quartzo com tamanho médio de 0,46 mm, subarredondados e mal selecionados. Várias ocorrências de fragmentos de carvão.	Grãos de quartzo com tamanho médio de 0,42 mm, subarredondados e mal selecionados. Várias ocorrências de fragmentos de carvão.	Grãos de quartzo com tamanho médio de 0,68 mm, subarredondados e mal selecionados. Várias ocorrências de fragmentos de carvão.
Material fino	Material isotóico de cor bruno escuro, apresentando pedalidade moderada.	Material isotóico de cor bruno escuro, apresentando pedalidade moderada.	Material isotóico de cor bruno, apresentando pedalidade moderada.
Poros	Poros interagregados do tipo empilhamento complexo (60 %) e cavidades arredondadas (40 %).	Poros interagregados do tipo cavidades arredondadas (20 %); Canais (10 %) e fissuras (70 %)	Poros interagregados do empilhamento complexo (20 %); canais (30 %) e cavidades arredondadas (45 %). Presença de fissuras interagregados (5 %).
Microestrutura	Granular e granular adensada	Blocos subangular	Composta por blocos subangulares e microagregados entre grãos.
Distribuição relativa	Enáulica A zona inferior da lâmina apresenta distribuição enáulica-porfírica.	Porfírica	Porfírica-enáulica, sendo mais densa na parte inferior da lâmina.
Fábrica birrefringente	Indiferenciada	Indiferenciada	Indiferenciada
Feições pedológicas	Presença de ortotúbulos e nódulos criptocristalinos.	Textural (Iluviação de argila); Presença de ortotúbulos; nódulos criptocristalinos e pelotas fecais.	Presença de ortotúbulos; nódulos criptocristalinos e pelotas fecais.

SOUZA, R. V. C. C. de. Caracterização micromorfológica por tomografia...

Argissolo Amarelo distrocoeso fragipânico (Perfil 3)			
	AB 18-40cm (850)	BA 40-59 cm (851)	Bt 59-60 (852)
Fundo matricial	mat. gros.: 50 % mat. fino: 20 % porosidade: 30 %	mat. gros.: 50 % mat. fino: 20 % porosidade: 30 %	mat. gros.: 40 % mat. fino: 50 % porosidade: 10 %
Material grosseiro	Grãos de quartzo com tamanho médio de 0,38 mm, subarredondado e mal selecionados. Ocorrência de fragmentos de carvão.	Grãos de quartzo com tamanho médio de 0,24 mm, subarredondado mal selecionados. Alguns fragmentos de carvão.	Grãos de quartzo com tamanho médio de 0,32 mm, subarredondado e mal selecionados. Alguns fragmentos de carvão.
Material fino	Material isóptico de cor Bruno muito escuro, apresentando pedalidade bem desenvolvida.	Material isóptico de cor Bruno muito escuro, apresentando pedalidade bem desenvolvida.	Material isóptico de cor Bruno escuro, apresentando pedalidade moderada.
Poros	Poros interagregados do tipo empilhamento complexo (80 %) e cavidades subarredondadas com tamanho médio de 1,14 mm	Poros interagregados do tipo empilhamento complexo (60 %) e cavidades subarredondadas com tamanho médio de 0,76 mm	Poros interagregados do tipo fissuras (65 %) e cavidades arredondadas (30 %). Presença de fissuras intra-agregados (5 %).
Microestrutura	Granular	Granular	Blocos subangulares e ocorrência de microagregados entre grãos.
Distribuição relativa	Enáulica	Enáulica	Porfírica
Fábrica birrefringente	Indiferenciada	indiferenciada	Estriada e salpicada do tipo granada.
Feições pedológicas	Presença de ortotúbulos e pelotas fecais.	Presença de ortotúbulos e nódulos criptocristalinos.	Textural (Iluviação de argila com microlaminação preenchendo os poros). Presença de ortotúbulos e nódulos criptocristalinos.
Material orgânico básico		Fragmentos de raízes	

Anexo 2 - Micrografias obtidas com microscópio óptico dos horizontes coesos descritos acima: (a) horizonte Ap do perfil 1; (b) horizonte BA do perfil 1; (c) horizonte BA do perfil 1; (c) horizonte AB do perfil 2; (d) horizonte BA do perfil 2; (e) horizonte BA do perfil 2; (g) horizonte AB do perfil 3; (h) horizonte BA do perfil 3; (i) horizonte Bt do perfil 3 (Extraído de Lima Neto et al., 2010)

