UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

MINERALOGIA DA ARGILA E ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM ARGISSOLO EM CURVATURAS DE RELEVO.

Livia Arantes Camargo

Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior
Co-Orientador: Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal).

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
Fevereiro - 2009

Camargo, Livia Arantes
C172m Mineralogia da argila e atributos físicos de um argissolo em curvaturas de relevo. – – Jaboticabal, 2009
viii, 111 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2009
Orientador: José Marques Júnior
Banca examinadora: Marcílio Vieira Martins Filho, Zigomar Menezes de Souza
Bibliografia

1. Óxidos de ferro e alumínio 2. Caulinita 3. Atributos físicos 4. Relevo. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU: 631425:549.08

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CÂMPUS DE JABOTICABAL
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: MINERALOGIA DA ARGILA E ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM ARGISSOLO EM CURVATURAS DE RELEVO

AUTORA: **LIVIA ARANTES CAMARGO**

ORIENTADOR: **Dr. JOSE MARQUES JUNIOR**

Co-Orientador(a): Dr. GENER TADEU PEREIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL) pela Comissão Examinadora:

Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

Dr. MARCILIO VIEIRA MARTINS FILHO

Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA

Data da realização: 18 de fevereiro de 2009.

Presidente da Comissão Examinadora
Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

LIVIA ARANTES CAMARGO – nascida aos 6 de dezembro de 1983 em Ribeirão Preto – SP, cursou Engenharia Agronômica na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias- campus de Jaboticabal – UNESP, de 2002 a 2006. Durante esses anos fez estágio no Departamento de Solo e Adubos na área de mineralogia e entre 2007 e 2009 cursou o mestrado no Programas de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal).

Um pouco de ciência nos afasta de DEUS, muito nos aproxima.
(autor desconhecido)

DEDICO

Aos meus pais, Ronaldo e Maria José

AGRADECIMENTOS

A Deus e à minha mãe do céu Nossa Senhora.

Aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado me dando força nos momentos difíceis e comemorando em cada pequena e grande alegria.

Aos Professores José Marques Júnior e Gener Tadeu Pereira pela paciência e confiança dedicados esses anos todos.

Ao Fábio Júnio dos Santos que sempre me incentivou e deu confiança nos momentos de desanimo durante o curso.

Aos amigos recentes Diogo, Gabriela, Jesus, Sammy e aos de longa data Diego, Renata, Liliane, Carol pelo companheirismo durante o curso e nas cansativas viagens diárias.

A todos os amigos dentro e fora da universidade.

À Fundação de Amparo à pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP- pela concessão da bolsa de estudos.

À Usina São Domingos pela concessão da área de estudos.

Aos alunos de graduação Maria Jacqueline, Rafael, Lucas e Iara pelo imenso apoio nas análises de laboratório.

Às funcionárias do Departamento de Solos e Adubos Célia e Cláudia e ao professor Marcílio Martins Vieira Filho.

SUMÁRIO

Página

CAPÍTULO 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS 01
1.1 Introdução 01
1.2 Revisão de Literatura 02
1.2.1 Mineralogia da fração argila do solo 02
1.2.2 Atributos físicos do solo 07
1.2.3 Importância dos minerais da fração argila nos atributos físicos do solo 09
1.2.4 Variabilidade espacial 12
1.2.5 Influência do relevo na mineralogia da fração argila e nos atributos físicos do solo 15
1.3 Referências 17

CAPÍTULO 2. CARACTERIZAÇÃO DA MINERALOGIA DA FRAÇÃO ARGILA DE UM ARGISSOLO EM DIFERENTES CURVATURAS DO RELEVO 34
2.1 Introdução 35
2.2 Material e Métodos 37
2.3 Resultados e Discussão 42
2.4 Conclusões 53
2.5 Referências 53

CAPÍTULO 3- ATRIBUTOS INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DE UM ARGISSOLO SOB DIFERENTES CURVATURAS DO RELEVO 60
3.1 Introdução 61
3.2 Material e Métodos 63
3.3 Resultados e Discussão 67
3.4 Conclusões 79
3.5 Referências 79

CAPÍTULO 4 – MINERALÓGIA DA FRAÇÃO ARGILA E ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM ARGISSOLO EM DIFERENTES CURVATURAS DE RELEVO 88
4.1 Introdução 88
4.2 Material e Métodos 90
4.3 Resultados e Discussão 94
4.4 Conclusões 102
4.5 Referências 103

CAPÍTULO 5 – IMPLICAÇÕES 108

APÊNDICE 109

MINERALOGIA DA ARGILA E ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM ARGISSOLO EM CURVATURAS DE RELEVO.

RESUMO – Os atributos mineralógicos e físicos possuem dependência espacial e a distribuição espacial destes atributos possui relação com as formas do relevo. O objeto deste trabalho foi avaliar os atributos mineralógicos da fração argila e os atributos físicos de um argissolo em curvaturas do relevo, assim como avaliar a correlação entre esses atributos. Uma malha de dimensão 100 x 100 m foi delimitada em uma área caracterizada pela forma convexa e outra pela fôrma côncava. As malhas possuem espaçamento regular de 10 x 10 m e os pontos de cruzamento deste espaçamento determinaram os pontos de coleta das amostras, num total de 121 pontos amostrais georreferenciados em cada malha. Os atributos físicos foram avaliados nas profundidades 0,0- 0,2 e 0,2-0,4 m e os atributos mineralógicos na profundidade 0,0-0,2 m. Os atributos físicos analisados foram diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico, agregados maiores que 2 mm, agregados entre 2 e 1 mm , agregados menores que 1 mm, microporos, macroporos, volume total de poros, densidade do solo, resistência do solo à penetração e teor de água no solo, já os atributos mineralógicos da fração argila foram largura a meia altura, diâmetro médio do cristal dos óxidos de ferro, da caulinita e gibbsita, substituição isomórfica e área de superfície específica da hematita e goethita. Os teores da goethita e hematita e razão goethita/(goethita+hematita) e razão caulinita/(caulinita+gibbsita) também foram calculados. Os dados foram submetidos às análises estatísticas e geoestatísticas para avaliação da variabilidade espacial e influência das curvaturas nestes atributos. Para avaliação da relação entre os atributos da mineralogia e físicos realizaram-se as análises de correlação simples e espacial. Os atributos físicos e mineralógicos apresentaram-se dependentes das curvaturas do relevo. Observou-se também a influência da cristalinidade da goethita e gibbsita nos atributos físicos do solo.

Palavras-chave: caulinita, gênese do solo, gibbsita, óxidos ferro,variabilidade espacial

CLAY MINERALOGY AND PHYSICAL ATTRIBUTES OF ARGISSOL ON RELIEF CURVATURES

SUMMARY – The mineralogicals and physical attributes have spatial dependence and the distribution of these attributes has relation with the forms of relief. The object of this study was to evaluate the attributes of clay mineralogy and the physical attributes of an argissol in curvatures of relief, as well as assess the correlation between these attributes. A grid size of 100 x 100 meters was defined in an area characterized by the convex shape and another in an area characterized by the concave shape. The grids have regular spacing of 10 x 10 m and the spacing of the points of intersection determine the points of collection of samples, a total of 121 georeferenced sample points in each grid. The physical attributes were evaluated in depth from 0.0 - 0.2 and 0.2 -0.4 m and the mineralogical attributes in depth 0,00-0,20 m. The physical attributes were analyzed: mean weight diameter, mean geometric diameter, aggregates larger than 2 mm, aggregates between 2 and 1 mm, aggregates smaller than 1 mm, microporosity, macroporosity, total porosity, bulk density, penetration resistance and water content in soil. The attributes of minerals were: width at half height, average diameter of crystals of iron oxides and kaolinite and gibbsite and isomorphic substitution and specific surface area of hematite and goethite. The contents of goethite and hematite and ratio goethite / (goethite + hematite) [Gt / (Gt + Hm)] and ratio kaolinite / (kaolinite + gibbsite) [Ct / (Ct + Gb)] were also calculated. Data were subjected to statistical and geostatistical analysis to evaluate the spatial variability and influence of these curvatures on these attributes. To assess the relation between mineralogy and physical attributes simple and spation correlation analysis where made. The physical and mineralogical attributes and depend on the curvature of the relief. There was also the influence of crystallinity of goethite and gibbsite in soil physical.

Keywords: Kaolinite, soil genesis, gibbsite, iron oxides, spatial variability

Capítulo 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 Introdução

A cultura da cana-de-açúcar ocupa extensas áreas no estado de São Paulo, majoritariamente em Latossolos e Argissolos. Os Argissolos são conhecidos por sua capacidade de armazenamento de água às plantas por um tempo mais longo devido ao gradiente de textura no perfil destes solos e características estruturais, muito influenciadas pela mineralogia da argila. O equilíbrio entre os fatores que atuam positivamente e negativamente nos atributos do solo é particularmente importante em solos com baixos teores de matéria orgânica e teor de argila como no caso dos Argissolos (SILVA et al., 2006).

Os argissolos possuem sua mineralogia da fração argila composta, entre outros minerais, por óxidos de ferro, caulinita e gibbsita. Contudo estudos que apresentam uma completa caracterização destes minerais nesta classe de solo são escassos, principalmente se tratando dos óxidos de ferro, minerais estes estudados abundantemente nos latossolos brasileiros.

A mineralogia da fração argila é considerada um fator intrínseco do solo que influencia o potencial de alteração dos atributos físicos do solo. Muitos autores demonstram em seus estudos a influência dos minerais da fração argila nos atributos físicos (McNEAL et al., 1968; CURI & FRANZMEIER, 1984; SCHWERTMANN & KÄMPF, 1985; MESQUITA FILHO & TORRENT, 1993; FERREIRA et al., 1999a,b; PEDROTTI, 2000; VITORINO et al., 2003; AZEVEDO & BONUMÁ, 2004; GHIDIN et al., 2006a,b). Ressalta-se que estas relações foram estudadas majoritariamente em Latossolos, havendo relativa carência de dados para Argissolos desenvolvidos de arenitos. Essas informações podem ser úteis para a previsão do potencial de alteração e predição do comportamento físico do solo, pois eles influenciam a adsorção e absorção de nutrientes, a infiltração e redistribuição de água, as trocas gasosas e o desenvolvimento do sistema radicular.

A relação entre os minerais da fração argila e os atributos físicos do solo é abordada pela literatura, porém, a maioria destas relações é obtida por meio de uma

simples comparação e associação de médias desses atributos, sem levar em consideração o número e localização das amostras na paisagem. Este fato impossibilita, algumas vezes, a interpretação da variação de dados obtidos.

O relevo tem sido considerado o mais importante fator abiótico de controle dos processos pedogenéticos em escala local (BUOL et al., 1997; RESENDE et al., 1997). Em conseqüência, variações dos atributos na paisagem são associadas às características do relevo como declividade e formas (curvaturas). As formas do relevo controlam a distribuição de água e materiais solúveis provocando convergência desses materiais em áreas côncavas, divergência em áreas convexas, e erosão e deposição em áreas de forma linear com presença de declividade (HUGGETT, 1975; PENNOCK & JONG, 1987).

Os atributos físicos e os mineralógicos possuem dependência das formas do relevo. O estudo da dependência espacial destes atributos bem como a relação entre eles na paisagem pode permitir o entendimento das relações de causa-efeito da variação de atributos do solo, além de permitir a divisão de áreas homogêneas no campo. A delimitação de áreas com o mesmo potencial de produção vem de encontro com as premissas da agricultura de precisão no sentido de determinar, em diferentes escalas, locais com menor heterogeneidade dos atributos que envolvem a produção agrícola, o que pode permitir o gerenciamento preciso e racional de insumos e atividades agrícolas.

1.2 Revisão de Literatura

1.2.1 Mineralogia da fração argila do solo

Solos tropicais intemperizados possuem mineralogia da fração argila caracterizada pela predominância de argilominerais do tipo 1:1 e de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Segundo COELHO & VIDAL-TORRADO (2003) caulinita, hematita, goethita, gibbsita e anatásio são os principais constituintes da fração argila dos

horizontes estudados de argissolos desenvolvidos de arenitos do grupo Bauru, já MONIZ & CARVALHO (1973) e CARVALHO (1976) afirmam que a mineralogia predominantemente, caulinitica é comum nos solos desenvolvidos sobre os sedimentos arenosos deste mesmo grupo. SOARES JÚNIOR (2005) analisando um Argissolo Vermelho Distrófico concluiu que os argilominerais identificados foram: caulinita, gibbsita e ilita, sendo a caulinita o argilomineral predominante representando 88,9% da fração argila desferrificada do horizonte Bt.

SCHWERTMANN & TAYLOR (1989) citaram os diferentes óxidos de ferro que podem ocorrer no solo e suas características. Eles afirmaram que goethita e hematita são os minerais de maior ocorrência em solos intemperizados das regiões tropicais e subtropicais e que, geralmente, estes ocorrem associados. A maior solubilidade do silício em relação ao Fe e ao Al explicam a presença de goethita, hematita, caulinita e gibbsita em grandes quantidades na fração argila de solos altamente intemperizados em detrimento de outros minerais silicatados (SCHAEFER et al., 2008).

Segundo KÄMPF & CURI (2000), os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio são importantes indicadores pedogenéticos por terem sua formação influenciada pelas condições do ambiente e por persistirem por longo tempo no solo. A complexidade do ambiente em que são formados os minerais da fração argila explica populações com características distintas desses minerais. SCHWERTMANN & KÄMPF (1985) encontraram diferenças entre características de goethitas e hematitas entre solos da região sul e central Brasil. A diferença entre as populações dos óxidos e hidróxidos de ferro pode ser encontrada até mesmo em uma microescala, fato este, relevante nos estudos de caracterização destes minerais (SCHWERTMANN & TAYLOR, 1989).

Em um estudo do comportamento de populações de goethitas e hematitas em Latossolos, INDA JÚNIOR & KÄMPF (2005) concluíram que as goethitas se mostraram mais heterogêneas quanto à substituição por Al^{+3}, morfologia e cristalinidade; já a população de hematita apresentou-se mais homogênea. Segundo esses autores, a menor variação dos atributos da hematita se deve a maior especificidade dos fatores encontrados no ambiente de formação deste mineral em relação a goethita, que é mais sensível às mudanças do meio. Populações de caulinita e gibbsita também apresentam

variações em seus atributos cristalográficos em pedoambientes específicos (CURI & FRANZMEIER, 1984, PEDROTTI et al., 2003).

Três hipóteses de formação da goethita e hematita advindas da rocha são discutidas no estudo de FABRIS et al. (1985). A primeira defende que ambos minerais são derivados da rocha, a segunda hipótese implica na teoria que a hematita é o óxido de ferro primário e a goethita é um produto secundário derivado da hematita e, a terceira é que a goethita pode ter origem primária (rocha) e secundária.

A formação dos óxidos de ferro (goethita e hematita) pedogenéticos pode ser considerada em dois sistemas. O sistema determinado Fe (III) o Fe^{+2}, resultante da intemperização dos minerais primários, se oxida a Fe^{+3} e se precipita originando ferrihidrita ou goethita de acordo com a liberação do Fe durante o intemperismo (SCHWERTMANN, 1985). A ferrihidrita é precursora necessária para a formação da hematita, enquanto a goethita é formada por íons Fe^{+3} da solução. No sistema determinado Fe (II) o Fe^{+2}, por processos de oxidação, origina a lepidocrocita ou goethita, ou ainda ferrihidrita.

Para a gibbsita a estabilidade é encontrada em pH 5,2 (LINDSAY, 1979) e este mineral tende a ser encontrado quando o processo de intemperismo e lixiviação são intensos. SCHAEFER et al. (2008), em uma revisão que aborda a mineralogia da fração argila dos latossolos brasileiros, relataram a formação da caulinita e gibbsita. Para a origem da gibbsita dois mecanismos são propostos: a) por meio da rápida dissolução na fase inicial do intemperismo de minerais Al-silicatados como os feldspatos; b) por meio do intenso e longo intemperismo do solo incluindo a dissolução da caulinita (desilicatização) e alega que em ambos os processos a drenagem sem impedimento, baixa atividade do silício e baixa concentração de bases na solução do solo são fundamentais na formação deste mineral. Quanto a caulinita sua origem é dada pela alteração de uma variedade de minerais primários como os feldspatos e micas em diferentes condições ambientais. Porém, comumente encontradas em ambientes de clima seco e quente com drenagem ilimitada mas não com excessiva lixiviação de sílica além de baixo pH.

Independente do processo de formação da hematita e goethita, a proporção de ambos os óxidos de ferro no solo é dependente do ambiente. Entre os fatores pedoambientais que influenciam a proporção de hematita e goethita são: concentração do Fe na solução e atributos como pH, temperatura, atividade da água no solo, matéria orgânica, atividade do alumínio na solução do solo e o ambiente iônico. O esquema de formação da hematita e goethita contendo esses fatores é encontrado em SCHWERTMANN & TAYLOR (1989).

Assim como o teor e a proporção dos óxidos de ferro, a forma e o tamanho do cristal destes minerais são influenciados pelo ambiente de formação. A relação entre o ambiente e as propriedades da hematita e goethita refletem, portanto, as variações das condições ambientais justificando o caráter indicador pedoambietal dos óxidos de ferro (SCHWERTMANN, 1985; KÄMPF & CURI, 2000).

A variação dos tamanhos dos cristais nos óxidos de ferro, segundo SCHWERTMANN & CARLSON (1994), é função das diferenças de: ambientes de formação, taxa de formação dos óxidos de ferro, inibidores de cristalização como matéria orgânica e idade da goethita. GUALBERTO (1984) encontrou cristais de goethita maiores nos Latossolos da Amazônia comparando com os Latossolos goethiticos do Brasil Central. Esta larga faixa de cristalinidade destes minerais deve afetar a sua superfície específica, capacidade de troca de ânions (CTA) e conseqüentemente adsorsão de fósforo e, vários fenômenos de superfície.

Segundo FITSPATRICK & SCHWERTMANN (1982) a largura a meia altura (LMA) da reflexão da goethita pode ser usada como indicativo do grau de cristalinidade do mineral. Quanto menor a LMA maior o grau de cristalinidade da goethita. SCHWERTMANN & KÄMPF (1985) estudando solos brasileiros encontraram para a hematita o diâmetro médio do cristal (DMC) variando em torno de 11 a 58 ηm sendo que o intervalo encontrado, para latossolos, foi de 11 a 58 ηm e para argissolos, foi de 12 a 31ηm. Já para a goethita a cristalinidade do mineral foi obtida através da LMA em º2θ, variando entre 0,30 a 0,71 º2θ sendo que, para latossolos a amplitude deste atributo foi de 0,30 a 0,71 º2θ e nos argissolos de 0,59 a 0,62 º2θ.

Variações de valores de diâmetro médio do cristal também são encontradas para os minerais caulinita e gibbsita. CAMARGO et al. (2008) encontrou uma variação do DMC de 22 a 58 e de 79 a 99 ηm respectivamente para os minerais caulinita e gibssita respectivamente em uma área de um hectare situada em um latossolo.

A alta variação de substituição isomórfica do ferro pelo alumínio encontrada na goethita também reflete diferentes ambientes pedogenéticos. Altos valores de substituição isomórfica são encontrados em solos altamente intemperizados (CURI & FRANZMEIER, 1984; SCHWERTMANN & KÄMPF, 1985).

FITZPATRICK & SCHWERTMANN (1982) citaram que em ambientes de forte intemperismo, condições de alta acidez e solo não hidromórfico, a atividade do Al aumenta e conseqüentemente o torna mais disponível para ser incorporado na estrutura da goethita. Porém, segundo SCHWERTMANN & TAYLOR (1989) os fatores que determinam o grau de substituição isomórfica do Al em goethitas não são completamente entendidos. O pH e a concentração de Si são fatores que influenciam a atividade do Al solúvel (DIDIER et al., 1983) e explicam porque goethitas em ambientes gibssiticos e altamente desilicatados possuem altos valores de substituição isomórfica do Al.

NORRISH & TAYLOR (1961) encontraram substituição isomórfica do Al na goethita da ordem de 33 moles%, e sugeriram que esse valor possa estar próximo do limite superior. No Brasil os valores de substituição isomórfica de Al deste mineral em Latossolos têm sido da ordem de 28 a 30 moles% (RESENDE, 1976). SCHWERTMANN & KÄMPF (1985) encontraram entre 13 e 25 moles% no Rio Grande do Sul e 15 e 33 moles%, para solos em Goiás. KÄMPF et al. (1988) registraram valores máximos de 36 moles% para goethita e uma faixa de 4 a 17 moles% para hematita.

A substituição isomórfica do Fe^{3+} por Al^{3+} na estrutura do mineral pode afetar sua cristalinidade. Isto ocorre devido uma contração na cela unitária decorrente do menor raio iônico do Al^{3+} (NORRISH & TAYLOR, 1961) em relação ao Fe^{3+}. Este fenômeno também determina uma maior estabilidade dos cristais à reações redutivas, conseqüência do estado de oxidação constante do alumínio (INDA JÚNIOR et al., 2005).

Outro atributo dos óxidos de ferro, susceptível aos fatores do ambiente de formação dos minerais, é a área de superfície específica que depende das condições em que os cristais são formados. Por exemplo, ambientes com alta taxa de crescimento do cristal e com baixas temperaturas podem conduzir à formação de cristais mal ordenados e com alta área de superfície específica . O contrário ocorre em ambientes com baixas taxas de crescimento dos cristais e altas temperaturas. A área de superfície específica influencia a reatividade dos óxidos de ferro pois a quantidade dos grupos funcionais existentes na superfície desses minerais, que interagem com as espécies solúveis e gases, dependem deste atributo (CORNELL & SCHWERTMANN, 1996). Para a goethita do solo os valores da área de superfície específica estão entre 20 e 200 $m^2 g^{-1}$ (SCHWERTMANN,1988) já para hematitas sintética o intervalo é de 2 a 90 $m^2 g^{-1}$ (CORNELL & SCHWERTMANN, 1996).

1.2.2 Atributos físicos do solo

A expansão da cultura de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, sustentada entre outros fatores, pela intensa mecanização, resulta em muitos casos no manejo inadequado do solo e este fato tem provocado modificações negativas nos atributos físicos do solo (STONE & SILVEIRA, 2001) aumentando sua erosão, reduzindo a produtividade das culturas (SCHAEFER et al., 2001) e causando a compactação do solo (DIAS JÚNIOR, 2000). Assim, fica claro que muitos solos sob cultivo de cana-de-açúcar podem estar com suas propriedades físicas inadequadas, ou um tanto comprometidas para rendimento das plantas devido o característico manejo da cultura.

O solo como meio adequado para o crescimento das plantas, não depende somente da sua fertilidade, a mobilidade da água e do ar também é importante para o rendimento das culturas (HILLEL, 1980). Os atributos físicos do solo são responsáveis pelo transporte do ar, água, calor e das substâncias solúveis através do solo (SANCHEZ et al., 1981). A dinâmica das substâncias presentes no solo aliada as condições de crescimento das raízes e proliferação de microorganismos, são fatores presentes na avaliação da sua qualidade física (TOOP et al., 1997). A qualidade física

do solo, segundo REYNOLDS et al. (2002) é avaliada por meio de atributos físicos cujo entendimento dos mesmos é fundamental para sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Os valores adequados dos desses atributos físicos para o crescimento das plantas estão em permanente discussão e em unanimidade depende da classe de solo em questão (REYNOLDS et al., 2002). Para a macroporosidade, por exemplo, o valor de 10 % é encontrado na literatura como valor mínimo para o desenvolvimento das raízes (VOMOCIL & FLOCKER, 1966; GRABLE & SIEMER, 1968). Como valores de densidade do solo que pode acarretar comprometimento ao crescimento das raízes podem-se citar: >1,5 Mg m^{-3} para solos argilosos e >1,6-1,8 Mg m^{-3} para solos arenosos (VEIHMEYER & HENDRICKSON,1948), 1,2 a 1,4 Mg m^{-3} para solos com mais de 10% de silte + argila (JOANES, 1983).

Para resistência do solo à penetração EHLERS et al. (1983) relataram que valores superiores á 5,0 MPa são admitidos em plantio direto. DEXTER (1987) enfatiza a relação da umidade e a resistência do solo à penetração, e cita valores acima de 4 MPa aceitáveis, em se tratando de solos com teor de água no solo mais elevada. SECCO et al. (2004) estudando um Latossolo Vermelho relatou que quando os valores de resistência do solo à penetração foram de até 2,6 MPa, os de densidade do solo de até 1,51 Mg m^{-3} e volume de macroporos superiores a 0,10 dm^3 dm^{-3} , em condições de campo, não houve comprometimento do rendimento de grãos de soja.

Vários são os estudos que relatam o efeito negativo do manejo mecanizado nos atributos físicos do solo sob diversos cultivos. Este efeito é estudado em argissolos por diversos autores nacionais (ARAÚJO et al., 2004; MARCOLAN & ANGHINONI, 2006; MARCOLAN et al., 2007; SUZUKI et al., 2007) e internacionais (SALAKO et al., 1999; LAMPURLANÉS & CANTERO-MARTINEZ, 2003; AGELE et al., 2005; AGBEDE, 2006). SILVA et al. (2006) estudaram o efeito dos diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Argissolo Amarelo Coeso, com textura média/argilosa e verificaram que em áreas cultivadas houve uma diminuição no diâmetro médio ponderado dos agregados e da umidade ótima de compactação, em relação ao solo de mata nativa e ao solo com aplicação de vinhaça. Segundo

SEYBOLD et al. (1999) o efeito do manejo nos atributos físicos do solo é dependente da sua textura e mineralogia.

A compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado durante a qual existe um aumento de sua densidade e expulsão do ar dos poros. Portanto para seu diagnóstico, é imprescindível a avaliação correta dos atributos físicos do solo. Sua origem pode ser natural como conseqüência de sua composição textural, regime hídrico ou processo pelo qual o solo foi formado, ou provocada pelo efeito da mecanização (HILLEL, 1980). Segundo DIAS JÚNIOR (2000), a questão crítica em relação à susceptibilidade do solo à compactação está em definir a umidade adequada para execução de operações mecanizadas. Assim, a importância da umidade consiste em indicar a máxima pressão que o solo pode suportar sem que a compactação ocorra. DIAS JÚNIOR (2000) deixou clara a relação da susceptibilidade do solo à compactação de argissolos com umidade e textura dos mesmos.

Apesar das modificações negativas ocorridas nos atributos dos solos, após longos períodos submetidos a formas tradicionais de uso e manejo, elas não impedem a exploração do solo; porém, o emprego de práticas menos intensivas concorreria para maior acúmulo de matéria orgânica e menor degradação da estrutura com vantagens econômicas e ambientais (SOARES et al., 2005).

1.2.3 Importância dos minerais da fração argila nos atributos físicos do solo

PRADO (2003) concluiu em seu estudo que os Argissolos com horizonte A menos espesso e com restrição de drenagem interna disponibilizam água por mais tempo para a cana-de-açúcar e que essa informação merece ser contemplada nos ambientes de produção de cana-de-açúcar. Este comportamento está ligado às características físicas do solo influenciadas pela mineralogia do solo (FERREIRA et al., 1999b).

Num estudo conduzido por ARCA & WEED (1966), com amostras do horizonte de seis solos da região da Carolina do Norte (EUA), ficou evifenciada a existência de correlação entre o conteúdo de argila, conteúdo de óxidos de ferro livre e ocorrência e

distribuição do tamanho de agregados, com maior contribuição do conteúdo de argila para agregados menores que 0,25 mm.Verificou-se no mesmo estudo , que os teores de óxidos de ferro livre influenciaram significativamente todos os tamanhos de agregados. Correlação entre óxidos de ferro e estabilidade do agregado foi encontrada também por BARBERIS et al. (1991), porém estes autores concluíram que o processo de agregação não é afetado pelo tipo de óxido de ferro e sim pela dimensão dos mesmos.

Os estudos de McNEAL et al. (1968) sobre a dispersão dos agregados através da remoção dos óxidos da fração argila, contribuíram para o entendimento da relação entre esses minerais e a estabilidade dos agregados. GOLDBERG (1989) estudou a participação dos óxidos de ferro nos atributos físicos do solo dentre elas a estabilidade do agregado. Os efeitos positivos dos óxidos de ferro e alumínio na agregação do solo se devem ao comportamento de agentes cimentantes que estes óxidos possuem nos agregados (McINTYRE, 1956; KEMPER, 1966).

Pode-se esperar baixa estabilidade de agregados em solos com altos teores de areia fina da mesma forma que se pode esperar alta estabilidade de agregados em solos com alto teor de argila. O cátion mais eficiente para estabilização de agregados foi o Fe, em Latossolos sob plantio direto nos municípios Campos Novos Paulista e Angatuba, ambos em SP, resultados estes obtidos por DUFRANC et al. (2004).

A estabilidade dos agregados do solo está relacionada com o teor e atributos dos óxidos de ferro como hematita e goethita (LUTZ, 1936 ; KROTH & PAGE, 1946; CHESTERS et al.,1957; SCHWERTMANN & KÄMPF.,1985). Outros trabalhos indicam a influência da cristalinidade dos óxidos na estabilidade dos agregados. Resultados dos trabalhos de SCHAHABI & SCHWERTMANN (1970) e BLACKEMORE (1973), permitiram concluir que goethitas sintéticas de pior cristalinidade, indicados pela maior largura a meia altura (LMA) dos cristais e maior relação Feo/Fet, formam agregados mais estáveis, relativamente às goethitas com melhor cristalização.

Segundo CORNELL (1973), a íntima relação de goethitas de pior cristalinidade com a estabilidade do agregado é atribuída à maior área de superfície específica desse mineral. Este fenômeno proporciona um aumento no número de grupos hidroxilas

disponível para interação com os demais compostos que favorecem a estabilidade dos agregados. GHIDIN et al. (2006b) relataram que hematita, goethita e gibbsita foram responsáveis pelo aumento na macroporosidade, porosidade total e redução na densidade do solo, para Latossolo Bruno ácrico e Latossolo Vermelho distrófico.

Estudando solos da região tropical e subtropical, INDA JÚNIOR et al. (2007) verificaram que estabilidade dos complexos organo-minerais, que são a estrutura básica dos agregados, foi diretamente relacionada aos teores de carbono orgânico e à mineralogia da fração argila. Dentre as variáveis mineralógicas avaliadas, o teor de óxidos de ferro de baixa cristalinidade (Fe_o), bem como as proporções de goethita e de gibbsita na fração argila, foram determinantes à estabilidade dos complexos organo-minerais desses solos.

Caulinita e gibbsita também influenciam características físicas do solo e o conhecimento dessas relações é importante para o entendimento do comportamento dos atributos do mesmo. FERREIRA et al. (1999b) relataram que caulinita e gibbsita são os constituintes mineralógicos com maior influência sobre nos atributos físicos dos Latossolos da região Sudeste do Brasil.

AZEVEDO & BONUMÁ (2004) citaram que em cinco horizontes B óxicos, os agregados mais estáveis são os de solos com alta razão gibbsita/(gibbsita+caulinita). FERREIRA et al. (1999a) concluiu que caulinita e gibbsita são os minerais responsáveis pelo desenvolvimento da estrutura dos latossolos estudados. Segundo VITORINO et al. (2003) para Latossolos e Argissolos da Região Sudeste do Brasil, a estabilidade dos agregados do solo de tamanho de silte são influenciados positivamente pela gibbsita, enquanto a caulinita promove o efeito inverso. Este resultado pode estar relacionado com a participação do $Al(OH)_3$ como agente de ligação entre as partículas, justificando a positiva interferência da gibbsita na estabilidade do agregado (PEDROTTI, 2000).

Estes minerais não são importantes somente na agregação do solo, a densidade do solo (Ds) também é afetada, apresentando correlação positiva entre caulinita e Ds, e o inverso ocorre com a gibbsita (FERREIRA et al., 1999b; PEDROTTI et al., 2003; GUIDIN et al., 2006b). Valores de densidade do solo mais baixos para Latossolos gibbsíticos, e mais altos para Latossolos cauliníticos têm sido reportados na literatura

(SILVA et al., 1995; MUGGLER et al., 1996; CHAGAS et al., 1997). Ressalta-se que estas relações foram estudadas majoritariamente em Latossolos, havendo relativa carência de dados para Argissolos desenvolvidos de arenitos.

1.2.4 Variabilidade espacial

Delineamentos estatísticos convencionais são usados com sucessos na ciência do solo, quando as unidades básicas de amostragem são locadas em áreas relativamente pequenas e uniformes quanto aos atributos do solo. Porém, estes requisitos não se aplicam quando é necessária a condução de experimentos ao longo de paisagens heterogêneas (BISHOP & LARK, 2006). A estatística clássica assume que a variabilidade ao redor da média é aleatória e independente da distribuição geográfica das unidades amostrais. Porém, para DANIELS & NELSON (1987) a estatística univariada é pouco recomendada para estudos ambientais, uma vez que avalia o comportamento das variáveis duas a duas.

Neste sentido, o trabalho torna-se puramente comparativo, produzindo resultados que permitem apenas testar certas hipóteses, podendo direcionar os pesquisadores a resultados equivocados. UPCHURCH & EDMONDS (1993) corroboram esta idéia ao afirmar que os métodos estatísticos e as modalidades de coleta tradicionais, normalmente são inadequados para os estudos que visam descobrir e entender os processos responsáveis pela variabilidade do solo. Isto pelo fato de existir, nos estudos pedológicos, múltiplas populações exigindo um número de amostras para estimar parâmetros de interesse. Muitos estudos mostram que o aspecto aleatório da variabilidade do solo freqüentemente possui uma componente que é espacialmente dependente (CAMPBELL, 1978; BURGESS & WEBSTER, 1980; VIEIRA et al., 1981; McBRATNEY et al.,1982; TRANGMAR et al., 1985).

A variabilidade do solo é dependente da interação dos seus fatores de formação com a paisagem, assim como da associação desta interação com o manejo (TRANGMAR et al., 1985). Dentre as técnicas de avaliação da variabilidade espacial dos atributos do solo está a geoestatística, que também permite o estudo da estrutura

da dependência espacial (VIEIRA et al., 1983). Técnica esta baseada na teoria das variáveis regionalizadas (VIEIRA, 2000). Segundo MATHERON (1963), o conceito de variáveis regionalizadas é uma função espacial numérica que varia de um local para o outro, com uma continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples.

Dentre as ferramentas da geoestatística está o semivariograma que permite estudar o grau de dependência espacial entre os pontos amostrais distribuídos em um esquema sistemático e referenciado de amostras (ISSAKS & SRIVASTAVA, 1989). O semivariograma é um gráfico da função semivariância *versus* distância. A semivariância em uma dada distância é estimada pela seguinte equação:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \qquad (1)$$

em que: $\hat{\gamma}(h)$ é o semivariograma experimental; N(h) é o número de pares experimentais de dados separados pelo vetor h e Z representa os valores medidos para os atributos.

O semivariograma é representado pelo gráfico da semivariância $\gamma(h)$ versus a distância *h* e possui os seguintes parâmetros: a) efeito pepita (C_0) que representa erros na medição ou de variabilidade em pequena escala. b) patamar ($C_0 + C_1$) que é atingido quando a variância dos dados se torna constante com a distância entre as amostras c) o alcance (a) que ó o valor de *h* no qual $\hat{\gamma}(h)$ se estabiliza, ou seja, os pontos localizados numa área de raio até o alcance são mais homogêneos entre si do que aqueles localizados fora dela (VIEIRA, 2000).

De acordo com WEBSTER (1985) e WEBSTER (2000), é possível ajustar funções simples a esses pontos. Alguns modelos matemáticos podem ser usados, desde que algumas condições sejam atendidas. Os principais modelos são demonstrados a seguir:

a) Modelo esférico:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1\left[\frac{3}{2}\left(\frac{h}{a}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^3\right] \qquad \text{para } 0 < h < a \qquad (2)$$

γ (h) = C_0+C_1 para h ≥ a

O modelo esférico é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita (C_0) e do patamar (C_0+C_1), depois passando-se uma reta que intercepte o eixo y em C_0 e seja tangente aos primeiros pontos próximos de *h* = 0. Essa reta cruzará o patamar à distância, a'=(2/3)a. Assim, o alcance (a) será a = 3a'/2. O modelo esférico é linear até aproximadamente (1/3)a (VIEIRA, 2000), sendo este modelo o de maior ocorrência para os atributos de solo (TRANGMAR et al., 1985).

b) Modelo exponencial

$$\gamma(h) = C_0 + C_1\left[1 - \exp\left(-3\frac{h}{a}\right)\right] \qquad \text{para } 0 < h < d \qquad (3)$$

Em que, d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido. Uma diferença fundamental entre o modelo exponencial e o esférico é que este modelo atinge o patamar assintoticamente, com o alcance prático definido como a distância na qual o valor do modelo é 95 % do patamar (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Os parâmetros C_0 e C_1, para o modelo exponencial, são determinados da mesma maneira que para o esférico (VIEIRA, 2000).

c) Modelo gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1\left[1 - \exp\left(-3\left(\frac{h}{a}\right)^2\right)\right] \qquad \text{para } 0 < h < d \qquad (4)$$

Em que, d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido. O modelo gaussiano é usado muitas vezes para modelar fenômenos extremamente contínuos. Semelhante ao modelo exponencial, o modelo gaussiano atinge o patamar assintoticamente, e o parâmetro *a* é definido como o alcance prático ou distância na

qual o valor do modelo é 95 % do patamar (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). O que caracteriza este modelo é seu ponto de inflexão próximo à origem.

d) Modelo linear:

$$\gamma(h) = C_0 + \frac{C_1}{a} h \qquad \text{para } 0 < h < a \qquad (5)$$

$\gamma(h) = C_0 + C_1$ para $h \geq a$

Em que, C_1/a é o coeficiente angular para $0 < h < a$. Nesse modelo, o patamar é determinado por inspeção; o coeficiente angular, C_1/a, é determinado pela inclinação da reta que passa pelos primeiros pontos de γ (h), dando-se maior peso aqueles que correspondem ao maior número de pares; o efeito pepita, C_0, é determinado pela interseção da reta no eixo γ (h); o alcance, a, é o valor de h correspondente ao cruzamento da reta inicial como o patamar; e C_1 = patamar - C_0, segundo VIEIRA (2000).

A partir do conhecimento da dependência espacial dos atributos do solo é possível avaliar a correlação entre atributos por meio do semivariograma cruzado. A avaliação da correlação entre atributos por meio desta ferramenta vem sendo usada em diversos estudos como os VAUCLIN et al. (1983) que avaliou a relação entre o conteúdo de água e a textura do solo. SCHAFFRATH et al. (2008) avaliou a correlação espacial entre atributos físicos do solo. O semivariograma cruzado pode assumir valores positivos, indicando que o aumento em um dos atributos é acompanhado pelo aumento do outro, ou negativos, indicando que, quando ocorre o aumento de um dos atributos, ocorre o decréscimo do outro segundo BHATTI et al. (1991).

1.2.5 Influência do relevo na mineralogia da fração argila e nos atributos físicos do solo

Nos estudos que exploram as causas de variabilidade, o relevo vem se destacando como um importante fator condicionador de variação dos atributos do solo. O relevo é um fator de formação do solo independente (JENNY,1941) e majoritário que determina a distribuição dos solos na paisagem (BOCKHEIM et al., 2005). SEIBERT et

al. (2007) ressalta a influência do relevo na formação de classes diferentes de solo intermediadas por processos hidrológicos. A influência do relevo nos atributos do solo ocorre por conta da distribuição dos fluxos de água tanto no sentido vertical como horizontal (VERITY & ANDERSON , 1990), o que tem relação direta com a produção das culturas (KRAVCHENKO & BULLOCK, 2000; SI & FARRELL, 2004; RAZAEI & GILKES, 2005; TERRA et al., 2005).

SOUZA et al. (2004a,b,c) relataram que essas pequenas variações nas formas do relevo são eficientes na avaliação da variabilidade espacial de atributos físicos e químicos estudados. TERAMOTO et al. (2001) concluiu que atributos morfológicos do solo são determinados principalmente pelo relevo. SIMÕES et al. (2006) relatou que a posição da área na topossequência do terreno influenciou a variabilidade dos teores de areia, silte argila e da densidade de partículas do solo.

Os atributos mineralógicos também possuem dependência espacial e se relacionam com pequenas variações do relevo (CAMARGO et al., 2008). Altas concentrações de gibbsitas são encontradas em solos com estágio avançado de intemperismo como os Latossolos e Argissolos (SOIL SURVEY STAFF, 1996). Alguns autores encontraram a influência do relevo na formação deste mineral e do mineral caulinita .HERRMANN et al. (2007) atribuíram a topografia como um dos fatores que interferem na formação da gibbsita.

REATTO et al. (2008), numa topossequência de latossolos no planalto central do Brasil, em uma escala local e regional, encontraram maiores valores da razão gibbsita/(gibbsita+caulinita) em áreas declivosas comparada à áreas mais planas na escala local do estudo. Quando se analisou o solo em escala regional a predominância da gibbsita foi encontrada em posições mais altas. Este resultado foi explicado pela intensidade dos fluxos hidrológico que alteram o processo de intemperismo. Assim, superfícies mais altas possuem maiores concentrações de gibbsita. Essa tendência corroba o estudo de CURI & FRANZMEIER (1984), em uma topossequência, que atribuíram a predominância da gibbsita à remoção de silício para posições mais baixas da topossequência.

CAMPOS et al. (2006) enfatizaram a importância dos modelos de paisagem para o entendimento das relações solo-geomorfologia e destacam o modelo estabelecido por TROEH (1965), que se baseiam em perfis e curvaturas do terreno. Neste modelo as pedoformas variam desde lineares até as côncavas passando pelas convexas influenciando os movimentos da água com a distribuição dos fluxos (convergência e divergência) e neste sentido provocando variações dos atributos dos solos.

BRITO et al. (2006) estudando um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar, relataram que áreas côncavas apresentam maiores valores de densidade do solo e resistência do solo à penetração. Tais resultados foram atribuídos à mineralogia mais gibbsítica e aos maiores teores de matéria orgânica do solo. PENNOCK et al. (2001) avaliaram a relação entre as formas do relevo e a resposta à adubação nitrogenada da cultura de canola. Eles concluíram que as formas da paisagem são essenciais no desenvolvimento da cultura em áreas com recomendação específica quanto a aplicação de nitrogênio, ou seja as curvaturas do terreno influenciaram o rendimento da cultura. As formas do relevo podem ser avaliadas por meio dos modelos digitais de elevação de segundo PENNOCK (2003) o que permite um entendimento do padrão e distribuição dos fluxos d'água no terreno, e ainda estabelecer relações entre as formas do terreno e a variabilidade dos atributos do solo.

O conhecimento da influência das formas da paisagem nos atributos do solo permite, no campo, a divisão de áreas homogêneas que atendam as necessidades da agricultura de precisão e de um cultivo que preconiza a racionalização de insumos e a conservação do solo.

Com base nas considerações anteriores, O objeto deste trabalho foi avaliar os atributos mineralógicos da fração argila e os atributos físicos de um argissolo em curvaturas do relevo, assim como avaliar a correlação entre esses atributos.

1.3 Referências

AGBEDE, T. M. Effect of tillage on soil properties and yam yield on an Alfisol in southwestern Nigeria, Soil & Tillage Research, Amsterdam, v. 86, p. 1-8, 2006.

AGELE, S. O.; EWULO, B. S.; OYEWUSI, I.K. Effects of some soil management systems on soil physical properties, microbial biomass and nutrient distribution under rainfed maize production in a humid rainforest Alfisol. Nutrient Cycling in Agroecosystems, Dordrecht, v. 72, p. 121-134, 2005.

ARAÚJO, E. A.; LANI, J. L.; AMARAL, E. F.; GUERRA, A. Uso da terra e propriedades físicas e químicas de argissolo amarelo distrófico na amazônia ocidental, Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 28, p. 307-315, 2004.

ARCA, M. N.; WEED, S. B. Soil agrgregation and porosity in relation to contents of free iron oxide and clay. Soil Science, Baltimore, v. 109, p. 282-288, 1966.

AZEVEDO, A. C.; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em latossolos. Ciência Rural, Santa Maria, v. 34, p. 609-617, 2004.

BARBERIS, E.; AJMONE MARSAN, F.; BOERO, V.; ARDUINO, E. Aggregation of soil particles by iron oxides in various size fractions of soil B horizons. European Journal of Soil Science, Oxford, v. 42, p. 535-542, 1991.

BHATTI, A. U.; MULLA, D. J.; KOEHLER, F. E.; GURMANI, A. H. Identifying and removing spatial correlation from yield experiments. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 55, p. 1523-1528, 1991.

BISHOP, T. F. A.; LARK, R. M. The geostatistical analysis of experiments at the landscape-scale. Geoderma, Amsterdam, v. 133, p. 87-106, 2006.

BLACKMORE, A. V. Aggregation of clay by the productsof iromn (III) hydrolysis. Australian Jounal Soil Research, Melbourne, v. 11, p. 75-85 , 1973.

BOCKHEIM, J. G.; GENNADIYEV, A. N.; HAMMER, R. D.; TANDARICH, J. P. Historical development of key concepts in pedology. Geoderma, Amsterdam, v. 124, p. 23-36, 2005.

BRITO, L. F.; SOUZA, Z. M.; MONTANARI, R.; MARQUES JR.; CAZETTA, D. A.; CALZAVARA, S. A.; OLIVEIRA, L. Influência de formas do relevo em atributos físicos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. Ciência Rural, Santa Maria, v. 36, p. 1749-1755, 2006.

BUOL, S. W.; SOUTHARD, R. J.; GRAHAM, R. C.; McDANIEL, P.A. Soil Genesis and classification. Iowa: Iowa State University, 1997. 527p.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. Journal of Soil Science, Oxford, v. 31, p. 315-331, 1980.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G.T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo.I-Mineralogia da fração argila. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 32, p. 2269-2277, 2008.

CAMPBELL, J. B., Spatial Variation of Sand Content and pH Within Single Contiguous Delineations of Two Soil Mapping Units. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 42, p. 460-464, 1978.

CAMPOS, M. C. C.; CARDOZO, N. P.; MARQUES JR. J. Modelos de Paisagem e sua Utilização em Levantamentos Pedológicos. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 6, p. 104-114, 2006.

CARVALHO, A. Solos da região de Marília: relações entre a pedogênese e a evolução do relevo. 1976. 163 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976.

CHAGAS, C. S.; CURI, N.; DUARTE, M. N.; MOTTA, P. E. R.; LIMA, J. M. Orientação das camadas de rochas metapelíticas pobres na gênese de latossolos sob cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 32, p. 539-548, 1977.

CHESTERS, G.; ATTOE, O. J.; ALLEN, O. N. Soil aggregation in relation to various soil constituents. Soil Science Society of America Journal, Madison, p. 272- 277, 1957.

COELHO, M. R.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização e gênese de perfis plínticos desenvolvidos de arenito do grupo Bauru II – Mineralogia. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 27, p. 495-507, 2003.

CORNELL, R. M. The film-forming abilities of iron-oxides and oxyhydroxides. Clay Minerals, Londres,v. 10, p. 209-213, 1973.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. The iron oxides. Structure, Properties, Reactions, Occurrence and Uses,1996. 573p.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Toposequence of Oxisols from the central plateau of Brazil. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 48, p. 341-346, 1984.

DANIELS, R.B.; NELSON, L.A. Soil variability and productivity: future developments, In: BOERSMA, L.L. Future developments in soil science research. Madson, Soil Science Society of America, p.279-291, 1987.

DEXTER, A. R. Mechanics of root growth. Plant and Soil, The Hague, v. 98, p. 303-312, 1987.

DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.V.; SCHAEFER, C.E.G.R. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2000. v. 1, p. 55-95.

DIDIER, P.; NAHON, D.; FRITZ, B.; TARDY, Y. Activity of water as a geochemical controlling factor inferricretes. A thermodunamic model in the system kaolinite Fe-oxihydroxides Fe-Al. 1983, p. 35-44.

DUFRANC, G.; DECHEN, S. C. F.; FREITAS, S. S.; CAMARGO, O. A. Atributos físicos, químicos e biológicos relacionados com a estabilidade de agregados de dois Latossolos em plantio direto no estado de São Paulo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 28, p. 505-517, 2004.

EHLERS, W.; KOPKE, U.; HESSE, F.; BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. Soil & Tillage Research, Amsterdam, v. 3, p. 261– 275, 1983.

FABRIS, J. D.; RESENDE, M.; GALVÃO, E.; COEY, J. M. D. Iron oxides in two Oxisols from the Brazilian coastal plain. European Journal of Soil Science, Oxford, v. 36, p. 543-550, 1985.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região Sudeste do Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 23, p. 515-524, 1999a.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região sudeste do Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 23, p. 507-514, 1999b.

FITZPATRICK, R. W.; SCHWERTMANN,U. Al-Substituted goethite na indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. Geoderma, Amsterdam, v. 27, p. 335-347,1982.

GHIDIN, A. A.; MELO, V. F.; LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. Toposseqüência de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I – Mineralogia da fração argila. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 30, p. 293-306, 2006a.

GHIDIN, A. A.; MELO, V. F.; LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. Toposseqüência de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. II – Relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 30, p. 307-319, 2006b.

GOLDBERG, S. Interactions of aluminum and iron oxides and clay minerals and their effect on soil physical properties: A review. Communications in soil science and plant analysis, New York, v. 20, p. 1181-1207.1989.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density,aggregate size, and soil water suction on oxygen difusion, redox potentials, and elongation of corn roots. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 32, p. 180-186, 1968.

GUALBERTO, V. Caracterização física, química e mineralógica de alguns Latossolos, com altos teores de ferro, da Amazônia e do Planalto Central. 67 f., Dissertação (Mestrado em solos) - Universidade Federal de Viçosa, viçosa, 1984.

HERRMANN, L.; ANONGRAK, N.; ZAREI, M.; SCHULER, U.; SPOHRER, K. Factors and processes of gibbsite formation in Northern Thailand. Catena, Amsterdam, v. 71, p. 279-291, 2007.

HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. New York: Academic Press, 1980. 413p.

HUGGETT, R.J. Soil landscape systems: A model of soil genesis. Geoderma. Amsterdan, v. 13, p. 1-22, 1975.

INDA JUNIOR, A. V.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P. C. I; BOENI, M.; SALTON, J. C.; TONIN, A. T. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. Ciência Rural. Santa Maria, v. 37, p. 1301-1307, 2007.

INDA JÚNIOR, A. V.; KÄMPF. N. Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 29, p. 851-866, 2005.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. An introduction to applied geoestatistics. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

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

JONES, C. A. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 47, p. 1208–1211, 1983.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de atributos e ambientes pedogenênicos e geoquímicos. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.). Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2000. p.107-138.

KÄMPF, N.; KLANT, E.; SCHNEIDER, P. Óxidos de ferro em Latossolos do Brasil sudeste e sul. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., 1988, Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Serviço Nacional de Levantamento e Classificação do Solo, p.153-183, 1988.

KEMPER, W. D. Aggregate stability of soils from wester United State and Canada. Washington: U.S. Govern. Print. Office, 1966. (Technical Bulletin, 1355).

KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D.G. Correlation of corn and soubean grain yield whit topography and soil properties. Agronomy Journal, Madison v. 92, p. 75-83, 2000.

KROTH, E. M.; PAGE, J.B. Aggregate formation in sils with special reference to cementing substances. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 11, p. 27-34, 1947.

LAMPURLANÉS, J.; CANTERO-MARTÍNEZ, C. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. Agronomy Jounal, Madison, v. 95, p. 526-536, 2003.

LINDSAY, W.L. Chemical Equilibria in Soils. John Wiley and Sons, New York: 1979. 449 p.

LUTZ, J. F. The relation of free iron in the soil to aggregation, Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 1, p. 43-45, 1936.

MARCOLAN, A.L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 30, p. 163-170, 2006.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I.; FRAGA, T. I.; LEITE, J. G. D. B. Recuperação de atributos físicos de um argissolo em função do seu revolvimento e do tempo de semeadura direta. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 31, p. 571-579, 2007.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. Economic Geology, v. 58, p. 1246-1266, 1963.

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R.; MCLAREN, R. G.; SPIERS, R. B. Regional variation of extractable copper and cobalt in the topsoil of south-east Scotland. Agronomie, Paris, v. 2, p. 969-982, 1982.

McNEAL, B. L.; LAYFIEL, D. A.; NORVELL, W. A.; RHOADES, J.D. Factors influencing hydraulic conductivity of soils in the presence of mixedsalt solution . Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 32, p. 187-190, 1968.

MESQUITA FILHO, M. V.; TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from the Cerrado region (Brazil). Geoderma, Amsterdam, v. 58, p. 107-123, 1993.

McINTYRE, D. S. The effect of free ferric oxide on the structure of some Terra Rossa and Rendzina soils. Journal of Soil Science , Oxford, v. 7, p. 302-306, 1956.

MONIZ, A. C.; CARVALHO A. Seqüência de evolução de solos derivados do Arenito Bauru e de rochas básicas do Estado de São Paulo. Bragantia, Campinas, v. 32, p. 309-335, 1973.

MUGGLER, C. C.; CURI, N.; SILVA, M. L. N.; LIMA, J. M. Características pedológicas de ambientes agrícolas nos Chapadões do Rio Corrente, sudoeste da Bahia. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 31, p. 221-232, 1996.

NORRISH, K.; TAYLOR, R. M. The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. Journal of Soil Science, Oxford, v. 12, p. 294-306, 1961.

PEDROTTI, A. Relação entre os atributos físicos e alumínio no solo. 2000.60 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

PEDROTTI, A.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; SILVA, M. L. N.; LIMA, J. M.; CARVALHO, R. Relação entre atributos físicos , mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 27, p. 1-9, 2003.

PENNOCK, D. J. Terrain attributes, landform segmentation, and soil redistribution. Soil & Tillage Research, Amsterdam, v. 69, p. 15-26, 2003.

PENNOCK, D. J.; JONG, E. The influence of slope curvature on soil erosion and deposition in Hummock terrain. Soil Science, Baltimore, v. 144, p. 209-217, 1987.

PENNOCK, D.; WALLEY, F.; SOLOHUB, M.; SI, B.; HNATOWICH, G. Topographically controlled yield response of canola to nitrogen fertilizer. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 65, p. 1838-1845, 2001.

PRADO, H.; LIER, Q. J.; LANDELL, M. G. A.; VASCONCELOS, A. C. M. Classes de disponibilidade de água para a cana-de-açúcar nos principais na região Centro-Sul do Brasil. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 13, 2003. Juazeiro. CD ROM.

RAZAEI, S.A.; GILKES, R. J. The effects of landscape attributes and plant community on soil physical properties in rangelands. Geoderma, Amsterdam, v. 125, p. 145-154, 2005.

REATTO, A.; BRUAND, A.; MARTINS, E. S.; MULLER, F.; SILVA, E. M.; CARVALHO JR, O. A.; BROSSARD, M. Variation of the kaolinite and gibbsite content at regional and local scale in Latosols of the Brazilian Central Plateau. Compters Rendus Geoscience, Paris, v. 340, p. 741-748, 2008.

RESENDE, M. Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of Central Plateau of Brazil. 237 f. Thesis (PhD) – Purdue University, Prudue, 1976.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G.F. Pedologia: Base para distinção de ambientes. Viçosa, NEPUT, 1997. 367p.

REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. Geoderma, Amsterdam, v. 110, p. 131-146, 2002.

SALAKO, F. K; BABALOLA, O.; HAUSER, S.; KANG, B.T. Soil macroaggregate stability under different fallow management systems and cropping intensities in southwestern Nigeria. Geoderma. Amsterdam, v. 91, p. 103-123, 1999.

SANCHEZ, P. A. Suelos del trópico: caracteristicas y manejo. San José: IICA, 1981. 660 p.

SCHAEFER, C. E. G. R.; SOUZA, C. M.; VALLEJOS M., F. J.; VIANA, J. H. M.; GALVÃO, J. C. C. & RIBEIRO, L.M. Características da porosidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes sistemas de preparo de solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 25, p. 765-769, 2001.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian (Oxisols): a review, Clay Minerals, Londres, v. 43, p. 1-18, 2008.

SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; GONCALVES, A. C. A.; FIDALSKI, J. Variabilidade e correlação espacial de algumas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto e preparo convencional. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 32, p. 1411-1417, 2008.

SCHAHABI, S.; SCHWERTMANN, U. Der Einfluβ von synthetischen Eisenoxidem auf die Aggregation zweier Löβbödenhorizonte. Z. Pflanzenernähr, Bodenkd, v. 125 p. 193-204, 1970.

SCHWERTMANN, U.; CARLSON, L. Aluminium influence on iron oxides: XVII. Unit-cell parameters and aluminium substitution of natural goethites. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 58, p. 256-261, 1994.

SCHWERTMANN, U. The effect of pedogenic environments on iron oxide minerals. Advance in Soil Science, v. 1, p. 172-196, 1985.

SCHWERTMANN, U. Some properties of soil and synthetic iron oxides. In: STUCKI, J. W., GOODMAN, B. A.; SCHWERTMANN, U. (Eds.) Iron in soil and clay minerals.Dordrecht, 1988, v. 217 p. 203-244.

SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of Southern and Central Brazil. Soil Science, Baltimore, v. 139, p. 344-350, 1985.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron oxides. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Ed.). Minerals in soil environments. 2.ed. Madison: SSSA, 1989. p. 379-438. (Book Series, 1).

SECCO, D.; REINERT, D. J; REICHERT, J. M.; DA ROS, C.O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 28, p. 797-804, 2004.

SEIBERT, J.; STENDAHL, J.; SØRENSEN R. Topographical influences on soil properties in boreal forests. Geoderma, Amsterdam, v. 141, p. 139–148, 2007.

SEYBOLD, C. A.; HERRICK, J. E.; BREJDA, J. J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. Soil Science, Baltimore, v. 164, p. 224-234, 1999.

SI, B. C.; FARRELL, R.E. Scale-Dependent Relationship between Wheat Yield and Topographic Indices: A Wavelet Approach. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 68, p. 577-587, 2004.

SILVA, A. J .N.; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO F. G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 10, p. 579-585, 2006.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. G. S. M; LIMA, L.A.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J.M. Resistência ao salpico provocado por impacto de gotas de chuva simulada em latossolos e sua relação com características químicas e mineralógicas, Ciência e Prática, Lavras, v. 19, p. 182-188, 1995.

SIMÕES, W. L.; SILVA, E. L.; LIMA, D. M.; OLIVEIRA, M. S. Variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférrico, submetido a diferentes manejos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 30, p.1061-1068, 2006.

SOARES, J. L. N.; ESPINDOLA C. R; PEREIRA W. L. M. Physical properties of soils under intensive agricultural management. Scientia Agricola, Piracicaba, v. 62, p. 165-172, 2005.

SOARES JÚNIOR, A. A. Argilominerais de um Argissolo Vermelho Distrófico arênico, na região de Marília-SP. In: Simpósio Internaional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo, 13, 2005, Piracicaba. 2005. (CD ROM)

SOIL SURVEY STAFF, Keys to Soil Taxonomy, 7th edition. USDA, Washington, 1996.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 39, p. 491-499, 2004a.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; MOREIRA, L. F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar.Ciência Rural, Santa Maria, v. 34, p. 1763-1771, 2004b.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T; MOREIRA, L. F. Influência da pedoforma na variabilidade espacial de alguns atributos físicos e hídricos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. Irriga, Botucatu, v. 9, n.1 ,2004c.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 25, p. 395-401, 2001.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHET, J. M.; REINET, D. J.; LIMA, C. L. R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 42, p. 1159-1167, 2007.

TERRA, J. A.; SHAW, J. N.; VAN SANTEN, E. Soil Management and Landscape Variability Affects Field-Scale Cotton Productivity. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 70 p. 98–107, 2005.

TERAMOTO, E. R.; LEPSCH, I. F.; VIDAL-TORRADO, P. Relações solo , superfície geomórfica e substrato geológico na microbacia do Ribeirão Marins (Piracicaba-SP). Scientia Agricola, Piracicaba, v. 58, p. 361- 371, 2001.

TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D.; COOK, F. J.; KIRBY, J. M.; CARTER, M. R. Physical attributes of soil quality. In: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.), Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science, vol. 25. Elsevier, New York, NY, pp. 21-58,1997.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy, San Diego, v. 38, p. 54-94, 1985.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. American Journal Science, v. 263, p. 616-627, 1965.

UPCHURCH, D.R.; EDMONDS, W.J. Statistical procedures for specific objectives. In: MAUSBACJ, M.J. & WILDING, L.P. Spatial variabilities of soils and landforms. Madison, Soil Science Society of America, p.49-71, 1993.

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S. R.; VACHAUD, G.; NIELSEN, D.R. The use of cokriging with limited soil observations. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 47, p. 175-184,1983.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Soil density and root penetration. Soil Science, Baltimore, v. 65, p. 487- 493, 1948.

VERITY, G. E.; ANDERSON, D. W. Soil erosion effects on soil quality and yield. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, v. 70, p. 471-484, 1990.

VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; MOTTA, P. E. F. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da região Sudeste do Brasil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 38, p.133-141, 2003.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V.; V. H.; SCHAEFER, G. R., (Ed.) Tópicos em ciência do solo, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v. 1, p. 1-54.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. Hilgardia, Berkeley, v.51, p. 1-75, 1983.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 45, p. 1040-1048, 1981.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, v. 4, p. 242-246,1966.

WEBSTER, R. Automatic soil-boundary location from transect data. Mathematical Geology, New York, v. 5, p. 27-37, 1973.

WEBSTER, R. & CUANALO, H.E. Soil Transect of correlograms of north Oxfordshire and their interpretation. Journal of Soil Science, Oxford, v.26, p.176-94, 1975.

CAPÍTULO 2 - MINERALOGIA DA FRAÇÃO ARGILA DE UM ARGISSOLO EM CURVATURAS DO RELEVO

Resumo – O conhecimento da distribuição dos minerais da fração argila na paisagem permite o entendimento da influência do relevo no teor e nos atributos dos minerais como goethita, hematita, caulinita e gibbsita. Buscando entender as relações entre os atributos dos minerais da fração argila e as formas da paisagem, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar os atributos dos minerais da fração argila - goethita, hematita, caulinita e gibbsita - bem como, avaliar a dependência e variabilidade espacial dos mesmos em duas curvaturas. Uma malha de dimensão de 100 x 100 m foi delimitada em uma área caracterizada pela forma convexa e outra em uma área caracterizada pela forma côncava. As malhas possuíam espaçamento regular de 10 x 10 m e os pontos de cruzamento deste espaçamento determinaram os pontos de coleta das amostras, num total de 121 pontos amostrais georreferenciados em cada malha. Amostras para determinação dos óxidos de ferro e dos minerais caulinita e gibbsita da fração argila foram coletadas na profundidade 0,0-0,2 m. As amostras das áreas côncava e convexa foram submetidas a análises de laboratório dentre elas realizou-se a separação da fração argila do solo e posteriormente a concentração e remoção dos óxidos de ferro. A caracterização dos minerais da fração argila foi realizada por reflexos da difração de raios X. Os difratogramas foram interpretados e calculados os valores da largura a meia altura (LMA), diâmetro médio do cristal (DMC) dos óxidos de ferro e da caulinita e gibbsita e substituição isomórfica (SI) e área de superfície específica (ASE) da hematita e goethita. Foram também calculados os teores da goethita e hematita e razão goethita/(goethita+hematita) [Gt/(Gt+Hm)] e razão caulinita/(caulinita+gibbsita) [Ct/(Ct+Gb)]. Realizou-se a análise estatística dos atributos obtidos por meio dos difratogramas e a avaliação da dependência espacial por meio da geoestatística. Os atributos mineralógicos apresentaram diferença significativa entre as áreas convexa e côncava. Na análise geoestatística observou-se um maior número de atributos com

dependência espacial e os maiores valores de alcance na área convexa em relação à área côncava.

Palavras-chave: caulinita, formas do relevo, gibbsita, goethita, hematita, variabilidade espacial.

2.1 Introdução

Solos tropicais intemperizados possuem mineralogia da fração argila caracterizada pela predominância de argilominerais do tipo 1:1 e de óxidos e oxi-hidróxidos de ferro e alumínio. Segundo SCHWERTMANN & TAYLOR (1989), os óxidos de ferro que podem ocorrer mais freqüentemente em solos das regiões tropicais e subtropicais são a goethita e a hematita. Segundo COELHO & VIDAL-TORRADO (2003) caulinita, hematita, goethita, gibbsita e anatásio são os principais constituintes da fração argila dos horizontes estudados de Argissolos desenvolvidos de arenitos do grupo Bauru.

Alguns autores relatam variações nos intervalos de valores dos atributos cristalográficos dos óxidos de ferro (SCHWERTMANN & KÄMPF, 1985; SCHWERTMANN & CARLSON 1994; INDA JÚNIOR & KÄMPF, 2005). A amplitude encontrada é explicada pelo fato da formação desses óxidos ser dependente das condições ambientais (KÄMPF & CURI, 2000). Neste sentido as diversidades ambientais conferem populações de goethitas e hematitas com distintos graus de cristalinidade. Populações de hematitas tendem a serem mais homogenias quanto aos seus atributos em relação a goethita, pois as condições que favorecem a formação da hematita são mais específicas que as da goethita (INDA JÚNIOR & KÄMPF, 2005).

O relevo é considerado um condicionador dos processos de formação dos minerais da fração argila e a relação deste fator com a ocorrência e cristalinidade dos minerais da fração argila vem sendo investigada por alguns autores. CURI & FRANZMEIER (1984) encontraram goethitas com menor diâmetro médio do cristal e maior concentração de caulinita nas posições mais baixas de uma topossequência de

latossolos no estado de Goiás. BRITO et al. (2006) encontraram a predominância de gibbsita em uma área caracterizada pela forma côncava em relação a uma área caracterizada pela forma linear, que apresentou predominância de caulinita entre os minerais da fração argila de um Latossolo no estado de São Paulo. CAMPOS et al. (2007) encontraram a influência das superfícies geomórficas de um Latossolo na razão caulinita/(caulinita+gibbsita). A influência da escala, tanto regional como local, na proporção de caulinita e gibbsita foi encontrada por REATTO et al. (2008) em uma topossequência de latossolos no Brasil. Os mesmo autores abordaram a influência da topografia, intermediada pelos fluxos hídricos, nos minerais caulinita e gibbsita.

Tão importante quanto a determinação dos atributos dos minerais da fração argila, é o conhecimento da dependência e variabilidade espacial desses atributos na paisagem. Isso permite o entendimento dos ambientes de formação dos minerais e as relações de causas e efeitos entre a mineralogia e os demais atributos do solo. CAMARGO et al. (2008) relataram a dependência espacial dos atributos mineralógicos dos minerais hematita, goethita, caulinita e gibbsita relacionada com pequenas variações do relevo. A geoestatística permite caracterizar a dependência e variabilidade espacial dos atributos do solo (VIEIRA, 2000), por meio do semivariograma, que é a estimativa e modelagem da estrutura espacial da variância.

Alguns autores têm relacionado a variabilidade espacial dos atributos do solo com os modelos de paisagem e pequenas variações do relevo (SOUZA et al., 2006; CAMPOS et al., 2007). Nos estudos de CUNHA et al. (2005) a mineralogia e os teores de ferro apresentaram-se relacionadas com diferentes superfícies geomórficas. TROEH (1965) estabeleceu um modelo que se baseia em perfis e curvaturas do terreno.

Nesse sentido, a espacialização dos atributos mineralógicos dos minerais da fração argila, levando em consideração as formas do relevo, constitui estudo básico para auxiliar no entendimento da relação entre esses minerais e a variação dos atributos do solo, tornando possível a transferência desses conhecimentos para áreas semelhantes.

Nota-se a carência de estudos que abordam tanto a caracterização espacial dos minerais da fração argila, como a relação entre estes e o relevo, em solos com baixo teor de ferro, como os argissolos da região norte do Estado de São Paulo.

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar os atributos dos minerais da fração argila - goethita, hematita, caulinita e gibbsita - bem como, avaliar a dependência e variabilidade espacial dos mesmos em duas curvaturas.

2.2 Material e Métodos

Localização geográfica das áreas e critério de amostragem

A área de estudo está localizada na Fazenda Boa Vista, pertencente à Usina São Domingos Açúcar e Álcool S/A no município de Catanduva – SP, cujas coordenadas geográficas são: Latitude 21º05'57,11"S e Longitude 49º01'02,08" W. O clima da região foi classificado pelo método de Köppen, como tropical quente úmido, tipo Aw, seco no inverno, com precipitação média de 1.350 mm, temperatura média anual de 23^{o}C, com temperatura no mês mais quente superior a 22 ^{o}C e a do mês mais frio inferior a 18 ^{o}C, e umidade relativa do ar de 74%. A vegetação primária da região de Catanduva foi classificada como floresta pluvial estacional e cerrado, sendo o uso atual principalmente cana-de-açúcar, a mais de 20 anos em sistema de colheita pós-queimada.

Os materiais de origem dos solos foram mapeados como rochas areníticas sedimentares do Grupo Bauru, Formação Adamantina (IPT, 1981). A área foi caracterizada utilizando fotografias aéreas da região na escala 1:35.000, perfil altimétrico, e no campo pela classificação geomorfológica e pedológica. O solo foi classificado como como Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico textura média/argilosa (EMBRAPA, 2006). Para a identificação das formas do terreno conforme a classificação de TROEH (1965), juntamente com as atividades de campo, foi elaborado um modelo digital de elevaçã o (MDE) (Figura 1), onde pode-se observar duas áreas: uma caracterizada pela forma convexa e a outra côncava.

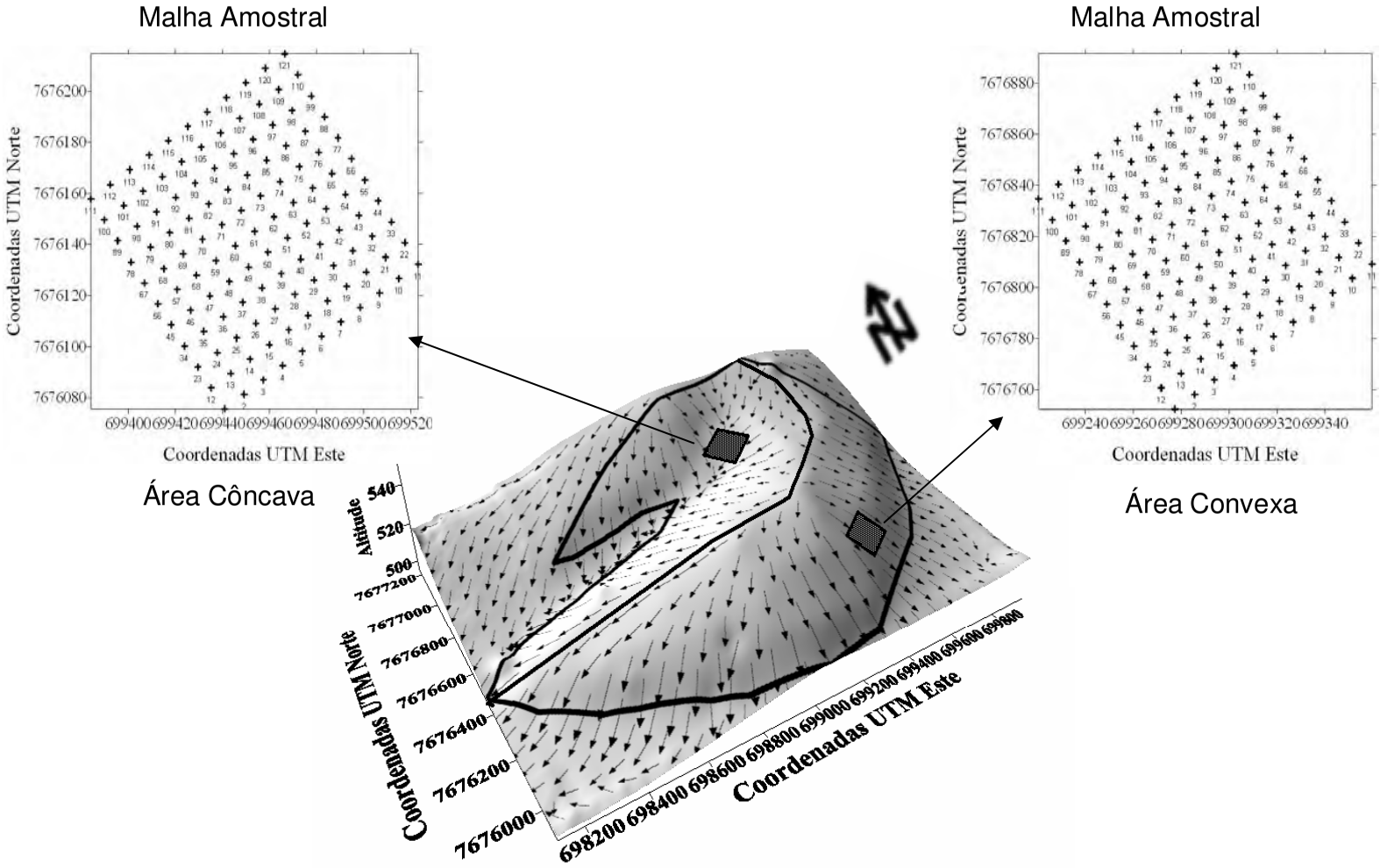

Figura 1. Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo e local da coleta das amostras (+). Setas na figura central representam o fluxo de água superficial.

A área convexa possui valores para teor de argila, matéria orgânica, ferro total e espessura do horizonte A+E de 230 g kg^{-1}, 15 g dm^{-3}, 4% e 30 cm, respectivamente, e a área côncava possui valores de 189 g Kg^{-1}, 13 g dm^{-3}, 2% e 39 cm, respectivamente, para os mesmos atributos (BARBIERI, 2007, GUISARDI, 2003 e SANCHEZ, 2007).

Uma malha com dimensão de 100 x 100 m foi delimitada em cada uma das áreas. As malhas possuíam espaçamento regular de 10 x 10 m e os pontos de cruzamento deste espaçamento determinaram os pontos de coleta das amostras, num total de 121 pontos amostrais georreferenciados em cada malha. Foram coletadas as amostras na profundidade 0,0-0,2 m.

Determinação dos minerais da fração argila

As amostras de solo foram tratadas com NaOH 0,5 N e submetidas a agitação mecânica por 10 minutos para a dispersão das partículas. Após esse tratamento prévio, a fração areia foi retirada em peneira de 0,05 mm. A separação da fração silte e areia ocorreu por centrifugação (1.600 rpm) e o tempo da operação foi determinado pela temperatura das amostras no momento da análise. A suspensão de argila foi floculada com HCl concentrado e centrifugada (2.000 rpm, por 2 minutos).

Posteriormente realizou-se a eliminação dos óxidos de ferro da fração argila utilizando o método ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), segundo MEHRA & JACKSON (1960). A análise da fração argila desferrificada foi realizada por meio da difratometria de raios X (DRX). A caracterização da goethita (Gt) e da hematita (Hm), por meio da DRX, foi feita após tratamento da fração argila com NaOH 5 mol L^{-1} (1g argila/100 ml solução), para a concentração dos mesmos, segundo método de NORRISH & TAYLOR (1961) modificado por KÄMPF & SCHWERTMANN (1982).

Para a manutenção de concentração mínima de ácido silícico na solução de NaOH 5 mol L^{-1} foram adicionados 10% em peso de sílica gel moída, evitando mudanças na substituição em alumínio e cristalinidade da goethita (KÄMPF & SCHWERTMANN, 1982). Para evitar que a leitura dos difratogramas fosse dificultada pela sodalita, as amostras foram lavadas com solução de HCl 0,5 mol L^{-1} (1g de argila /100ml de solução), em agitação por 4 horas. A correção dos desvios no

posicionamento (d) dos reflexos estudados, foi feita acrescentando às amostras 10% em peso de cloreto de sódio moído e peneirado em malha 0,10 mm, antes de serem difratados.

A difração de raios X foi realizada com as amostras preparadas pelo método do pó, em aparelho HGZ equipado com cátodo de cobalto e filtro de ferro e radiação Kα (20 mA, 30 kV) para a difração da Hm e Gt e e cátodo de cobre com filtro de níquel para a difração da Ct e Gb. A velocidade de varredura empregada foi de 1º2θ/minuto e amplitude de 23 a 49°. Foram utilizados para avaliação mineralógica os reflexos da caulinita (001), gibbsita (002), hematita (012 e 110) e da goethita (110 e 111).

O diâmetro médio do cristal (DMC) da Ct e Gb foi calculado a partir da largura à meia altura (LMA) e da posição dos reflexos dos minerais Ct (001) e Gb (002), e o DMC da Hm e Gt foi calculado a partir da LMA e da posição dos reflexos dos minerais Hm (110) e Gt (110). Foi utilizada a equação de Scherrer (SCHULZE, 1984) para o cálculo do DMC:

$$DMC\ (Ä) = (k\lambda 57,3) / (\beta.\cos(\Theta)) \quad (1)$$

em que DMC (Ä) é a distância perpendicular ao plano basal do reflexo (hkl) em angstron; K é a constante de forma; λ é o comprimento de onda conforme o cátodo usado; 57,3 é a conversão de graus para radiano (180/π); θ é o ângulo de incidência; β = B – b, onde β é a LMA corrigida, B a LMA da amostra e b o LMA padrão em graus 2θ. Foi construído um gráfico entre LMA (graus 2θ) e o ângulo de incidência (graus 2θ) para se obter o valor b, correção do alargamento instrumental do aparelho de DRX, já que as LMA das amostras padrão não foram constantes.

No cálculo do teor de substituição isomórfica do ferro pelo alumínio na goethita utilizaram-se os procedimentos sugeridos por SCHULZE (1984), que propõe a seguinte equação:

$$molAl\% = 1730\text{-}572.c, \quad (2)$$

em que, $c = 1 / (1/d_{111}^2 - 1/d_{110}^2)^{½}$

Já, para a hematita utilizou-se a equação proposta por SCHWERTMANN et al. (1979):

$$molAl\% = 3098,8 – 615,12a_0; \quad (3)$$

em que $a_0 = 2\ d_{110}$

A razão Caulinita/(Caulinita+Gibbsita) – [Ct/(Ct+Gb)], foi calculada empregando-se as áreas dos reflexos Ct (001) e Gb (002). A razão Gt/(Gt+Hm) foi obtida após o cálculo das áreas dos reflexos da hematita (012) e goethita (110) nos reflexos dos difratogramas, e nesse caso foi multiplicada a área do pico da goethita (110) pelo valor 0,35, devido a intensidade de 35% da hematita (012) (KÄMPF & SCHWERTMANN, 1998).

Para a obtenção do teor de goethita (%Gt), multiplicou-se por 1,59 o produto entre a razão goethita/(goethita+hematita) e o teor de ferro ditionito ($\%Fe_d$), como segue:

$$\%Gt = 1,59[Gt/(Gt=Hm)]\ \%Fe_d \quad (4)$$

Já o ter de hematita (%Hm) foi determinado como (DICK, 1986):

$$\%Hm = 1,43(\%feGt-\%Fe_d) \quad (5)$$

A área de superfície específica da goethita [ASE(Gt)] foi estimada em $m^2\ g^{-1}$ como (SCHULZE & SCHWERTMANN,1984):

$$ASE(Gt) = (1049/DMC_{100})-5 \quad (6)$$

em que, $DMC_{100} = 0,42\ DMC_{gt110}$ expresso em nm (KÄMPF, 1981)

Quanto a área da superfície específica da hematita, [ASE(Hm)], em $m^2\ g^{-1}$, esta foi determinada como:

$$ASE(Hm) = 2\ (r+h)d \quad (7)$$

em que, $r = (0,71/2)\ DMC_{hm110}$; $h= 0,59\ DMC_{Hm012}$ e $d=5,26 g.cm^{-3}$ (SCHWERTMANN & KÄMPF, 1985).

Análise dos dados

Os dados foram submetidos à estatística descritiva calculando-se a média, mediana, variância, desvio padrão, assimetria, curtose, máximo, mínimo, coeficiente de variação, e tipo de distribuição. Para avaliação da diferença dos valores médios entre as áreas aplicou-se o teste t-student. Essas análises foram realizadas com o uso do programa estatístico Minitab 14 (MINITAB, 2000).

Para a caracterização do padrão da variabilidade espacial, utilizou-se a análise geoestatística (VIEIRA, 2000). Foram construídos semivariogramas com base no cálculo da semivariância γ (h) por meio da seguinte equação:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (8)$$

em que, γ(h) é a semivariância estimada a partir dos dados experimentais; Z são os valores medidos nos pontos xi e xi+h; N(h) é o número de pares de valores medidos separados por uma distância h. Os modelos foram ajustados por meio do programa GS+ (ROBERTSON, 1998).

2.3 Resultados e Discussão

Os difratogramas revelaram a presença de caulinita, gibbsita e goethitas e hematitas e o reflexo do mineral anatásio (An) em todas as amostras (Figuras 1A a 8A), confirmando os estudos de SCHWERTMANN & TAYLOR (1989). Observa-se também o reflexo do NaCl que foi utilizado como padrão interno para correção dos desvios no posicionamento (d) que ocorrem em aparelhos quando se difratam óxidos de ferro.

Os difratogramas dos minerais Gt e Hm dos pontos 3, 34, 94 e 119 da área convexa estão nas Figuras 1Aa, 1Ab, 2Aa e 2Ab respectivamente e dos pontos 15, 32, 66 e 99 da área côncava estão nas Figuras 3Aa, 3Ab, 4Aa e 4Ab, respectivamente. Os difratogramas dos minerais Ct e Gb nos pontos 3, 9, 86, 104 da área convexa estão nas Figuras 5Aa, 5Ab, 6Aa e 6Ab e dos pontos 5, 8, 113, 120 da área côncava estão nas Figuras 7Aa, 7Ab, 8Aa e 8Ab, respectivamente.

Para uma avaliação preliminar dos dados obtidos realizou-se a estatística descritiva dos atributos dos minerais dos pontos de ambas as malhas (Tabelas 1 e 2). Entre os óxidos de ferro o mineral hematita apresentou, em ambas as áreas, o menor valor médio de LMA e o maior de DMC apresentando relativamente maior grau de cristalinidade que a goethita (Tabela 1). Estes resultados estão de acordo com os estudos de FONTES & WEED (1991) que afirmam que a hematita tem uma tendência de possuir maior grau de cristalinidade que a goethita.

Tabela 1. Estatística descritiva clássica dos atributos dos minerais goethita e hematita das áreas convexa e côncava.

Atributos		Área	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Variância	Assimetria	Curtose	Desvio padrão	CV(%)	$p^{(7)}$
LMA[1]	Gt	convexa	0,52	0,53	0,30	0,83	0,008	0,08	0,50	0,08	16,79	<0,005
		côncava	0,54	0,53	0,30	0,90	0,011	0,37	0,41	0,10	19,38	<0,005
	Hm	convexa	0,40	0,38	0,30	0,53	0,002	0,05	0,70	0,04	10,28	<0,005
		côncava	0,36	0,38	0,30	0,53	0,003	0,41	-0,83	0,05	15,37	<0,005
DMC[2]	Gt	convexa	31,58	28,50	15,06	86,91	116,330	2,03	6,18	10,78	34,16	<0,005
		côncava	30,29	28,50	13,45	86,93	135,200	2,45	9,19	11,63	38,38	<0,005
	Hm	convexa	49,75	54,00	29,77	90,85	128,830	1,54	3,89	11,35	22,82	<0,005
		côncava	63,50	54,02	29,79	90,86	409,180	0,28	-1,43	20,23	31,85	<0,005
SI[3]	Gt	convexa	15,65	14,73	1,69	35,72	67,620	0,83	0,06	8,22	52,55	<0,005
		côncava	12,59	12,25	0,18	28,29	25,726	0,24	-0,03	5,07	40,26	0,159
	Hm	convexa	12,44	12,87	1,42	17,00	11,470	-0,47	-0,28	3,39	11,47	<0,005
		côncava	11,15	12,87	1,43	21,23	15,660	-0,43	0,06	3,96	35,50	<0,005
Teor[4]	Gt	convexa	13,16	13,09	7,14	23,52	8,820	0,48	0,71	2,97	22,56	0,577
		côncava	10,45	10,40	0,60	23,90	14,980	0,26	1,41	3,87	37,06	0,050
	Hm	convexa	23,20	23,01	12,92	33,29	14,340	0,18	0,10	3,79	16,32	0,357
		côncava	12,39	12,70	0,70	28,60	18,732	0,47	3,37	4,33	34,93	<0,005
ASE[5]	Gt	convexa	81,17	82,64	23,74	160,85	527,050	0,07	0,44	22,96	28,28	<0,005
		côncava	86,47	82,64	23,73	180,72	746,870	0,38	0,42	27,33	31,61	<0,005
	Hm	convexa	36,31	37,04	22,37	61,83	35,276	0,57	1,95	5,94	16,36	0,013
		côncava	33,69	32,42	19,16	55,37	76,800	0,37	-0,20	8,76	26,01	0,016
Gt/(Gt+Hm)		convexa	0,34	0,34	0,20	0,56	0,005	0,28	-0,05	0,07	20,38	0,640
		côncava	0,43	0,43	0,22	0,64	0,006	-0,08	-0,35	0,08	19,03	0,560
Ferro ditionito (%)[(6)]		convexa	2,45	2,40	1,59	3,22	0,080	0,23	0,46	0,29	11,82	0,010
		côncava	1,52	1,55	0,09	3,29	0,220	0,01	3,64	0,47	31,26	0,005

[1]Largura a Meia Altura (º2θ); [2]Diâmetro Médio do Cristal (ηm); [3] Substituição Isomórfica (mol%); [4]g kg; [5] Área de superfície específica; [(6)] Ferro extraído por DBC; [7]Estatística do teste de Anderson-Darling (p>0,05 = distribuição normal).

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos mineralógicos (largura a meia altura, diâmetro médio do cristal e razão Ct/(Ct+Gb)) das áreas convexa e côncava na profundidade 0,0-0,2 m.

Estatísticas	ÁREA	LMA[1]		DMC[2]		Ct/(Ct+Gb)
		Ct	Gb	Ct	Gb	
Média	Convexa	0,760	0,313	14,53	74,47	0,866
	Côncava	0,670	0,291	17,42	84,02	0,919
Mediana	Convexa	0,750	0,300	14,44	74,04	0,870
	Côncava	0,670	0,285	16,67	85,71	0,923
Mínimo	Convexa	0,600	0,270	11,39	31,32	0,780
	Côncava	0,450	0,270	11,39	44,01	0,830
Máximo	Convexa	0,900	0,450	19,73	101,81	0,960
	Côncava	0,900	0,375	31,10	101,81	0,957
Variância	Convexa	0,008	0,002	5,40	540,28	0,001
	Côncava	0,007	0,000	12,14	249,59	0,00065
Assimetria	Convexa	0,070	1,350	0,64	-0,17	-0,01
	Côncava	0,080	1,650	1,39	-0,52	-1,20
Curtose	Convexa	-0,610	1,380	0,02	-1,19	-0,15
	Côncava	0,440	3,290	3,39	-0,40	1,56
DP[3]	Convexa	0,090	0,050	2,32	23,24	0,04
	Côncava	0,086	0,023	3,48	15,80	0,025
CV (%)[4]	Convexa	11,500	15,480	16,00	31,21	4,16
	Côncava	12,830	8,020	20,00	18,80	2,77
P[5]	Convexa	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,035
	Côncava	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005

[1]Largura a Meia Altura (º2θ); [2]Diâmetro Médio do Cristal (ηm**)**;[3] Desvio Padrão [4] Coeficiente de variação; [5] Estatística do teste de Anderson-Darling (p>0,05 = distribuição normal).

A gibbsita foi o mineral que apresentou, relativamente, o maior grau de cristalinidade entre os minerais estudados, pois apresentou o maior valor médio de DMC e o menor de LMA em ambas as áreas. A caulinita apresentou o menor grau de cristalinidade entre os minerais (Tabela 2).

Os valores mínimos do atributo substituição isomórfica de ambas as áreas para hematita e goethita (Tabela 1) são próximos aos encontrados por GUALBERTO et al. (1987) e INDA JÚNIOR & KÄMPF (2005). No entanto, os valores máximos não estão de acordo com os mesmos autores. No presente estudo a goethita apresenta o maior valor desse atributo e um menor grau de cristalinidade relativo à hematita. Isso ocorre devido à substituição do Fe^{3+} por Al^{3+} causar uma contração na cela e conseqüentemente uma diminuição do tamanho do cristal desse mineral (NORRISH & TAYLOR, 1961). Assim, a

alteração causada na morfologia do cristal, promove o aumento da área de superfície específica (ASE) dos cristais (TORRENT et al., 1987).

INDA JÚNIOR & KÄMPF (2005) também encontraram valores maiores de ASE para goethitas comparados aos valores para hematitas. SCHWERTMANN & KÄMPF (1985) encontraram menores valores de ASE da hematita e goethita para Argissolos. Esta diferença pode ser explicada pela diferença de metodologia aplicada para determinação deste atributo (CORNELL & SCHWERTMANN, 1996).

Os teores de hematita e goethita observados nas áreas côncava e convexa (Tabela 1), são menores que os encontrados em Latossolos por GHIDIN et al. (2006) os quais determinaram valores de goethita entre 9 a 60 g kg^{-1} e de hematita entre 220 a 309 g kg^{-1} . Os teores de Fe ditionito são menores que os encontrados nos Latossolos por INDA JUNIOR & KÄMPF, (2005). Os baixos teores de Fe_d, hematita e goethita se devem ao baixo teor de ferro no material de origem.

Na área convexa os atributos que apresentaram distribuição normal foram o teor de goethita e hematita e razão Gt/(Gt+Hm). Porém, para os atributos LMA, SI, teores de Hm e Gt, ASE da Gt, razão Gt/(Gt+Hm), Fe_d, LMA da Ct e DMC da Ct e Gb e razão Ct/(Ct+Gb) apresentaram distribuições simétricas, pois possuem média e mediana próximas e os valores de curtose e assimetria próximos de 0, exceção feita a ASE da hematita que possui curtose de 1,95. Na área côncava os atributos que apresentaram distribuição normal foram substituição isomórfica da goethita e a razão Gt/(Gt+Hm). Porém, para os atributos LMA, SI, ASE da goethita e hematita, DMC da goethita, razão Gt/(Gt+Hm), LMA da Ct e DMC Ct apresentaram distribuições simétricas (Tabelas 1 e 2).

Na avaliação do coeficiente de variação (CV), os atributos da caulinita na área convexa apresentaram valores menores dessa medida estatística em relação à gibbsita e o contrário ocorre na área côncava. Todos os atributos relacionados à goethita apresentam valores de CV maiores que os relacionados à hematita em ambas as áreas, indicando a maior variação dos atributos da goethita em relação à hematita. Esses resultados concordam com os encontrados por INDA JÚNIOR & KÄMPF (2005) e CAMARGO et al. (2008) em latossolos. Segundo INDA JÚNIOR & KÄMPF (2005), a

menor variação dos atributos da hematita se deve a maior especificidade dos fatores encontrados no ambiente de formação deste mineral em relação a goethita, que é mais sensível às mudanças do meio.

Nota-se que as características das populações dos minerais goehtita e hematita em ambientes com baixo teor de ferro, como os do presente estudo, são consoantes com as características das populações de solos com alto teor de ferro. Esta informação sinaliza o caráter indicador pedoambiental dos óxidos de ferro.

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados do Teste t-Student os resultados revelam que houve diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade das médias dos atributos entre as áreas côncava e convexa, com exceção da LMA, DMC e ASE da goethita.

Tabela 3. Valores médios dos atributos estudados nas áreas Convexa e Côncava.

Atributos		Área Convexa Média	Área Côncava Média	Teste t
LMA(1)	Gt	0,52	0,54	1,51^{ns}
	Hm	0,40	0,36	-5,96*
	Ct	0,76	0,67	7,66*
	Gb	0,31	0,29	4,48*
DMC(2)	Gt	31,60	30,30	-0,87^{ns}
	Hm	49,70	63,50	6,38*
	Ct	14,53	17,42	-7,11*
	Gb	74,50	84,00	-3,63*
SI	Gt	15,65	12,60	-3,44*
	Hm	12,45	11,15	-2,7*
ASE	Gt	81,20	86,50	1,6^{ns}
	Hm	36,31	33,69	-2,67*
Teor	Gt	13,16	10,44	-5,92*
	Hm	23,20	12,39	-20,03*
Gt/(Gt+Hm)		0,330	0,430	9,47*
Ct/(Ct+Gb)		0,866	0,919	-12,91*

(1)Largura a Meia Altura (º2θ); (2)Diâmetro Médio do Cristal (ηm), *significativo a 5% de probabilidade e ^{ns} não significativo pelo teste *t-Student*. Hm=Hematita, Gt=Goethita, Ct=Caulinita, Gb=Gibbsita.

Os maiores valores dos teores de goethita, hematita e de Fe_d da área convexa em relação à área côncava podem ser explicados pelo maior teor de argila presente na

área convexa. O maior teor de argila da área convexa é devido a menor espessura do horizonte A+E e conseqüente proximidade do horizonte Bt (mais argiloso).

Observa-se que na área convexa registram-se os maiores valores de DMC dos minerais, com exceção da Hm, e os maiores valores de SI, teor da Hm e Gt e ASE da Hm. Na área côncava encontram-se os maiores valores de LMA e ASE da Gt, DMC da hematita, razão Gt/(Gt+Hm) e razão Ct/(Ct+Gb).

Para avaliar a dependência e variabilidade espacial dos atributos estudados das áreas convexa e côncava foram construídos semivariogramas de caráter isotrópicos. As Figuras 2, 3 e 4 apresentam os semivariogramas das áreas convexa e côncava e as Tabelas 4 e 5 os parâmetros dos mesmos.

Na área convexa o modelo esférico se ajustou aos dados dos atributos DMC da hematita e goethita; LMA Hm e Gt, SI da Hm, teor da Hm, ASE da Gt, razão Gt/(Gt+Hm), Fe_d e DMC da Gb. O modelo exponencial se ajustou aos dados dos atributos SI da Gt, teor da Gt, LMA da Ct e Gb, DMC da Ct e razão Ct/(Ct+Gb).

O efeito pepita ocorreu apenas para o atributo ASE da Hm. Na área côncava o modelo esférico se ajustou aos dados dos atributos DMC da Gt, razão Gt/(Gt+Hm), LMA da Ct, razão Ct/(Ct+Gb) e o modelo exponencial se ajustou aos dados dos atributos LMA, SI, teor e ASE da Gt, Fe_d e DMC da Ct. O efeito pepita puro ocorreu para os atributos DMC, LMA, SI, ASE e teor da Hm, LMA e DMC da Gb.

De todos os atributos em estudo, na área convexa, apenas o teor da goethita apresentou grau de dependência espacial forte [$C_o/(C_o+C_1) < 25\%$], sendo que os demais atributos apresentaram grau de dependência espacial moderada [$C_o/(C_o+C_1)$ entre 25% e 75%], segundo a classificação de CAMBARDELLA et al. (2004). Na área côncava, os atributos DMC, LMA, SI, teores, ASE, razão Gt/(Gt+Hm) e Fe_d apresentaram grau de dependência espacial moderada [$C_o/(C_o+C_1)$ entre 25% e 75%] e o atributo DMC da Ct apresentou dependência espacial forte.

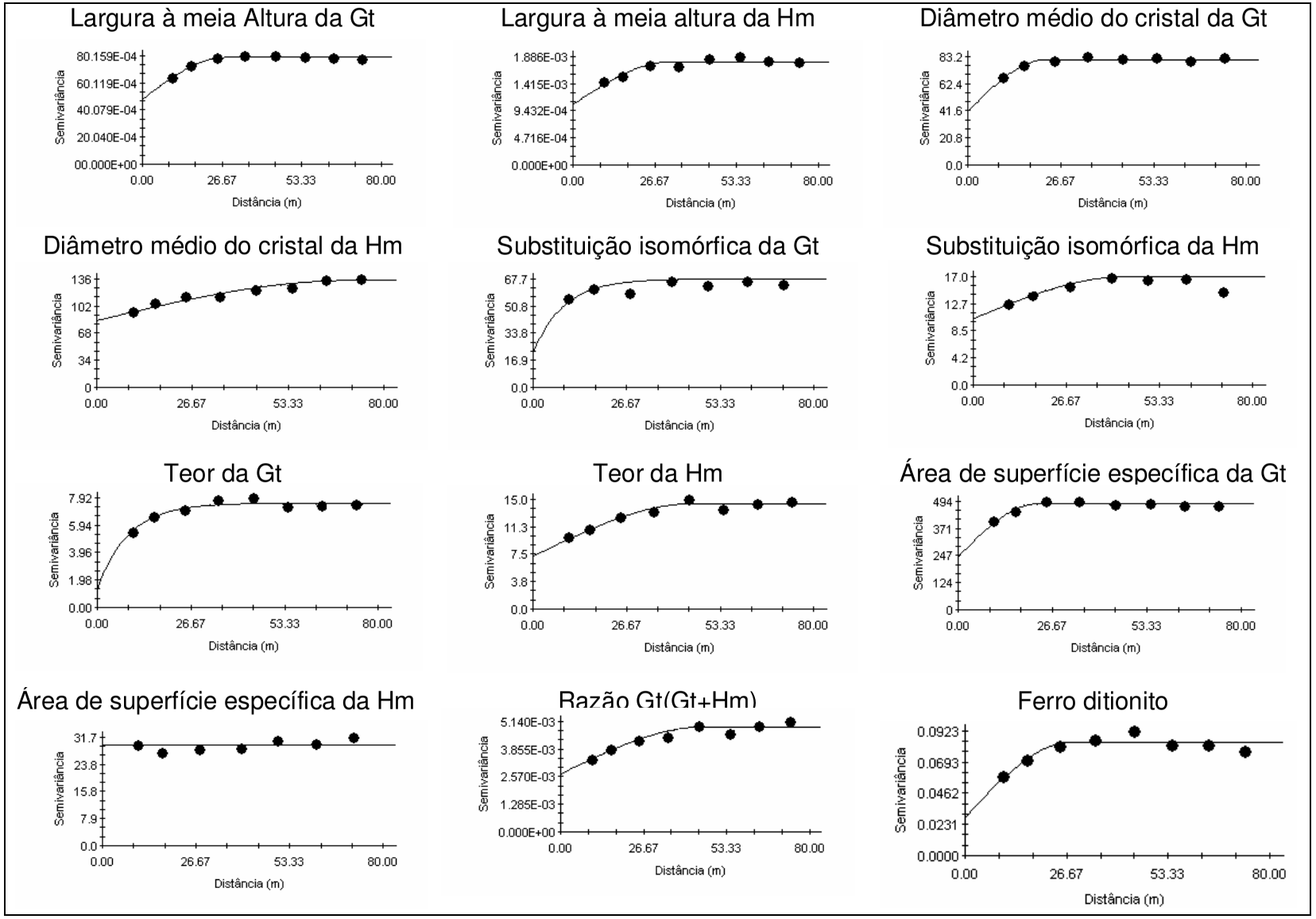

Figura 2. Semivariogramas dos atributos estudados na área convexa. Gt=goethita, Hm=hematita.

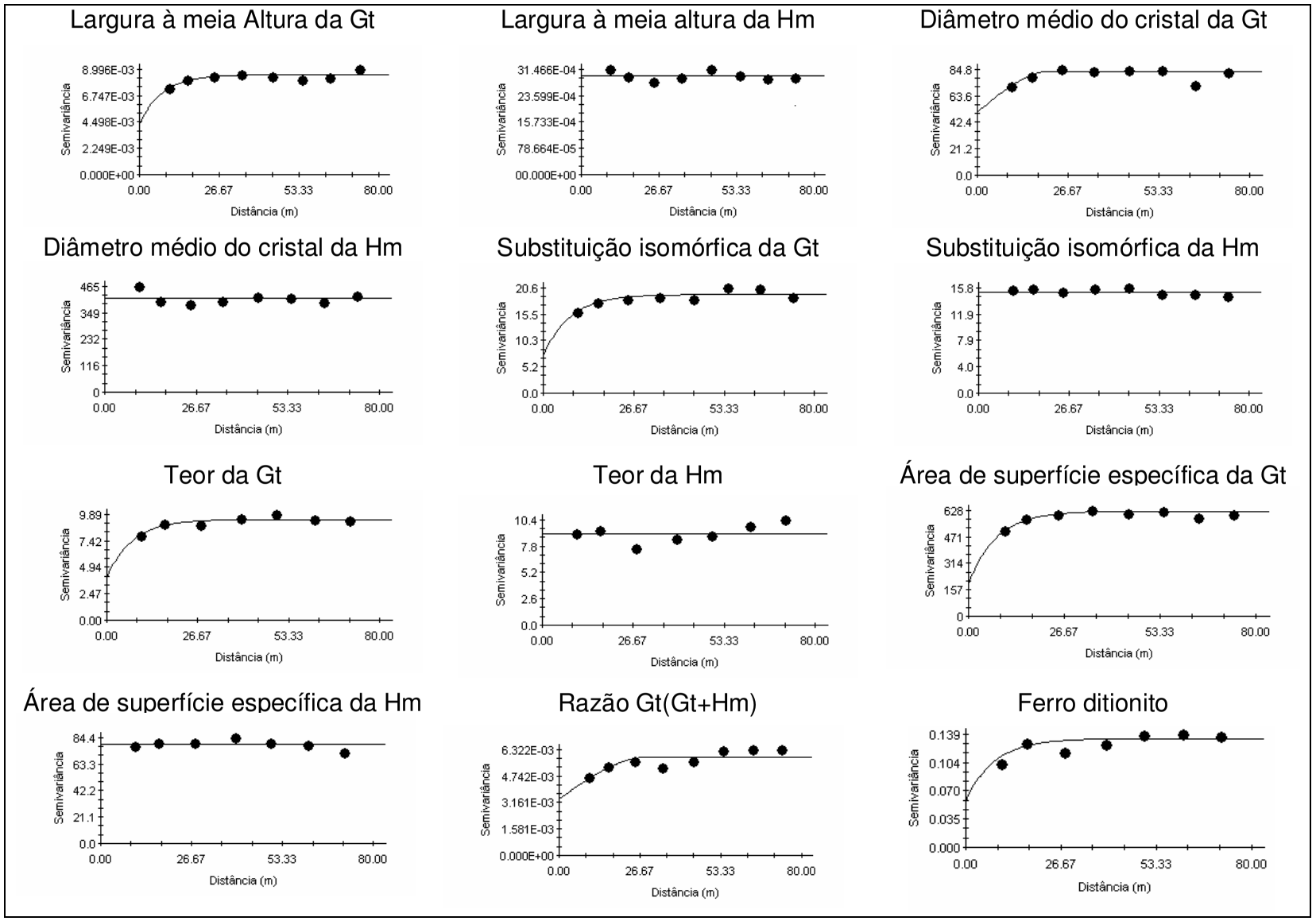

Figura 3. Semivariogramas dos atributos estudados na área côncava. Gt=goethita, Hm=hematita.

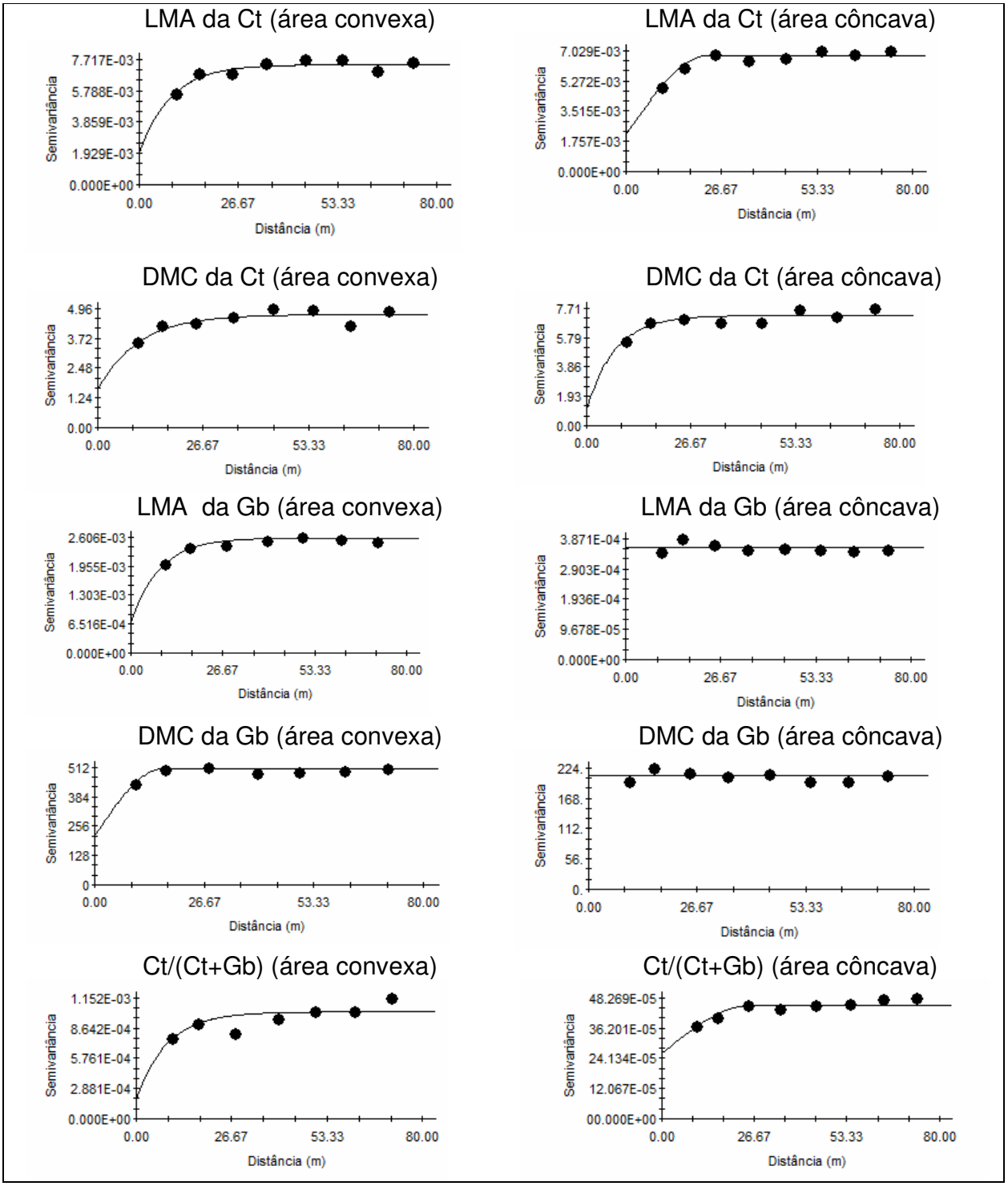

Figura 4. Semivariogramas dos atributos estudados na área convexa e côncava. Ct=caulinita, Gb=gibbsita.

Tabela 4. Análise geoestatística dos atributos dos minerais goethita e hematita da área convexa e da área côncava.

Atributos		Área	Modelo	C_0[6]	$C_0 + C_1$[7]	$C_0/(C_0+ C_1)$ %	A (m)[8]	R^2 [9]	GDE[10]
LMA[1]	Gt	convexa	Esférico	0,0050	0,008	62,50	27,64	0,979	Moderado
		côncava	Exponencial	0,0043	0,008	50,41	22,59	0,673	Moderado
	Hm	convexa	Esférico	0,0010	0,002	58,33	31,59	0,879	Moderado
		côncava				EPP			
DMC[2]	Gt	convexa	Esférico	41,0980	80,830	50,85	22,37	0,948	Moderado
		côncava	Esférico	50,5026	83,459	60,51	21,5	0,444	Moderado
	Hm	convexa	Esférico	83,5188	133,630	62,50	70,15	0,938	Moderado
		côncava				EPP			
SI[3]	Gt	convexa	Exponencial	21,3883	67,685	31,60	25,83	0,696	Moderado
		côncava	Exponencial	7,2326	19,310	37,46	23,37	0,735	Moderado
	Hm	convexa	Esférico	10,3913	16,991	61,15	43,81	0,769	Moderado
		côncava				EPP			
Teor	Gt	convexa	Exponencial	1,2910	7,538	17,13	26,52	0,900	Forte
		côncava	Exponencial	3,9951	9,429	42,37	22,44	0,817	Moderado
	Hm	convexa	Esférico	7,2200	14,450	49,96	46,20	0,949	Moderado
		côncava				EPP			
ASE[4]	Gt	convexa	Esférico	241,2000	482,500	49,99	22,2	0,910	Moderado
		côncava	Exponencial	190,8185	624,177	30,57	23,1	0,843	Moderado
	Hm	convexa				EPP			
		côncava				EPP			
Gt/(Gt+Hm)		convexa	Esférico	0,0030	0,005	60,00	46,5	0,909	Moderado
		côncava	Esférico	0,0034	0,006	57,46	29,67	0,583	Moderado
Ferrro ditionito [5]		convexa	Esférico	0,0280	0,084	33,33	27,40	0,824	Moderado
		côncava	Exponencial	0,0560	0,134	41,79	23,70	0,634	Moderado

[1]Largura a Meia Altura, [2]Diâmetro Médio do Cristal, [3] Substituição Isomórfica, [4] Área de superfície específica, [5]Ferro extraído por DBC, [6]Efeito pepita, [7]Patamar, [8]Alcance, [9]Coeficiente de determinação, [10]Grau de dependência espacial. Gt= Goethita; Hm=Hematita.

Tabela 5. Análise Geoestatística dos atributos estudados diâmetro médio do cristal (DMC); largura a meia altura (LMA) e razão Ct/(Ct+Gb) das áreas convexa e côncava.

Geoestatística	Área	LMA [5]		D		Ct/(Ct+Gb)
		Ct	Gb	Ct	Gb	
Modelo	Convexa	Exponencial	Exponencial	Exponencial	Esférico	Exponencial
	Côncava	Esférico	EPP	Exponencial	EPP	Esférico
Co[1]	Convexa	0,002	0,001	1,572	211,764	0,00019
	Côncava	0,002	-----	1,041	-----	0,00026
$Co+C_1$[2]	Convexa	0,007	0,003	4,711	507,558	0,00100
	Côncava	0,006	-----	7,247	-----	0,00045
$Co/Co+C_1$ (%)	Convexa	28,57	33,33	31,84	41,72	19,00
	Côncava	31,900	-----	14,37	-----	57,77
A (m)[3]	Convexa	25,41	24,87	30,87	16,60	25,8
	Côncava	23,04	-----	21,6	-----	25,1
R^{2}[4]	Convexa	0,834	0,944	0,758	0,863	0,532
	Côncava	0,920	-----	0,735	-----	0,833
GDE[5]	Convexa	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Forte
	Côncava	Moderado	-----	Forte	-----	Moderado

[1]Efeito pepita; [2]Patamar; [3]Alcance; [4]Coeficiente de determinação; [5]Grau de dependência espacial, [5]Largura a Meia Altura, [6]Diâmetro Médio do Cristal. Ct= caulinita, Gb= gibbsita.

Ressalta-se que os valores de alcance se apresentaram maiores para a maioria dos atributos da área convexa. Isto indica maior continuidade da distribuição espacial dos atributos dessa área. Em conseqüência, será necessário um menor número de amostras para caracterização dos solos nesta área, em estudos que visão o entendimento da variabilidade espacial (SOUZA et al., 2004; MONTANARI et al., 2005). A maior variabilidade espacial dos atributos na área côncava, está reforçada pela ocorrência de efeito pepita para maior quantidade de atributos nessa área.

Os resultados deste estudo sinalizam para que o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), esteja atento para caracterização das

formas do relevo na descrição dos perfis de solos, a exemplo das anotações de campo do *Field Book for Describing and Sampling Soils* (SCHOENEBERGER et al., 2002).

2.4 Conclusões

1. Os atributos diâmetro médio do cristal, largura a meia altura da hematita, caulinita e da gibbsita, substituição isomórfica e teores da goethita e hematita, área de superfície específica da hematita e razão Gt/(Gt+Hm) apresentam diferença significativa entre as curvaturas.

2. Os maiores teores de hematita e goethita foram encontrados na área convexa porém, há a predominância da hematita em ambas as áreas. Na área convexa a hematita apresentou o menor diâmetro médio do cristal.

3. Há predominância de caulinita na área côncava.

4. Os atributos que apresentam dependência espacial na área convexa são o diâmetro médio do cristal, largura a meia altura, da hematita, goehtita, caulinita e gibbsita, substituição isomórfica, teores, área de superfície específica da goethita e hematita, razão goethita/(goethita+hematita), e razão caulinita/(caulinita+gibbsita). Na área côncava os atributos que apresentam dependência espacial são o diâmetro médio do cristal, largura a meia altura, da caulinita e goethita, substituição isomórfica teor e área de superfície específica da goethita, razão goethita/(goethita+hematita) e razão caulinita/(caulinita+gibbsita).

5. A área convexa apresenta menor variabilidade espacial.

2.5 Referências

BARBIERI, D.M. Formas do relevo e variabilidade espacial de atributos químicos e mineralógicos de um argissolo cultivado com cana-de-açúcar. 2007. 83 f. Dissertação

(Mestrado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal 2007.

BRITO, L. F.; SOUZA, Z. M.; MONTANARI, R.; MARQUES JR, J.; CAZETTA, D. A., CALZAVARA, S. A.; OLIVEIRA, L. Influência de formas do relevo em atributos físicos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. Ciência Rural, Santa Maria, v. 36, p. 1749-1755, 2006.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G.T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo.I-Mineralogia da fração argila. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 32, p. 2269-2277, 2008.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soil Science Society of America Journal, Madison v. 58, p. 1501-1508, 1994.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; CAMARGO, L. A. Relações solo-paisagem em uma litossequência arenito-basalto na região de Pereira Barreto, SP. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 31, p. 519-529, 2007.

COELHO, M. R.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização e gênese de perfis plínticos desenvolvidos de arenito do grupo Bauru II – Mineralogia. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 27, p. 495-507, 2003.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. The iron oxides. Structure, Properties, Reactions, Occurrence and Uses,1996. 573p.

CUNHA, P.; MARQUES JR, J.; CURI, N.; PEREIRA, G. T.; LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolo em uma seqüência arenítico-basaltica da região de Jaboticabal (SP). Revista Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, v. 29, p. 81-90, 2005.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Toposequence of Oxisols from the Central Plateau of Brazil. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 48, p. 341-346, 1984.

DICK, D. P. Caracterização de óxidos de ferro e adsorção de fósforo na fração argila de horizontes B Latossólicos.1986. 196 f. Dissertação (Mestrado em Solos) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos.2. ed. Rio de Janeiro, 2006. p. 306.

FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. Iron oxides in selected Brazilian oxisols: I. Mineralogy. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 55, p. 1143-1149, 1991.

GHIDIN, A. A.; MELO, V. F.; LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I – Mineralogia da fração argila. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 30, p. 293-306, 2006.

GUALBERTO, V.; RESENDE, M.; CURI, N. Química e mineralogia de Latossolos, com altos teores de ferro, da Amazônia e do Planalto Central. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 11, p. 245-252, 1987.

GUISARDI, M. Variabilidade espacial da granulometria de argissolos em diferentes pedoformas em Catanduva-SP. 2003. 79f. Trabalho de Graduação – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

INDA JÚNIOR, A. V.; KÄMPF, N. Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 29, p. 851-866, 2005.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. Escala - 1:1.000.000. São Paulo. IPT, 1981, v.1, 94p.

KÄMPF, N. Die Eisenoxidmineralogie einer Klimasequenz von Böden aus Eruptiva in Rio Grande do Sul, Brasilien. Freising, Technische Universität München, 1981. 271p. (Tese de Doutorado)

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de atributos e ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). Tópicos em Ciência do Solo**.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.107-138.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Avaliação da estimativa de substituição de Fe por Al em hematitas de solos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 22, p. 209-213, 1998.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequênce in Southern Brazil and their application in classification of kaolinitic Soils. Geoderma, Amsterdam, v. 29, p. 27-39,1982.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clay by a dithionite-citrate system bulfered with sodium bicarbonate. Clays and Clay Minerals, New York, v. 7, p. 317-327, 1960.

MINITAB, Release. Making Data analysis Easler: version 13.1, 2000.

MONTANARI, R.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 40, p. 69-77, 2005.

NORRISH, K.; TAYLOR, R. M. The isomorphous replacement of iron by aluminum in soil goethites. Journal of Soil Science , Oxford, v. 12, p. 294-306, 1961.

REATTO, A.; BRUAND, A.; MARTINS, E. S.; MULLER, F.; SILVA, E. M.; CARVALHO JR, O. A.; BROSSARD, M. Variation of the kaolinite and gibbsite content at regional and local scale in Latosols of the Brazilian Central Plateau. Compters Rendus Geoscience, Paris, v. 340, p. 741-748, 2008.

ROBERTSON, G.P. GS^+ geostatistics for the environmental sciences: GS^+ user' guide. Plainwell: Gamma Design Software, 1998, 152 p.

SANCHEZ, R. B. Agricultura de Precisão em Argissolos com variação nas formas de relevo sob o cultivo de cana-de-açúcar. 2007.101 f. Tese (Doutorado em produção vegetal)- Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias , Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal 2007.

SCHOENEBERGER, P. J.; WYSOCKI, D. A.; BENHAM, E. C.; BRODERSON, W. D. (Eds.). 2002. Field Book for Describing and Sampling Soils. Versão 2. National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service, Lincon, Neb.

SCHULZE, D. G.; SCHWERTMANN, U. The influence of aluminium on iron oxides: X. Properties of Al-substituted goethites. Clay Minerals, Londres**,** v. 19, p. 521-539, 1984.

SCHULZE, D. G. The influence of aluminium on iron oxides VIII. Unit-cel dimension of Al-substituted of goethites and estimation of Al from them. Clays Clay Minerals, New York, v. 32, p. 36-44, 1984.

SCHWERTMANN, U.; FITZPATRICK, R. W.; TAYLOR, R. M.; LEWIS, D. G. The influence of aluminium on iron oxides. Part II: Preparation and properties of Al-substituted hematites. Clays and Clay Minerals., v. 27, p.105-12, 1979.

SCHWERTMANN, U.; CARLSON, L. Aluminium influence on iron oxides: XVII. Unit-cell parameters and aluminium substitution of natural goethites. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 58, p. 256-61, 1994.

SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of southern and central Brazil. Soil Science, Baltimore, v.139, p. 344-350, 1985.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron oxides. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Ed.). Minerals in soil environments. 2.ed. Madison: SSSA, 1989. p. 379-438. (Book Series, 1).

SOUZA, Z. M.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T; MOREIRA, L. F. Influência da pedoforma na variabilidade espacial de alguns atributos físicos e hídricos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. Irriga, Botucatu, v. 9, p. 1-11, 2004.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. Small relief shape variations influence spatial variability of soil chemical attributes. Scientia Agricola, Piracicaba, v. 63, p. 161-168, 2006.

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; BARRON, V. The reductive dissolution of synthetic goethite and hematite in dithionite. Clay Minerals, Londres, v. 22, p. 329-337, 1987.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. American Journal Science, v. 263, p. 616-627, 1965.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V.; V. H.; SCHAEFER, G. R. (Ed.) Tópicos em ciência do solo, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v. 1, p. 1-54.

CAPÍTULO 3- ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM ARGISSOLO EM CURVATURAS DO RELEVO

Resumo – A influência das formas do relevo tem sido estudada por diversos autores e explicam a variabilidade dos atributos do solo na paisagem. Os atributos físicos do solo são dependentes das formas do relevo e a avaliação destes é importante em sistemas de cultivos mecanizados como o da cultura de cana-de-açúcar. O presente estudo teve como objetivo caracterizar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo bem como a relação desses com as curvaturas do relevo em argissolos desenvolvidos de arenito, cultivados com cana-de-açúcar. Uma malha de dimensão de 100 x100 m foi delimitada em uma área caracterizada pela forma convexa e outra pela fôrma côncava. As malhas possuíam espaçamento regular de 10 x 10 m e os pontos de cruzamento deste espaçamento determinaram os pontos de coleta das amostras, num total de 121 pontos amostrais georreferenciados. Foram coletadas amostras para determinação dos atributos físicos referentes a agregados, porosidade, densidade do solo, resistência do solo à penetração e teor de água no solo nas profundidades 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m. Foram realizadas análises estatísticas e geoestatísticas e o teste t-student entre as médias obtidas nas áreas, bem como a determinação do número de amostras para determinação do valor médio dos atributos. Todos os atributos, com exceção dos agregados >2 mm na profundidade 0,00-0,20 m e dos macroporos nas duas profundidades estudadas apresentaram diferença significativa entre as curvaturas**.** A área convexa apresentou os maiores valores de diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico, agregados >2 mm, agregados 2-1 mm, volume total de poros e teor de água no solo, e os menores valores de densidade do solo e resistência do solo à penetração nas duas profundidades estudadas em relação à área côncava. A área côncava apresentou um maior número de atributos do solo com maior variabilidade espacial e necessita um maior número de amostras para estimar o valor médio dos atributos físicos.

Palavras-Chave: relação solo-paisagem, formas do relevo, geoestatística, semivariograma.

3.1 Introdução

Vários estudos comprovam a influência do relevo nas variações dos atributos físicos do solo com conseqüências no desenvolvimento das plantas (RAZAEI & GILKES, 2005; TERRA et al., 2005, PENNOCK et al., 2001). O relevo é um fator de formação do solo independente (JENNY,1941) e majoritário que determina a distribuição dos solos na paisagem (BOCKHEIM et al., 2005). Assim, sua atuação na formação do solo pode ser estudada isoladamente. Atributos da topografia como curvaturas, declividade entre outros, influenciam as condições hidrológicas gerando padrões de umidade e de fluxos de água diferentes. SEIBERT et al. (2007) ressaltaram a influência da topografia na formação de diferentes classes de solos intermediada por processos hidrológicos que são, possivelmente, compreendidos e preditos utilizando-se os atributos físicos do solo (MELLO et al., 2007).

A adoção de técnicas de cultivo e colheita intensamente mecanizadas na cultura de cana-de-açúcar tem provocado alterações no comportamento das propriedades físicas do solo e na produtividade dos canaviais (SOUZA et al., 2004a,b). Seu principal efeito é a compactação do solo, sendo necessários estudos de avaliação deste processo para otimização da produção da cultura. A avaliação dos atributos físicos do solo é importante para o diagnóstico do grau de compactação e para o planejamento do manejo físico do solo.

Os valores ideais dos atributos físicos do solo para o adequado crescimento das culturas estão em permanente discussão e dependem da classe de solo. Para macroporos, por exemplo, o valor de 10% é encontrado na literatura como valor mínimo para o desenvolvimento das raízes (VOMOCIL & FLOCKER, 1966; GRABLE & SIEMER, 1968). Como valores de densidade do solo que podem acarretar comprometimento ao crescimento das raízes são citados: >1,5 Mg m^{-3} para solos argilosos e >1,6-1,8 Mg m^{-3}

para solos arenosos (VEIHMEYER & HENDRICKSON ,1948), 1,2 a 1,4 Mg m^{-3} para solos com mais de 10% de silte + argila (JOANES, 1983). Para resistência do solo à penetração EHLERS et al. (1983) relatam que valores superiores à 5,0 MPa são admitidos em plantio direto. DEXTER (1987) enfatiza a relação do teor de água no solo e resistência do solo à penetração, e cita valores acima de 4,0 MPa aceitáveis, em se tratando de solos com umidade mais elevada. Segundo REYNOLDS et al. (2002), a densidade do solo e a porosidade do solo são, entre outros, podem ser utilizados como atributos indicadores de qualidade física do solo.

Para auxiliar o diagnóstico do estado físico do solo na paisagem, alguns autores avaliaram que a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo é dependente das formas do relevo (SOUZA et al., 2004a, BRITO et al., 2006). O potencial de degradação do solo pelo manejo varia mediante a posição em que se encontra na paisagem e da distribuição espacial das propriedades do mesmo (CAMBARDELLA et al., 2004). SOARES et al. (2005) afirmaram que para entender as variações temporais dos atributos físicos do solo, é necessário considerar variações verticais e laterais (ao longo da toposseqüência). JUHÁSZ et al. (2006) concluíram que o comportamento físico-hídrico dos solos estudados é influenciado pelas condições do relevo.

A importância dos modelos de paisagem para o entendimento das relações solo-geomorfologia foi enfatizada por CAMPOS et al. (2006). Os mesmos autores relataram, entre outros, sobre o modelo estabelecido por TROEH (1965) que se baseiam em perfis e curvaturas do terreno. Neste modelo as pedoformas variam desde lineares até as côncavas passando pelas convexas.

A geoestatística permite caracterizar a dependência e a variabilidade espacial dos atributos do solo (VIEIRA, 2000). Ela envolve principalmente o uso do semivariograma, que é a estimativa e a modelagem da estrutura espacial da variância, e a krigagem que é a predição de valores da variável regionalizada em pontos ou regiões não amostrados (VIEIRA et al., 1983).

A variabilidade espacial da estabilidade dos agregados e matéria orgânica num Latossolo foi relacionada por SOUZA et al. (2004a) à pequenas variações no gradiente de declive e formas do relevo. A dependência espacial da estabilidade dos agregados

foi observada num Latossolo por CAMARGO et al. (2008) e foi correlacionada espacialmente com a mineralogia da fração argila. ZANETTE et al. (2007) avaliaram a variabilidade espacial da umidade de um Latossolo Vermelho e encontraram valores de alcance para este atributo de 5,20 a 10,67 m. Eles afirmaram que o atributo estudado não apresentou dependência espacial em camadas mais profundas.

A geoestatística permite ainda, determinar a intensidade e forma de amostragem dos atributos, pois os valores de alcance do semivariograma são uma indicação da distância ideal de amostragem (VIEIRA et al., 1992). Neste sentido, atributos com valores de alcances maiores necessitam de menor quantidade de amostras que atributos com menores valores de alcance. Porém, na ausência de dependência espacial, aplica-se a estatística clássica (SILVA et al., 1989).

O presente estudo teve como objetivo caracterizar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo bem como a relação desses com as curvaturas do relevo em argissolos desenvolvidos de arenito, cultivados com cana-de-açúcar.

3.2 Material e Métodos

A área de estudo está localizada no município de Catanduva – SP, cujas coordenadas geográficas são: Latitude 21^{o}05'57,11"S e Longitude 49^{o}01'02,08" W. O clima da região foi classificado pelo método de Köppen, como tropical quente úmido, tipo Aw, seco no inverno, com precipitação média de 1.350 mm, temperatura média anual de 23 ^{o}C, com temperatura no mês mais quente superior a 22 ^{o}C e a do mês mais frio inferior a 18 ^{o}C, e umidade relativa do ar de 74%. A vegetação primária da região de Catanduva foi classificada como floresta pluvial estacional e cerrado, sendo o uso atual principalmente cana-de-açúcar, a mais de 20 anos em sistema de colheita pós-queimada.

Os materiais de origem dos solos foram mapeados como rochas areníticas sedimentares do Grupo Bauru, Formação Adamantina (IPT, 1981). A área de estudo foi caracterizada utilizando fotografias aéreas da região na escala 1:35.000, perfil

altimétrico, e no campo classificação geomorfológica e pedológica. O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico textura média/argilosa (EMBRAPA, 2006).

Para a identificação das formas do terreno conforme a classificação de TROEH (1965), foi realizado o mapeamento de uma área de 200 hectares, utilizando-se equipamento de sistema de posicionamento global (GPS). As coordenadas e a altimetria foram utilizadas para a elaboração do modelo digital de elevação (MDE) por meio de técnicas de geoestatística (Figura 1). As observações de campo e do MDE permitiram identificar duas áreas: uma caracterizada pela forma convexa e a outra pela forma côncava. A área convexa possui valores para teor de argila, matéria orgânica, ferro total e espessura do horizonte A+E de 230 g kg^{-1}, 15 g dm^{-3}, 4% e 30 cm, respectivamente, e a área côncava possui valores de 189 g Kg^{-1}, 13 g dm^{-3}, 2% e 39 cm, respectivamente, para os mesmos atributos (BARBIERI, 2007, GUISARDI 2003 e SANCHEZ, 2007).

Uma malha de dimensão de 100 x 100 m foi delimitada em cada uma das áreas. As malhas possuem espaçamento regular de 10 x 10 m e os pontos de cruzamento deste espaçamento determinaram os pontos de coleta das amostras, num total de 121 pontos amostrais georreferenciados. Trincheiras de 0,50 m de profundidade e 0,3 x 0,3 m de largura foram abertas em cada ponto de amostragem para coleta de amostras indeformadas em anéis volumétricos e solo para os demais atributos As amostras de solo foram coletadas nas profundidades: 0,0 - 0,2 e 0,2 - 0,4 m, porém para análise de correlação foram utilizados somente os dados da profundidade 0,0 - 0,2 m.

As amostras coletadas foram destorroadas, secas à sombra e parte do solo foi peneirado em peneira de 9,51 mm de diâmetro de malha para as análises relativas à agregação, e a outra parte peneirada na peneira de 2,0 mm. A separação e estabilidade dos agregados foram determinadas pelo método descrito por KEMPER & CHEPIL (1965). Os agregados foram colocados em contato com a água sobre a peneira de 4,76 mm por quinze minutos, a massa do material retido em cada peneira, foi colocada em estufa a 105 ^{o}C. Mediante os resultados obtidos foi calculado o diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP).

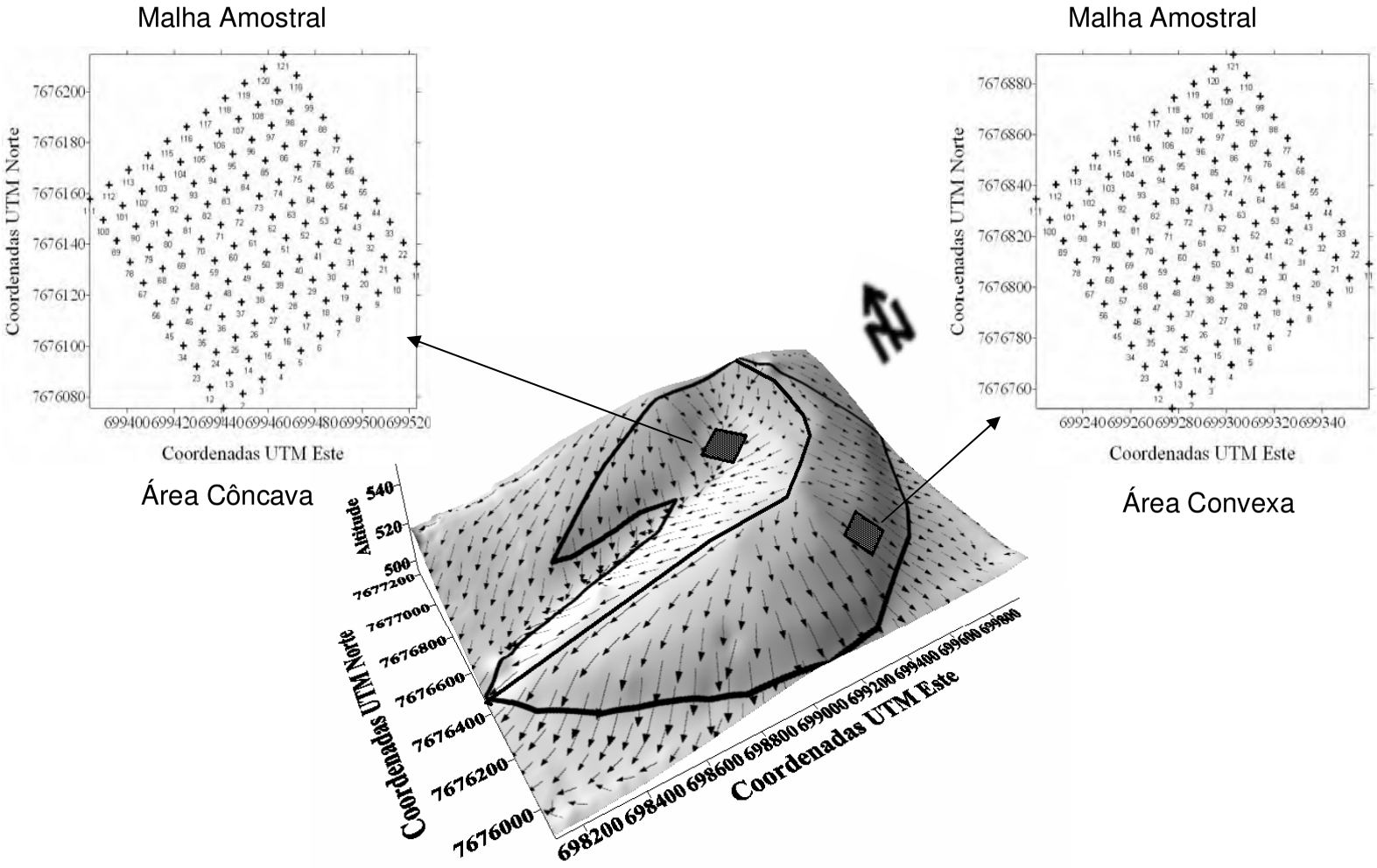

Figura 1. Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo e local da coleta das amostras (+). Setas na figura central representam o fluxo de água superficial.

Para a determinação da porosidade do solo (porosidade total, macroporos e microporos), as amostras indeformadas foram saturadas por 48 h em bandeja com água até dois terços da altura do anel. Após o período de saturação, as amostras foram drenadas no potencial equivalente a -0,006 MPa utilizando-se uma mesa de tensão (EMBRAPA, 1997). Nas mesmas amostras a densidade do solo foi determinada por meio do método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).

A resistência do solo à penetração foi determinada, em cada ponto da malha, utilizando um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar, a qual foi calculada, conforme STOLF (1991), de acordo com a equação:

de acordo com a equação:

RPM = (5,6 + 6,89 x ((N/(P-A) x 10)) x 0,0981 (1)

em que, RPM é o valor médio da resistência do solo à penetração (MPa), N é o número de impactos efetuados com o martelo do penetrômetro para a obtenção da leitura, A e P são, respectivamente, as leituras antes e depois da realização dos impactos (cm).

Os resultados das análises de laboratório foram submetidos à análise estatística descritiva. Para avaliação da diferença dos valores médios dos atributos do solo entre as áreas convexa e côncava aplicou-se o teste t-student. Todos esses resultados foram obtidos com o uso do pacote estatístico MINITAB (MINITAB, 2000).

A análise de dependência espacial foi realizada aplicando-se técnicas de geoestatística (VIEIRA et al., 1983). Sob a hipótese intrínseca de estacionaridade os semivariogramas foram estimados e para aqueles que apresentaram dependência espacial foi ajustado um modelo matemático permissível definição de seus parâmetros. O semivariograma é um gráfico que caracteriza a estrutura de dependência espacial da variável (ou variáveis) sob estudo, ou seja, o semivariograma é uma função que relaciona a semivariância com o vetor distância, podendo ser representada analítica e/ou graficamente, sendo estimado pela seguinte equação:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[Z(x_i) - Z(x_i + h) \right]^2 \quad (2)$$

em que, N(h) é o número de pares experimentais de dados separados pelo vetor h e Z representa os valores medidos para atributos do solo ou da cultura. O semivariograma normalmente é representado pelo gráfico de γ (h) versus h. O programa utilizado para avaliação da dependência espacial foi o GS^+ (ROBERTSON, 1998).

Quando o semivariograma apresentar um aumento da variância sem estabelecer um patamar a remoção da tendência ou não estacionaridade pode ser efetuada, ajustando-se uma superfície de tendência (DAVIS, 1973). No presente estudo optou-se por usar o grau de superfície linear para remoção da tendência dos atributos que apresentaram esse fenômeno segundo metodologia abordada em VIEIRA et al., (1992) e VIEIRA (2000).

O número de amostras para estimar o valor médio dos atributos foi determinado usando a fórmula descrita por CLINE (1944):

$$n = \left(\frac{t\alpha CV}{D} \right)^2 \qquad (3)$$

em que n é o número mínimo de amostras; tα é o valor do teste t de Student para o nível de probabilidade de 5%; CV é o coeficiente de variação; D é a porcentagem de variação em torno da média (10%).

3.3 Resultados e Discussão

Os valores referentes ao teste Anderson-Darling (valor *p*) não indicaram distribuição normal para todos os atributos do solo estudados (Tabelas 1 e 2). Porém, as distribuições dos dados estão simétricas, indicados pela proximidade dos valores de média e mediana e curtose e assimetria próximos de 0, com exceção dos agregados entre 2-1 mm (em ambas as profundidades); DMP; agregados >2 mm da área da área convexa; atributos referentes aos agregados da área côncava em ambas as profundidades na área côncava com exceção dos agregados entre 2-1 mm na profundidade de 0,0-0,2 m.

Os valores de coeficiente de variação (CV, Tabelas 1 e 2) dos atributos do solo variaram entre baixos (< 12%), médios (entre 12 e 24%) e alto (> 24%) segundo

classificação proposta por WARRICK & NIELSEN (1980). Os altos valores dessa estimativa revelam a necessidade de uma avaliação que permita uma melhor compreensão da variação dos dados. A estimativa do CV auxilia a avaliação da variabilidade dos atributos como na técnica que se utiliza a determinação do número mínimo de amostragem (CLINE 1944; MONTANARI et al., 2005). Porém, não permite a avaliação da dependência espacial dos atributos que é verificada, entre outras técnicas, por meio de técnicas geoestatísticas.

Observa-se que os valores médios dos atributos que determinam a estabilidade dos agregados, diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG), foram maiores nas profundidades 0,0-0,2 m (Tabelas 1 e 2). Os valores de VTP estão abaixo dos encontrados por ARAÚJO et al. (2004) em um Argissolo Amarelo sob diversos manejos e mata nativa e por MARCOLAN & ANGUINONI (2006) em um Argissolo Vermelho distrófico sob culturas anuais, contudo, os valores na camada superficial foram maiores no sistema de manejo convencional assim como nas áreas estudadas. Este comportamento se repete com os macroporos, ou seja, este atributo também possui valor médio maior na camada superficial. No presente estudo este atributo, em ambas áreas e profundidades, está entre 13,29 e 14,31 %, intervalo acima do valor considerado mínimo, para o desenvolvimento das plantas, que é de 10% (VOMOCIL & FLOCKER, 1966 e GRABLE & SIEMER 1968).

Os valores de Ds estão próximos aos de um Argissolo Amarelo distrófico arênico estudado por LIMA et al. (2005) sob mata preservada e dos valores encontrados por ARAÚJO et al. (2004) sob área recém desbravada e queimada. FALLEIRO et al. (2003) em um Argissolo Vermelho-Amarelo com 45% de argila, encontraram valores de médios de Ds entre 1,14 a 1,37 Mg m^{-3}. SOUZA (2004) estudando um Latossolo Vermelho eutroférrico sob cultivo de cana de açúcar e sistema de cana-queimada obteve o valor de 1,41 $g.cm^{-3}$ nas profundidades de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m.

Na área convexa, onde ocorrem os menores valores relativos de Ds, estão também registrados os menores valores de RP e os maiores valores de teor de água no solo, em ambas as profundidades (Tabela 1). Este resultado corrobora com os estudos de LAMPURLANÉS & CANTERO-MARTINEZ (2003). LIMA et al. (2006) afirmaram que,

Tabela 1. Estatísticas Descritivas dos atributos diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), agregados >2mm (>2 mm), agregados 2_1 mm (2_1 mm) e agregados <1 mm (<1 mm), microporos (micro), macroporos (macro), volume total de poros (VTP), densidade do solo (Ds), resistência do solo à penetração (RP) e teor de água no solo (TAS) nas profundidades 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m -área convexa.

	Média	Mediana	Var.	Máx.	Mín.	Assimetria	Curtose	DP[(1)]	CV[(2)]	*p*[(3)]
					0,0-0,2 m					
DMP (mm)	0,71	0,63	0,08	1,46	0,25	1,09	0,79	0,27	39,0	0,00
DMG (mm)	0,65	0,64	0,01	0,87	0,48	0,31	-0,43	0,09	13,5	0,15
>2 mm (%)	14,20	10,75	88,10	43,58	1,34	1,09	0,52	9,39	66,1	0,00
2_1 mm (%)	7,35	6,16	20,45	24,61	0,91	1,43	2,27	4,52	61,5	0,00
<1 mm (%)	78,45	80,64	117,9	95,20	51,4	-0,64	-0,41	10,86	13,8	0,00
Micro (%)	22,75	22,85	12,26	31,59	15,4	0,07	-0,49	3,50	15,4	0,51
Macro (%)	14,31	13,87	20,62	24,96	3,94	0,19	-0,34	4,54	31,7	0,05
VTP (%)	37,04	36,95	9,77	44,41	31,0	0,13	-0,63	3,12	8,4	0,51
Ds ($Mg.m^{-3}$)	1,46	1,46	0,01	1,65	1,28	0,01	-0,71	0,09	6,2	0,42
RP (MPa)	1,77	1,73	0,36	3,20	0,70	0,34	-0,70	0,60	34,1	0,04
TAS (%)	15,07	15,01	1,90	18,67	12,0	0,36	0,10	1,38	9,2	0,28
					0,2-0,4 m					
DMP (mm)	0,62	0,56	0,05	1,52	0,24	1,53	3,20	0,23	36,5	0,00
DMG (mm)	0,63	0,64	0,01	0,85	0,47	0,40	-0,11	0,08	11,9	0,18
>2 mm (%)	10,78	8,92	64,43	44,00	0,40	1,48	2,48	8,03	74,5	0,00
2_1 mm (%)	7,95	6,76	23,92	25,79	0,74	1,19	1,76	4,89	61,5	0,00
<1 mm (%)	81,27	83,50	107,7	97,58	51,2	-0,78	0,01	10,38	12,8	0,00
Micro (%)	23,01	22,49	17,84	32,82	14,4	0,46	-0,30	4,22	18,3	0,01
Macro (%)	13,64	14,05	19,53	23,33	3,00	-0,38	0,23	4,42	32,4	0,08
VTP (%)	36,63	36,12	9,20	45,89	30,7	0,81	0,77	3,03	8,3	0,00
Ds ($Mg.m^{-3}$)	1,49	1,48	0,01	1,81	1,25	0,61	1,78	0,09	6,1	0,00
RP (MPa)	3,67	3,69	0,99	6,31	1,60	0,15	-0,25	0,99	27,1	0,09
TAS(%)	15,25	15,18	2,27	19,25	11,8	0,24	0,19	1,51	9,9	0,43

[(1)]Desvio Padrão; [(2)]Coeficiente de Variação (%), [(3)]Teste de normalidade Anderson-Darling (*p>0,05 distribuição normal dos dados)*. Var.=Variância, Min.=Mínimo, Máx.= Máximo.

diante da correlação significativa encontrada entre teor de água no solo, resistência do solo à penetração e pressão de preconsolidação, a capacidade de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo pode ser estimada pela resistência do solo à penetração, confirmando a importância desse atributo na avaliação da qualidade física dos solos. Os valores de RP, com exceção da área convexa na profundidade de 0,0-0,2 m, estão acima do valor crítico de 2,0 MPa para o desenvolvimento das raízes (TAYLOR et al., 1966). Porém, este limite segundo DEXTER (1987) pode ultrapassar 4,0 MPa tratando-se de solo não seco.

Tabela 2. Estatísticas Descritivas dos atributos diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), agregados >2mm (>2 mm), agregados 2_1 mm (2-1 mm) e agregados <1 mm (<1 mm), microporos (micro), macroporos (macro), volume total de poros (VTP), densidade do solo (Ds), resistência do solo à penetração (RP) e teor de água no solo (TAS) nas profundidades 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m -área côncava.

	Média	Mediana	Var.	Máx.	Mín.	Assimetria	Curtose	DP[(1)]	CV[(2)]	*p*[(3)]
					0,0-0,2 m					
DMP (mm)	0,58	0,48	0,11	2,60	0,22	3,16	14,24	0,33	57,2	0,00
DMG (mm)	0,56	0,54	0,01	1,23	0,45	3,59	19,98	0,10	17,5	0,00
>2 mm (%)	12,56	9,48	91,99	64,90	2,16	2,48	9,12	9,59	76,4	0,00
2_1 mm (%)	2,84	2,60	2,13	6,98	0,29	0,67	-0,03	1,46	51,5	0,00
<1 mm (%)	84,60	86,94	102,3	97,16	30,20	-2,25	7,97	10,12	12,0	0,00
Micro (%)	21,52	21,43	17,47	33,13	10,10	-0,17	0,50	4,18	19,4	0,06
Macro (%)	13,45	12,33	19,39	27,40	7,52	0,98	0,54	4,40	32,7	0,00
VTP (%)	35,03	34,30	15,28	45,06	25,40	0,52	-0,03	3,90	11,2	0,00
Ds (Mg m^{-3})	1,52	1,52	0,014	1,88	1,28	0,68	0,97	0,12	7,9	0,00
RP (MPa)	2,54	2,51	0,65	4,93	0,55	0,31	0,02	0,80	31,7	0,41
TAS (%)	13,16	12,94	3,07	17,87	9,28	0,69	0,54	1,75	13,3	0,00
					0,2-0,4 m					
DMP (mm)	0,45	0,40	0,05	1,42	0,18	1,99	5,51	0,22	48,2	0,00
DMG (mm)	0,53	0,52	0,01	0,85	0,43	1,49	3,61	0,07	13,3	0,00
>2 mm (%)	8,17	6,38	48,01	39,46	0,62	2,24	6,32	6,93	84,8	0,00
2_1 mm (%)	3,03	2,35	5,47	12,22	0,20	1,65	3,11	2,33	77,1	0,00
<1 mm (%)	88,53	90,84	80,45	98,97	37,50	-2,40	9,06	8,97	10,3	0,00
Micro (%)	19,27	19,20	9,56	28,66	11,10	-0,05	0,61	3,09	16,0	0,07
Macro (%)	13,29	12,56	16,59	24,57	6,30	0,62	-0,49	4,07	30,6	0,00
VTP (%)	32,53	32,37	9,14	40,98	26,90	0,48	0,14	3,02	9,30	0,19
Ds (Mg m^{-3})	1,53	1,53	0,01	1,76	1,34	0,13	0,20	0,07	5,13	0,50
RP (MPa)	4,80	5,06	5,08	10,13	0,55	-0,25	-0,18	2,25	46,9	0,00
TAS (%)	13,35	13,12	2,60	17,48	9,79	0,35	-0,19	1,61	12,1	0,11

[(1)]Desvio Padrão; [(2)]Coeficiente de Variação (%), [(3)]Teste de normalidade Anderson-Darling (*p>0,05 distribuição normal dos dados)*. Var.=Variância, Min.=Mínimo, Máx.= Máximo.

Os valores médios dos atributos estudados, quando comparados com os valores apresentados na literatura, não são discrepantes daqueles encontrados nos argissolos brasileiros. Porém, observa-se que a amplitude entre valores máximo e mínimo (Tabelas 1 e 2), para alguns atributos, não está dentro do intervalo citado por autores nacionais e internacionais. Tal fato pode ser assumido como um alerta para a necessidade de uma análise de variabilidade espacial dos atributos estudados. A existência de uma maior amplitude entre valores desses atributos indica que as suas médias não representam o que ocorre espacialmente na área. Este aspecto é importante no planejamento do manejo localizado do solo.

Os resultados do Teste t-Student (Tabela 3) revelaram que houve diferença significativa à 5% de probabilidade das médias dos atributos, entre as áreas convexa e côncava, nas duas profundidades estudadas com exceção da porcentagem dos agregados >2 mm na profundidade de 0,0-0,2 m e macroporos em ambas as profundidades estudadas.

Tabela 3. Médias dos atributos diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), porcentagem dos agregados >2mm (>2 mm), porcentagem dos agregados 2-1 mm (2-1 mm) e porcentagem dos agregados <1 mm (<1mm), microporos (micro), macroporos (macro), volume total de poros (VTP), densidade do solo (Ds), resistência do solo à penetração (RP) e teor de água no solo (TAS) nas profundidades 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m dos 121 pontos da área convexa e côncava.

	Área	Média	Teste *t*-student	Área	Média	Teste *t*-student
	---------- 0,00-0,20 cm ----------			---------- 0,20-0,40 cm ----------		
DMP (mm)	Convexa Côncava	0,71 0,58	-3,17*	Convexa Côncava	0,62 0,45	-5,89*
DMG (mm)	Convexa Côncava	0,65 0,56	-7,96*	Convexa Côncava	0,63 0,53	-11,44*
>2mm (%)	Convexa Côncava	14,20 12,56	-1,35^{ns}	Convexa Côncava	10,78 8,17	-2,70*
2-1 mm(%)	Convexa Côncava	7,35 2,84	-10,43*	Convexa Côncava	7,95 3,30	-9,97*
<1 mm (%)	Convexa Côncava	78,45 84,60	4,56*	Convexa Côncava	81,27 88,53	5,82*
Micro (%)	Convexa Côncava	22,75 21,52	-2,48*	Convexa Côncava	23,01 19,27	-7,85*
Macro (%)	Convexa Côncava	14,31 13,45	-1,49^{ns}	Convexa Côncava	13,64 13,29	-0,64^{ns}
VTP (%)	Convexa Côncava	37,04 35,03	-4,41*	Convexa Côncava	36,63 32,53	-10,52*
Ds (Mg m^{-3})	Convexa Côncava	1,46 1,52	4,68*	Convexa Côncava	1,49 1,53	4,23*
RP (Mpa)	Convexa Côncava	1,77 2,54	8,41*	Convexa Côncava	3,67 4,80	5,03*
TAS (%)	Convexa Côncava	15,07 13,16	-9,42*	Convexa Côncava	15,25 13,35	-9,48*

*significativo a 5% de probabilidade e ^{ns} não significativo pelo teste *t*-student.

Observa-se que na área convexa ocorreram os maiores valores de DMP, DMG, agregados >2 mm, porcentagem de agregados entre 2-1 mm, VTP e teor de água no solo, e os menores valores de Ds, RP nas duas profundidades (Tabela 3). Esses resultados podem ser explicados pelos maiores valores do teor de argila, matéria

orgânica, e ferro total nos solos da área convexa, em relação à área côncava que apresentam valores menores para estes atributos. Esses atributos são fundamentais para agregação do solo (ARCA & WEED,1966; TISDALL & OADES, 1982; AZEVEDO & BONUMÁ, 2004). A diferença entre estes atributos está relacionada com a menor espessura do horizonte A+E dos solos na área convexa (0,30 m) em relação àqueles da área côncava (0,39 m). Assim na área convexa há maior influência do horizonte mais argiloso característico dos argissolos.

Portanto, pode-se afirmar que, os solos da área convexa apresentaram os melhores índices relativos de qualidade física (REYNOLDS et al., 2002) que os solos da área côncava, o que reflete a nítida influência das formas do relevo sobre esses atributos. CAMBARDELLA et al. 2004 verificou o efeito da paisagem na qualidade física do solo. Em estudo realizado por SOARES et al. (2005), o relevo influenciou a alteração da densidade e macroporos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar corroborando as informações de SOUZA (2004).

Para avaliação da dependência espacial foram construídos semivariogramas (Figuras 2, 3, 4 e 5). Os modelos que se ajustaram aos semivariogramas dos atributos foram: a) exponencial para o DMP, agregados > 2mm, macroporos, RP e teor de água no solo da área convexa na profundidade de 0,0-0,2 m, RP da área convexa na profundidade de 0,2-0,4 m e RP da área côncava nas duas profundidades estudadas; b) esférico para agregados >1 mm, microporos, VTP, Ds da área convexa na profundidade de 0,0-0,2 m, DMP, agregados >2 mm, microporos, VTP, RP e teor de água no solo da área convexa na profundidade 0,2-0,4 m, microporos, VTP e Ds da área côncava na profundidade 0,20-0,40 m. McBRATNEY & WEBSTER (1986) relataram que os modelos esférico e exponencial são os mais presentes nos trabalhos em ciência do solo.

Os macroporos da área convexa na profundidade de 0,0-0,2 m apresentaram grau de dependência espacial forte [Co/(Co+C1) < 25%], enquanto que os demais atributos apresentam grau de dependência espacial moderada [Co/(Co+C1) entre 25% e 75%] segundo classificação de CAMBARDELLA et al. (1994) (Figuras 2, 3, 4 e 5).

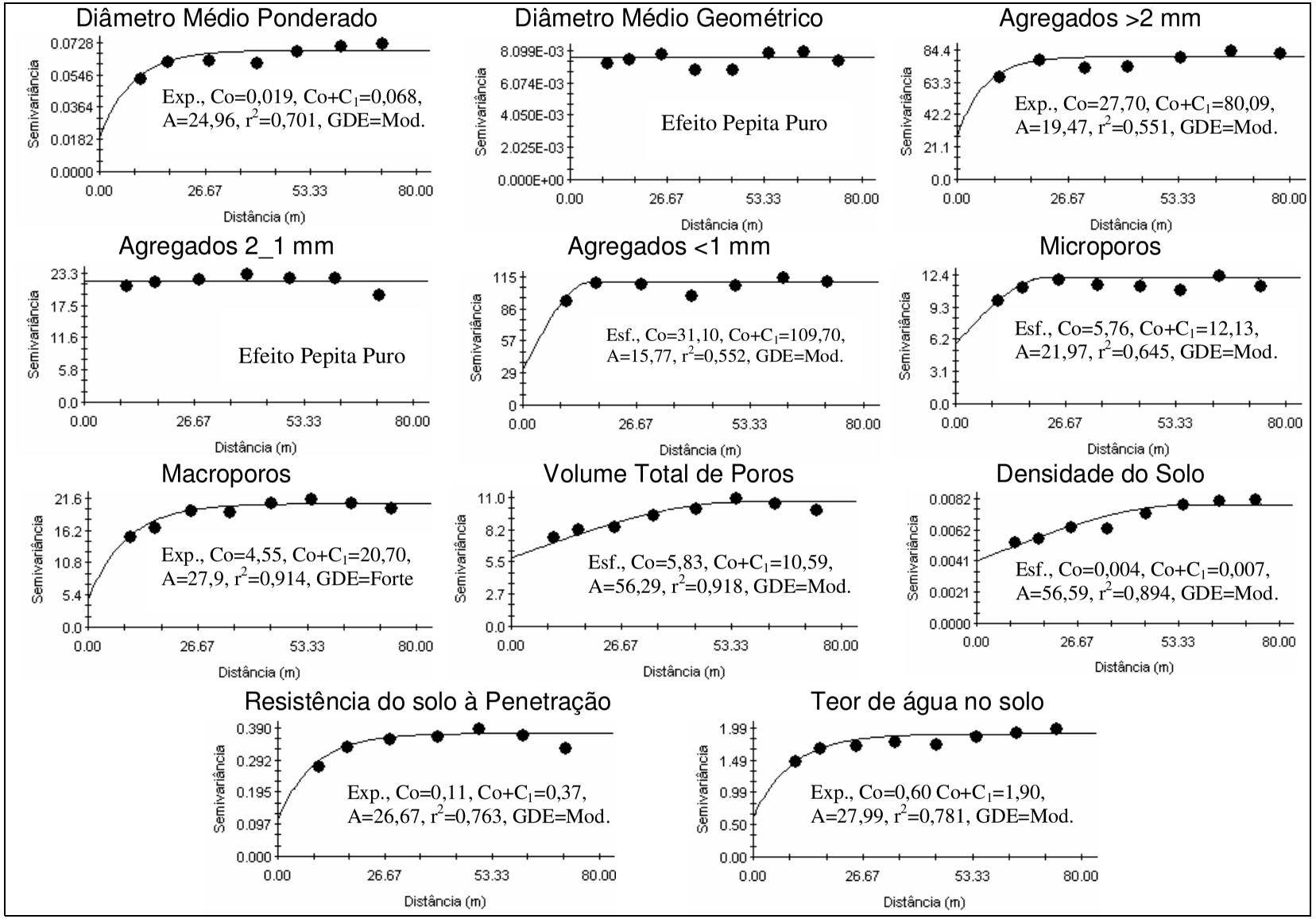

Figura 2. Semivariogramas dos atributos estudados da área convexa na profundidade de 0,0-0,2 m. Exp.=Exponencial; Esf.=Esférico; Co= Efeito pepita; C_1= Patamar; a= Alcance (m); r^2= Coeficiente de determinação.

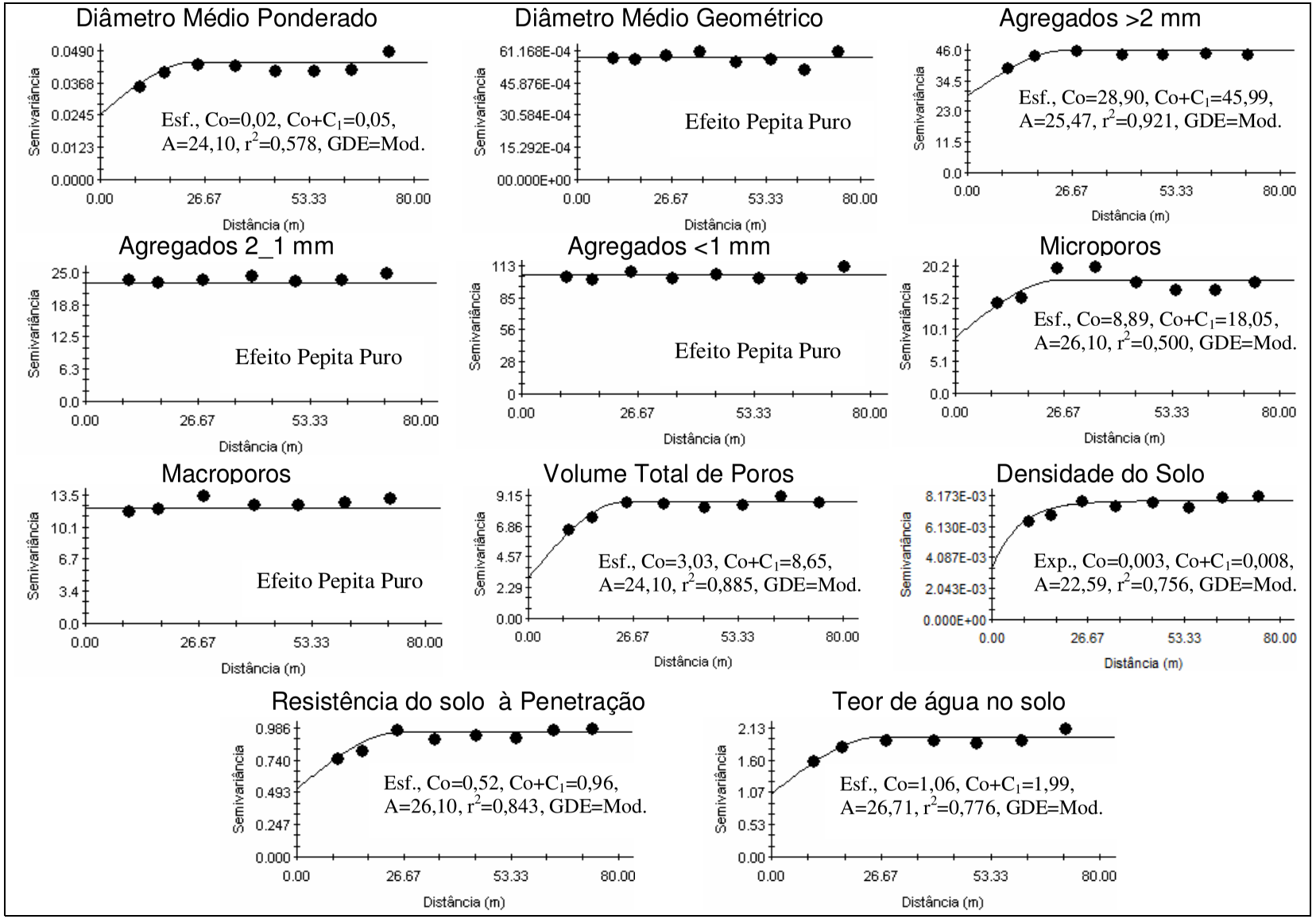

Figura 3. Semivariogramas dos atributos estudados da área convexa na profundidade 0,2-0,4 m. Exp.=Exponencial; Esf.=Esférico; Co= Efeito pepita; C_1= Patamar; a= Alcance (m); r^2= Coeficiente de determinação.

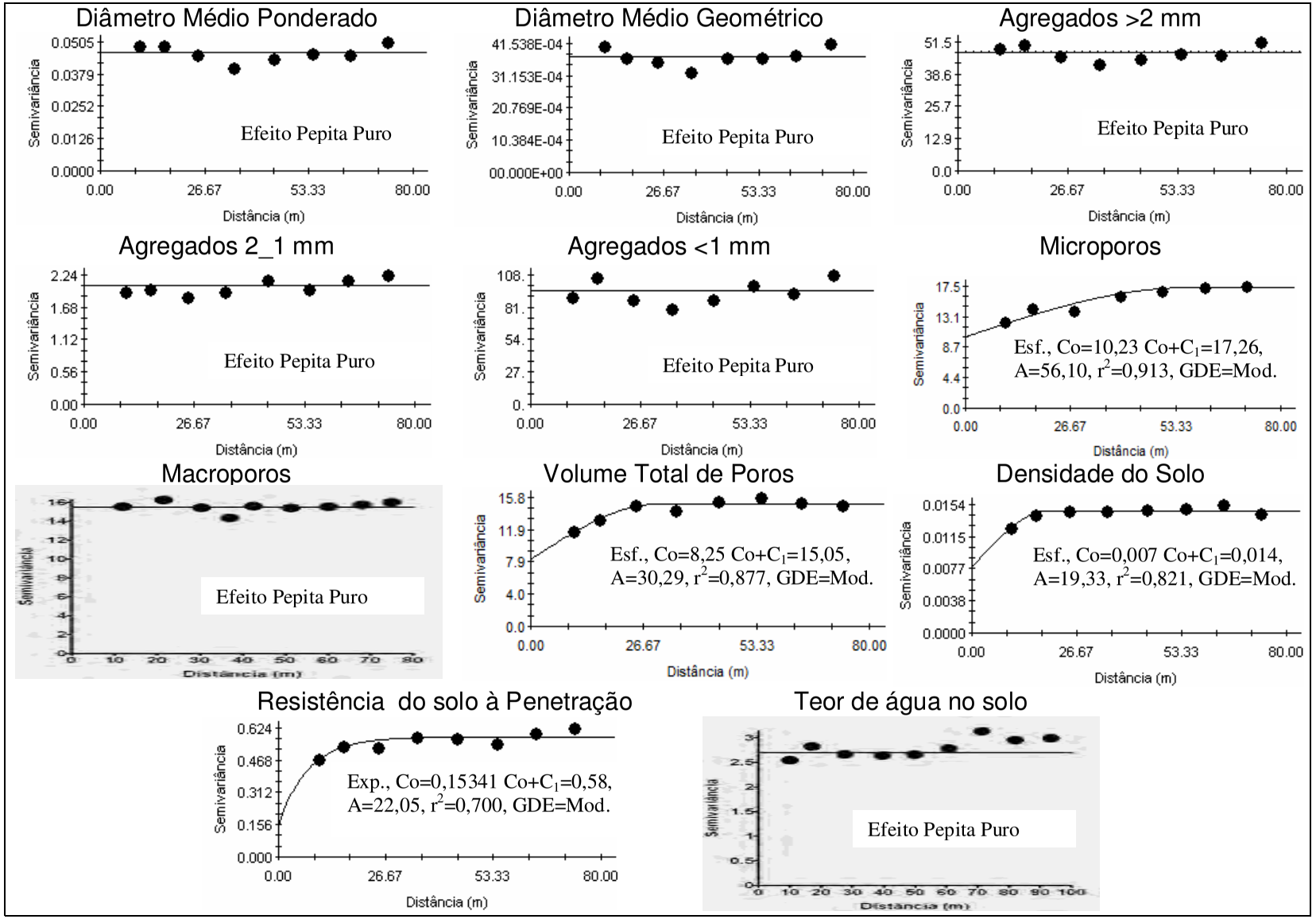

Figura 4. Semivariogramas dos atributos estudados da área côncava na profundidade de 0,0-0,20 m. Exp.=Exponencial; Esf.=Esférico; Co= Efeito pepita; C_1= Patamar; a= Alcance (m); r^2= Coeficiente de determinação.

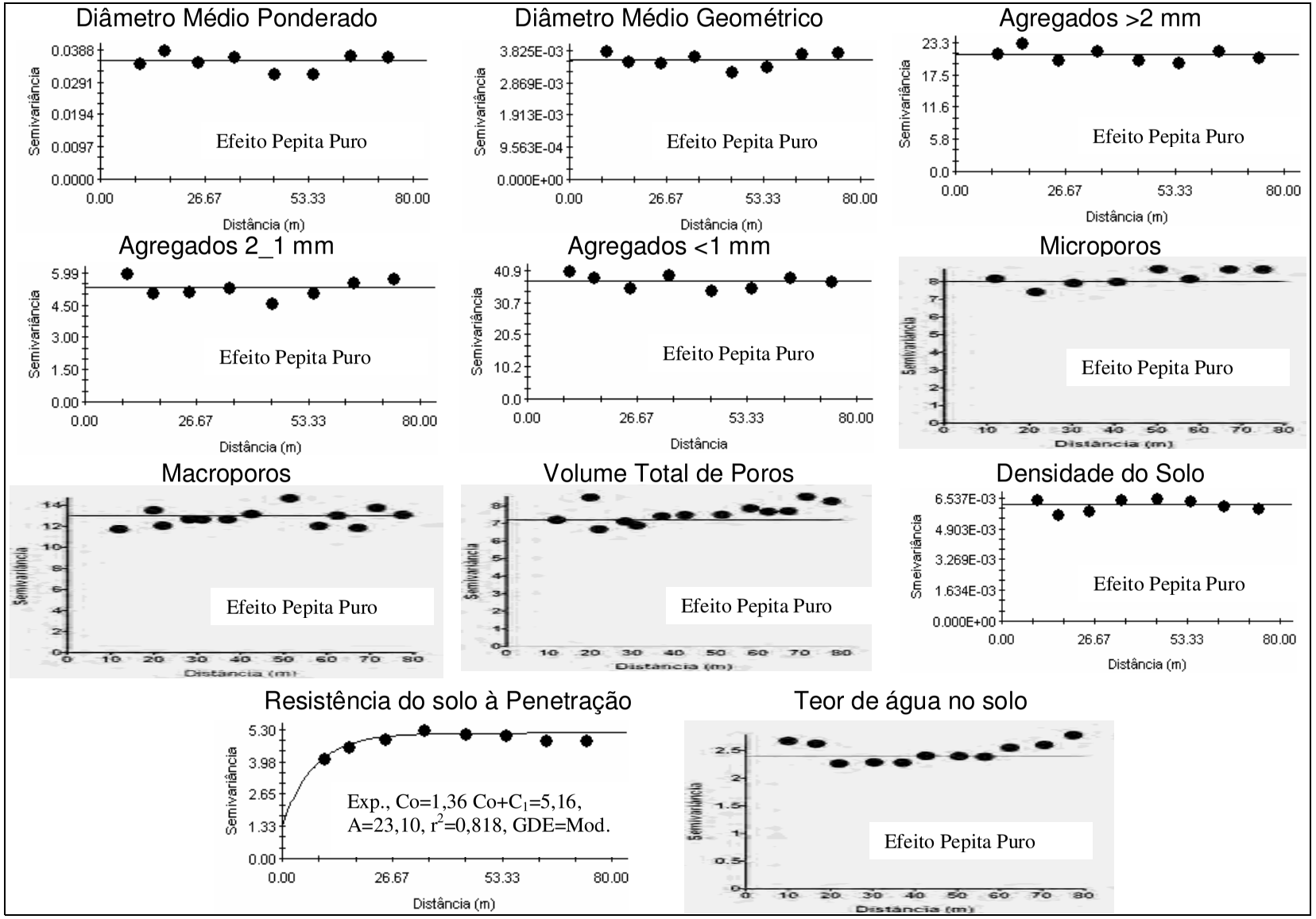

Figura 5. Semivariogramas dos atributos estudados da área côncava na profundidade 0,2-0,4 m . Exp.=Exponencial; Co= Efeito pepita; C_1= Patamar; a= Alcance (m); r^2= Coeficiente de determinação.

Os atributos macroporos na profundidade de 0,0-0,2 m, macroporos, microporos, VTP e teor de água no solo na profundidade de 0,2-0,4 m da área côncava apresentaram um aumento da variância sem encontrar um patamar. Os semivariogramas resultantes da retirada de tendência revelaram que esses atributos não possuem dependência espacial, apresentando efeito pepita puro (EPP) (Figuras 4 e 5).

O EPP foi observado também para os seguintes atributos: DMG, agregados entre 2-1 mm, na profundidade de 0,0-0,2 m, DMG, agregados entre 2-1 mm, agregados >1 mm, macroporos na profundidade 0,2-0,4 m da área convexa, e DMP, DMG, agregados >2 mm, agregados entre 2-1 mm agregados >1 mm na profundidade de 0,00-0,20 m, DMP, DMG, agregados > 2mm, agregados entre 2-1 mm, agregados <1 mm, Ds e teor de água no solo na profundidade de 0,2-0,4 da área côncava (Figuras 2, 3, 4 e 5). Para esses atributos identifica-se uma distribuição espacial aleatória e neste caso a única estatística aplicável é a estatística clássica sendo o valor da estimativa da média, representativo na área (VIEIRA, 2000).

Observa-se que a dependência espacial dos atributos ocorreu majoritariamente na área convexa (Figuras 2 e 3) em relação a área côncava, que apresenta um maior número de atributos com efeito pepita puro (Figuras 4 e 5). Os valores de alcance dos atributos da área convexa apresentaram-se maiores que os da área côncava, exceto para o atributo microporos. SOUZA et al. (2004a) encontrou, para latossolos, alcances de DMG, agregados >2 mm e agregados entre 2-1 mm maiores que os do presente estudo. Isto reflete a maior heterogeneidade dos argissolos que ocupam tipicamente posições menos estáveis na paisagem (MILLER & MEHLICH, 1960).

Neste sentido a área côncava apresenta uma maior descontinuidade da distribuição dos atributos físicos, conseqüentemente maior variabilidade espacial desses atributos. MONTANARI et al. (2005) estudando atributos químicos em um Latossolo encontrou maior variabilidade espacial em áreas côncavas. SOUZA et al. (2003) também encontrou maior variabilidade espacial de atributos granulométricos em áreas côncavas.

Comparando-se os resultados entre as profundidades estudadas, observou-se que ocorre um maior número de atributos apresentando EPP na profundidade de 0,2-0,4 m para ambas áreas (Figuras 2, 3, 4 e 5). Menores valores de alcance foram observados na camada superficial (0,0-0,2 m), com exceção dos atributos agregados >2 mm e microporos na área convexa e RP na área côncava. GREGO & VIEIRA (2005) e BERNER et al. (2007) também encontraram dependência espacial de atributos físicos predominantemente na camada superior do solo, e atribuíram esses resultados ao preparo do solo que no sistema convencional favorece maior semelhança para pontos próximos entre si, do que os mais distantes.

A avaliação do número necessário de amostras (NNA), para estimar a média dos atributos encontra-se na Tabela 4.

Tabela 4. Número mínimo de amostras para estimar os valores médios do diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), porcentagem dos agregados >2mm (>2 mm), porcentagem dos agregados 2-1 mm (2-1 mm), porcentagem dos agregados <1 mm (<1mm), microporos (micro), macroporos (macro), volume total de poros (VTP), densidade do solo (Ds), resistência do solo à penetração (RP) e teor de água no solo (TAS) nas profundidades 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m das áreas convexas e côncavas.

	Área	Número de amostras	Área	Número de amostras
	0,0-0,2 m		0,2-0,4 m	
DMP (mm)	Convexa	60	Convexa	52
	Côncava	128	Côncava	91
DMG (mm)	Convexa	7	Convexa	6
	Côncava	12	Côncava	7
>2mm (%)	Convexa	171	Convexa	217
	Côncava	228	Côncava	281
2-1 mm(%)	Convexa	148	Convexa	148
	Côncava	103	Côncava	233
<1 mm (%)	Convexa	7	Convexa	6
	Côncava	6	Côncava	4
Micro (%)	Convexa	9	Convexa	13
	Côncava	15	Côncava	10
Macro (%)	Convexa	39	Convexa	41
	Côncava	42	Côncava	37
VTP (%)	Convexa	3	Convexa	3
	Côncava	5	Côncava	3
Ds (Mg m^{-3})	Convexa	1	Convexa	1
	Côncava	2	Côncava	1
RP (Mpa)	Convexa	45	Convexa	29
	Côncava	39	Côncava	86
TAS (%)	Convexa	3	Convexa	4
	Côncava	7	Côncava	6

Foram determinados números de amostras maiores na área côncava em relação a área convexa, com exceção para os agregados entre 2_1 mm, agregados <1 mm, RP na profundidade 0,0-0,2 m e agregados entre 2_1 mm, microporos, macroporos na profundidade 0,2-0,4 m. O NNA para VTP e Ds na profundidade 0,2-0,4 m foram os mesmos para ambas curvaturas. Esses resultados corroboram informações da análise geoestatística e confirmam a relação de dependência dos atributos físicos nas curvaturas do relevo.

Essas informações podem subsidiar a tomada de decisões referentes ao planejamento de amostragem do solo além de indicarem a existência da variabilidade de atributos físicos dentro da mesma classe de solo e com o mesmo histórico de manejo. Assim o uso das curvaturas do relevo pode ser útil na delimitação, no campo, de áreas de manejo semelhantes, e na otimização amostral, atendendo a necessidade da determinação do número de amostras e espaçamento entre elas, preocupação esta constante na ciência do solo (WEBSTER & OLIVER, 1990).

3.4 Conclusões

1. A área convexa apresenta os maiores valores do diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico, agregados >2 mm, agregados 2-1 mm, volume total de poros, e teor de água no solo e os menores valores de densidade do solo e resistência a penetração nas duas profundidades estudadas em relação a área côncava.

2. A área côncava apresentou um expressivo número de atributos do solo com maior variabilidade espacial.

3. Na área côncava há a necessidade de maior número de amostras para estimar o valor médio dos atributos físicos.

3.5 Referências

ARCA, M. N.; WEED, S.B. Soil agrgregation and porosity in relation to contents of free iron oxide and clay. Soil Science, Baltimore,v. 109 p. 282-288, 1966.

AZEVEDO, A. C.; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. Ciência Rural, Santa Maria, v. 34, p. 609-617, 2004.

ARAÚJO, E. A.; LANI, J. L.; AMARAL, E. F.; GUERRA, A. Uso da terra e propriedades físicas e químicas de Argissolo amarelo distrófico na amazônia ocidental. Revista Brasiliera de Ciência do. Solo, Viçosa, v. 28, p. 307-315,2004.

BARBIERI, D. M. Formas do relevo e variabilidade espacial de atributos químicos e mineralógicos de um argissolo cultivado com cana-de-açúcar. 2007. 83 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal 2007.

BERNER, P. G. M.; VIEIRA, S. R.; LIMA, E.; ANJOS, L. H. C. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. Revista Brasiliera de Ciência do. Solo, Viçosa, v. 31 p. 837-844, 2007.

BOCKHEIM, J. G.; GENNADIYEV, A. N.; HAMMER, R. D.; TANDARICH, J. P. Historical development of key concepts in pedology. Geoderma, Amsterdam, v. 124, p. 23-36, 2005.

BRITO, L. F.; SOUZA, Z. M.; MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAZETTA, D. A.; CALZAVARA, S. A.; OLIVEIRA, L. Influência de formas do relevo em atributos físicos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. Ciência Rural, Santa Maria, v. 36, p. 1749-1755, 2006.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo.I-

Mineralogia da fração argila. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 32, p. 2269-2277, 2008.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; ANDREWS, S. S.; KARLEN, D.L. Watershed-scale assessment of soil quality in the loess hills of southwest Iowa. Soil & Tillage Research, Amsterdam, v. 78, p. 237-247, 2004.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 58 p. 1501-1508, 1994.

CAMPOS, M. C. C.; CARDOZO, N. P.; MARQUES JÚNIOR. J. Modelos de Paisagem e sua Utilização em Levantamentos Pedológicos. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 6, p. 104-114, 2006.

CLINE, M.G. Principles of soil sampling. Soil Science, Baltimore, v. 58 p. 275-288, 1944.

DAVIS, J.C. Statistics and data analysis in geology. New York, John Wiley, 1973. 550p.

DEXTER, A.R. Mechanics of root growth. Plant and Soil, The Hague, v. 98, p. 303-312, 1987.

EHLERS, W.; KOPKE, U.; HESSE, F.; BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. Soil & Tillage Research, Amsterdam, v. 3, p. 261– 275, 1983.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. p. 306.

FALLEIRO, R. M.; SOUZA, C. M.; SILVA, C. S. W.; SEDIYAMA, C. S.; SILVA, A. A.; FAGUNDES, J. L. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 27 p. 1097-1104, 2003.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density,aggregate size, and soil water suction on oxygen difusion, redox potentials, and elongation of corn roots. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 32, p. 180-186, 1968.

GREGO, C. R.; VIERA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 29 p.169-177, 1995.

GUISARDI, M. Variabilidade espacial da granulometria de argissolos em diferentes pedoformas em Catanduva-SP. 2003.79f. Trabalho de Graduação – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. Escala - 1:1.000.000. São Paulo. IPT, 1981, v.1, 94p.

JENNY, H. Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology/by Hans Jenny. McGraw-Hill, New York, 1941.

JONES, C. A. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 47, p. 1208–1211, 1983.

JUHÁSZ, C. E. P.; CURSI, P. R.; COOPER, M.; OLIVEIRA T.C.; RODRIGUES. R. R. Dinâmica físico-hídrica de uma toposseqüência de solos sob savana florestada (cerradão) em Assis, SP. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 30 p. 401-412, 2004.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; WHITE, J. L.; ENSMINGER, L. E.; CLARK, F. E., eds. Methods of soil analysis – Physical ad mineralogical properties, including statistics of measurement d sampling. American Society of Agronomy, 1965, p. 499-510.

LAMPURLANÉS, J.; CANTERO-MARTÍNEZ, C. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. Agronomy Jounal, Madison, v. 95, p. 526–536, 2003.

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF , S.; LEÃO T. P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 30 p. 217-223, 2006.

LIMA, H. V.; SILVA, A. P.; ROMERO, R. E.; JACOMINE, P. K. T. Comportamento físico de um argissolo acinzentado coeso no estado do ceará, Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 29, p. 33-40, 2005.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 30 p.163-170, 2006.

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semivariograms of soil properties and fitting them to sample estimates. Journal of Soil Science, Oxford, v. 37, p. 617-637, 1986.

MELLO, C. R., GOMES, N. M., SILVA, A, M., JUNQUEIRA JUNIOR, J. A. Modelagem de atributos físico-hídricos do solo numa bacia hidrográfica da região do alto Rio Grande, MG. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 31 p. 845-852, 2007.

MILLER, F. T.; MEHLICH, A. Charge characterization as a criterion for classification of some equatorial soils. Trans. 7th Int. Congress on Soil Sci., v: 432-442, 1960.

MINITAB: Release. Making Data analysis Easler: version 13.1, 2000.

MONTANARI, R.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. Pesquisa, Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 40, p.69-77, 2005.

PENNOCK, D.; WALLEY, F.; SOLOHUB, M.; SI, B.; HNATOWICH, G. Topographically Controlled Yield Response of Canola to Nitrogen Fertilizer. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 65, p. 1838-1845, 2001.

RAZAEI, S. A.; GILKES, R. J. The effects of landscape attributes and plant community on soil physical properties in rangelands. Geoderma, Amsterdam, v. 125, p. 145-154, 2005.

REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. Geoderma, Amsterdam, v. 110, p. 131-146, 2002.

ROBERTSON, G. P. GS^+: Geostatistics for the environmental sciences – GS^+ user's guide. Plainwell, Gamma Design Soffware, 1998. 152 p.

SANCHEZ, R. B. Agricultura de Precisão em Argissolos com variação nas formas de relevo sob o cultivo de cana-de-açúcar. 2007.101 f. Tese (Doutorado em produção vegetal)- Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007.

SEIBERT, J.; STENDAHL, J.; SØRENSEN R. Topographical influences on soil properties in boreal forests. Geoderma, Amsterdam, v.14, p.139- 148, 2007.

SILVA, A. P. da.; LIBARDI, P.L.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da resistência à penetração de um latossolo vermelho-escuro ao longo de uma transeção. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa,v. 13, p.1-5, 1989.

SOARES, J. L. N.; ESPINDOLA C. R; PEREIRA W. L. M. Physical properties of soils under intensive agricultural management. Scientia Agricola, Piracicaba, v. 62 p. 165-172, 2005.

SOUZA, C.K.; MARQUES JUNIOR, J.; MARTINS FILHO, M.V., PERREIRA, G.T.; Influência do relevo na variação anisotrópica dos atributos químicos e granulométricos de um Latossolo em Jaboticabal –SP. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 23 p. 486-495, 2003.

SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial e atributos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo. 2004. 141 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Apresentada na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2004.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 39, p. 491-499, 2004a.

SOUZA, Z .M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T; MOREIRA, L. F. Influência da pedoforma na variabilidade espacial de alguns atributos físicos e hídricos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. Irriga, Botucatu, v. 9, p.1-11 ,2004b

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 15, p. 229-235, 1991.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER JUNIOR, J. J. Soil strength-root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials. Soil Science, Baltimore, v. 102, p. 18-22, 1966.

TERRA, J. A.; SHAW, J. N.; VAN SANTEN, E. Soil Management and Landscape Variability Affects Field-Scale Cotton Productivity. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 70, p.98–107, 2005.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M., Organic matter and water-stable aggregation insoils. Journal of Soil Science, Oxford, v. 33 p. 141-163, 1982.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. American Journal Science, v. 263, p. 616-627, 1965.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A.H. Soil density and root penetration. Soil Science, Baltimore, v. 65, p. 487- 493, 1948.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V.; V. H.; SCHAEFER, G. R., (Ed.) Tópicos em ciência do solo, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v. 1, p. 1-54.

VIEIRA, S.R.; DE MARIA, I.C.; LOMBARDI NETO, F.; DECHEN, S.C.F.; CASTRO, O.M. Caracterização da variabilidade espacial de propriedades físicas. In: LOMBARDI NETO, F.; CAMARGO, O.A. (Eds). Microbacia do Córrego São Joaquim (Município de Pirassununga, SP). Campinas, Instituto Agronômico, 1992. p.41-51. (Documento IAC, 29)

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. Hilgardia, Berkeley, v.51, p.1-75, 1983.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, v.4, p.242-246,1966.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). Applications of soil physics. New York: Academic Press, 1980. cap. 2, p. 319-344.

WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford: Oxford University Press, 1990. 316p.

ZANETTE, S. V.; SAMPAIO, S. C.; SILVESTRE, M. G.; BOAS, M. A. V.; URIBE-OPAZO, M. A., QUEIROZ, M. M. F. Análise espacial da umidade do solo cultivado com soja sob dois sistemas de manejo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande , v. 11, p. 239-247, 2007.

CAPÍTULO 4 – MINERALÓGIA DA FRAÇÃO ARGILA E ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM ARGISSOLO EM CURVATURAS DE RELEVO

Resumo- A influência da mineralogia da fração argila nos atributos físicos do solo é reportada na literatura, porém as relações espaciais entre esses atributos são escassas em se tratando de argissolos. Objetivo do presente trabalho foi avaliar a correlação espacial entre os minerais da fração argila e atributos físicos de um argissolo de origem arenítica. Os atributos mineralógicos diâmetro médio do cristal (DMC), largura a meia altura (LMA) dos minerais hematita, goethita, caulinita e gibbsita, teores, substituição isomórfica (SI), área de superfície específica (ASE) dos minerais hematita e goethita, razão goethita/(goethita+hematita) e razão caulinita/(caulinita+gibbsita) foram correlacionados com os atributos físicos diâmetro médio ponderado (DMG), diâmetro médio geométrico (DMG), agregados maiores que 2 mm (>2 mm), agregados entre 2 e 1 mm (2-1 mm), agregados menores que 1 mm (<1 mm), microporos, macroporos, volume total de poros (VTP), densidade do solo (Ds) e resistência do solo à penetração (RP) por meio da correlação simples de Pearson e dos semivariogramas cruzados entre esses atributos. As relações encontradas entre a substituição isomórfica da goethita e os atributos físicos do solo permitiram inferir sobre o efeito da cristalinidade deste mineral nos atributos físicos do solo. Goethitas com altos valores de substituição isomórfica favoreceram a dimensão dos agregados, porosidade,e o contrário ocorreu com a Ds e RP. Gibbsitas de maior grau de cristalinidade favoreceram os maiores valores de Ds e RP.

Palavras-chave: agregados, cristalinidade dos minerais, densidade, porosidade, resistência do solo à penetração, semivariograma cruzado.

4.1. Introdução

A interação entre os atributos da mineralogia da fração argila e aqueles relativos à física do solo é reportada historicamente pela literatura por diversos autores. No princípio desses estudos foi reconhecido efeito positivo do teor e cristalinidade dos minerais hematita e goethita da fração argila nos atributos físicos do solo como a estabilidade dos agregados (LUTZ, 1936; KROTH & PAGE, 1946; CHESTERS et al.,1957; SCHAHABI & SCHWERTMANN, 1970, BLACKEMORE, 1973, SCHWERTMANN & KÄMPF,1985). BARBERIS et al. (1991) encontraram correlação positiva entre óxidos de ferro e estabilidade dos agregados. Entretanto, estes autores reforçam que o processo de agregação do solo não é afetado pelo tipo de óxido de ferro e sim pela cristalinidade dos mesmos.

A correlação positiva entre goethitas de pior cristalinidade com a estabilidade do agregado, é atribuída à maior área de superfície específica desse mineral (CORNELL, 1973). Essa característica proporciona um aumento no número de grupos hidroxilas disponível nas goethitas para interação com os demais compostos que favorecem a estabilidade dos agregados.

As variáveis mineralógicas avaliadas por INDA JÚNIOR et al. (2007) bem como as proporções de goethita e de gibbsita na fração argila, foram determinantes para a manutenção da estabilidade dos complexos organo-minerais desses solos. Os minerais caulinita e gibbsita também se correlacionam com atributos físicos como a densidade e permeabilidade do solo (FERREIRA et al., 1999; PEDROTTI et al., 2003).

Porém, os estudos anteriores citados, foram realizados majoritariamente em solos com alto teor de ferro como os latossolos, revelando a necessidade de estudos em solos com baixos teores deste elemento. Além disso, todos estes estudos foram realizados utilizando técnicas estatísticas clássicas, como correlações simples ou associações.

A avaliação da correlação entre atributos por meio do semivariograma cruzado vem sendo usada em diversos estudos. VAUCLIN et al. (1983) que avaliaram a relação entre o conteúdo de água e a textura do solo. SCHAFFRATH et al. (2008) avaliaram a correlação espacial entre atributos físicos do solo. CAMARGO et al. (2008) utilizaram

semivariogramas cruzados para avaliar a correlação espacial entre a cristalinidade dos minerais da fração argila e a estabilidade e dimensão dos agregados.

Objetivo do presente trabalho foi avaliar a correlação espacial entre os minerais da fração argila e atributos físicos de um argissolo de origem arenítica.

4.2. Material e Métodos

A área de estudo está localizada na Fazenda Boa Vista, pertencente à Usina São Domingos Açúcar e Álcool S/A no município de Catanduva – SP, cujas coordenadas geográficas são: Latitude 21º05'57,11"S e Longitude 49º01'02,08" W. O clima da região foi classificado pelo método de Köppen, como tropical quente úmido, tipo Aw, seco no inverno, com precipitação média de 1.350 mm, temperatura média anual de 23^{o}C, com temperatura no mês mais quente superior a 22 ^{o}C e a do mês mais frio inferior a 18 ^{o}C, e umidade relativa do ar de 74%. A vegetação primária da região de Catanduva foi classificada como floresta pluvial estacional e cerrado, sendo o uso atual principalmente cana-de-açúcar, a mais de 20 anos em sistema de colheita pós-queimada.

A área foi caracterizada utilizando fotos aéreas da região na escala 1:35.000, perfil altimétrico, e no campo classificação geomorfológica e pedológica. O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico textura média/argilosa de acordo com os critérios de EMBRAPA (2006). Para a identificação das formas do terreno conforme a classificação de TROEH (1965), juntamente com as atividades de campo, foi elaborado um modelo digital de elevação (MDE) (Figura 1), onde pode-se observar duas áreas: uma caracterizada pela forma convexa e a outra pela forma côncava. A área convexa possui valores para teor de argila, matéria orgânica, ferro total e espessura do horizonte A+E de 230 g kg^{-1}, 15 g dm^{-3}, 4% e 30 cm, respectivamente, e a área côncava possui valores de 189 g Kg^{-1}, 13 g dm^{-3}, 2% e 39 cm, respectivamente, para os mesmos atributos (BARBIERI, 2007, GUISARDI 2003 e SANCHEZ, 2007).

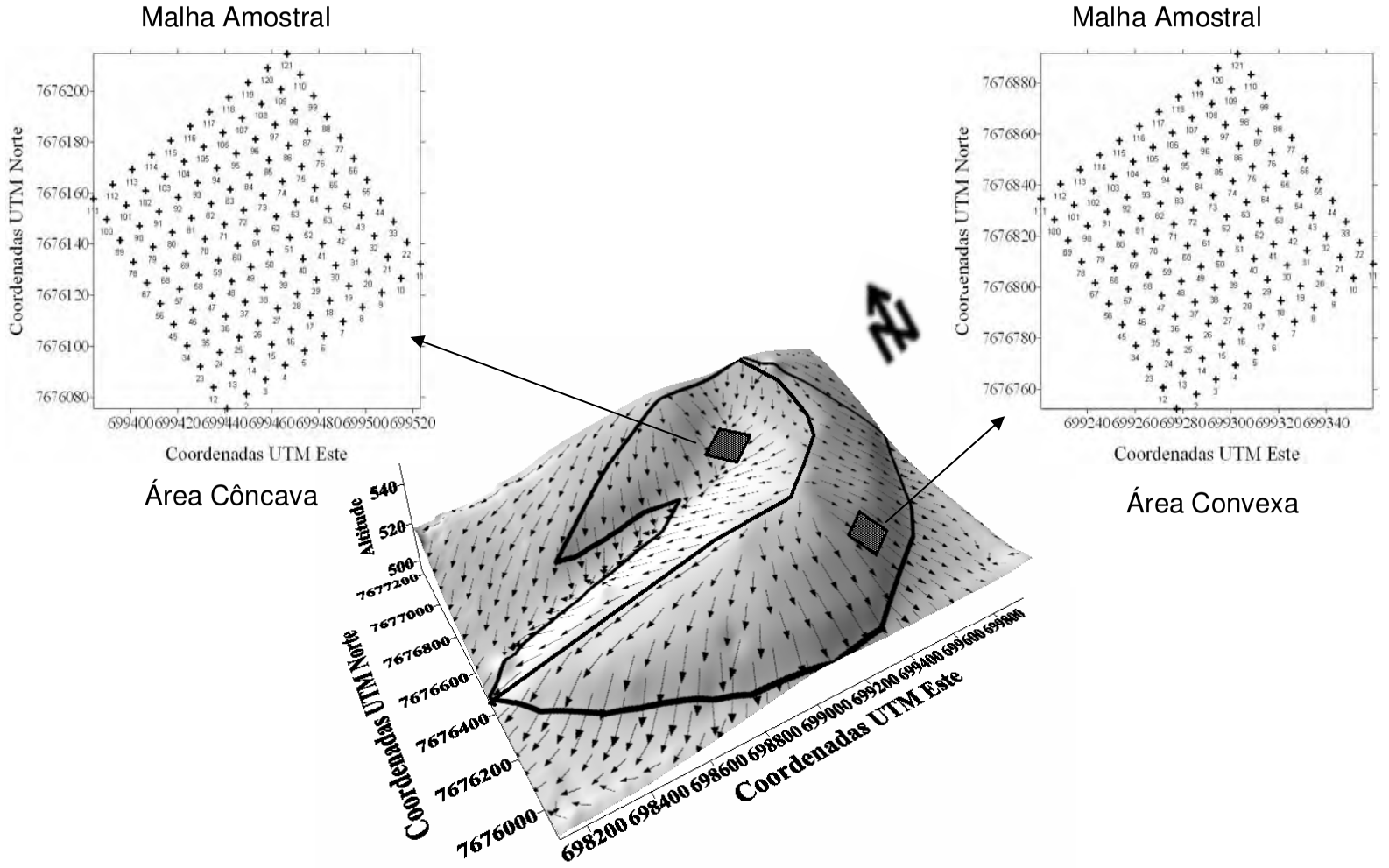

Figura 1. Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo e local da coleta das amostras (+). Setas na figura central representam o fluxo de água superficial.

Uma malha com dimensão de 100 x 100 m foi delimitada em cada uma das áreas. As malhas possuem espaçamento regular de 10 x 10 m e os pontos de cruzamento deste espaçamento determinaram os pontos de coleta das amostras, num total de 121 pontos amostrais georreferenciados em cada malha. Foram coletadas as amostras na Profundidade de 0,0-0,2 m para a análise mineralógica e trincheiras de 0,50 m de profundidade e (0,3 x 0,3 m de largura) foram abertas em cada ponto de coleta das amostras para coleta de amostras indeformadas em anéis volumétricos e solo para os demais atributos físicos na mesma profundidade.

Determinação dos minerais da fração argila e atributos físicos do solo

Para a determinação dos minerais da fração argila, as amostras de solo foram tratadas com NaOH 0,5 N e submetidas à agitação mecânica por 10 minutos para a dispersão das partículas. Após esse tratamento prévio, a fração areia foi retirada em peneira de 0,05 mm. A separação da fração silte e areia ocorreu por centrifugação (1.600 rpm) e o tempo da operação foi determinado pela temperatura das amostras no momento da análise. A suspensão de argila foi floculada com HCl concentrado e centrifugada (2.000 rpm, por 2 minutos).

Posteriormente realizou-se a eliminação dos óxidos de ferro da fração argila utilizando o método ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), segundo MEHRA & JACKSON (1960). A caracterização da goethita (Gt) e da hematita (Hm), foi feita após tratamento da fração argila com NaOH 5 mol L^{-1} (1g argila/100 ml solução), para a concentração dos mesmos, segundo método de NORRISH & TAYLOR (1961) modificado por KÄMPF & SCHWERTMANN (1982).

A difração de raios X foi realizada com as amostras preparadas pelo método do pó, em aparelho HGZ equipado com cátodo de cobalto e filtro de ferro e radiação Kα (20 mA, 30 kV) para a difração da Hm e Gt e e cátodo de cobre com filtro de níquel para a difração da Ct e Gb. A velocidade de varredura empregada foi de 1º2θ/minuto e amplitude de 23 a 49°. Foram utilizados para avaliação mineralógica os reflexos da caulinita (001), gibbsita (002), hematita (012 e 110) e da goethita (110 e 111).

O diâmetro médio do cristal (DMC) da Ct e Gb foi calculado a partir da largura à meia altura (LMA) e da posição dos reflexos dos minerais Ct (001) e Gb (002), e o DMC da Hm e Gt foi calculado a partir da LMA e da posição dos reflexos dos minerais Hm (110) e Gt (110). Foi utilizada a equação de Scherrer (SCHULZE, 1984). No cálculo do teor de substituição isomórfica do ferro pelo alumínio na goethita utilizaram-se os procedimentos sugeridos por SCHULZE (1984)

A razão Caulinita/(Caulinita+Gibbsita) – [Ct/(Ct+Gb)], foi calculada empregando-se as áreas dos reflexos Ct (001) e Gb (002). A razão Gt/(Gt+Hm) foi obtida após o cálculo das áreas dos reflexos da hematita (012) e goethita (110) nos reflexos dos difratogramas, e nesse caso foi multiplicada a área do pico da goethita (110) pelo valor 0,35, devido a intensidade de 35% da hematita (012) (KÄMPF & SCHWERTMANN, 1998).

Para a obtenção do teor de goethita (%Gt), multiplicou-se por 1,59 o produto entre a razão goethita/(goethita+hematita) e o teor de ferro ditionito ($\%Fe_d$). A área de superfície específica da goethita e Hm [ASE(Gt) e ASE Hm)] foram estimada em $m^2\ g^{-1}$ conforme SCHULZE & SCHWERTMANN (1984) e SCHWERTMANN & KÄMPF (1985).

Na determinação dos atributos físicos as amostras coletadas foram destorroadas, secas à sombra e parte do solo foi peneirado em peneira de 9,51 mm de diâmetro de malha para as análises relativas à agregação, e a outra parte peneirada na peneira de 2,0 mm. A separação e estabilidade dos agregados foram determinadas pelo método descrito por KEMPER & CHEPIL (1965). Para determinação da porosidade do solo (porosidade total, macroporos e microporos), as amostras indeformadas foram saturadas por 48 h em bandeja com água até dois terços da altura do anel. Após o período de saturação, as amostras foram drenadas no potencial equivalente a -0,006 MPa utilizando-se uma mesa de tensão (EMBRAPA, 1997). Nas mesmas amostras a densidade do solo foi determinada por meio do método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997). A resistência do solo à penetração foi determinada, em cada ponto da malha, utilizando um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar, a qual foi calculada, conforme STOLF (1991).

Maiores detalhes da metodologia adotada para a determinação dos minerais da fração argila e dos atributos físicos do solo estão nos capítulos 2 e 3 respectivamente.

Análise dos dados

Os dados foram submetidos à estatística descritiva calculando-se a média, mediana, variância, desvio padrão, assimetria, curtose, máximo, mínimo, coeficiente de variação, tipo de distribuição e o coeficiente de correlação. Estas análises foram realizadas com o uso do programa estatístico Minitab (MINITAB, 2000).

Para a caracterização do padrão da variabilidade espacial, utilizou-se a análise geoestatística (VIEIRA, 2000). Foram construídos semivariogramas com base no cálculo da semivariância γ (h) por meio da seguinte equação:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

em que, $\hat{\gamma}(h)$ é a semivariância estimada a partir dos dados experimentais; Z são os valores medidos nos pontos xi e xi+h; N(h) é o número de pares de valores medidos separados por uma distância h.

No sentido de averiguar a correlação entre os atributos em estudo os coeficientes de correlação simples (Pearson) foram calculados e apara avaliação da correlação espacial foram construídos semivariogramas cruzados, entre as variáveis que apresentaram dependência espacial, que podem assumir valores tanto positivos indicando que o aumento em um dos atributos é acompanhado pelo aumento do outro, como negativos indicando que quando ocorre o aumento de um dos atributos, ocorre o decréscimo do outro segundo BHATTI et al., (1991). Os modelos foram ajustados por meio do programa GS^+ (ROBERTSON, 1998).

4.3 Resultados e Discussão

Os resultados da análise de correlação simples de "*Pearson"* realizada entre os atributos físicos e os atributos mineralógicos das áreas convexa e côncava estão presentes nas Tabelas 1 e 2.

Correlações positivas (Tabela 1) foram estabelecidas entre a RP e LMA Hm, e macroporos e a razão Ct+(Ct+Gb), enquanto que correlações negativas foram encontradas entre DMG e teor de Gt, macroporos e ASE da Hm, DMG e Fe_d, na área convexa. Na área côncava foram estabelecidas correlações positivas entre microporos e teor de Gt, microporos e teor de Hm, agregados <1 mm e LMA da Ct, e correlações negativas entre macroporos e o teor de Gt, agregados > 2 mm e LMA da Gb, e entre RP e DMC da Gb. Considerando as relações entre os atributos dos óxidos de ferro e os atributos físicos, estes resultados podem ser justificados pelos baixos teores de ferro total das áreas estudadas, o que é comum em argissolos da região desenvolvidos de arenito. Portanto, possivelmente neste solo, outros fatores que condicionam os atributos físicos, como por exemplo a matéria orgânica e outros minerais como a gibbsita, possam estar atuando de forma mais eficiente que os óxidos de ferro.

O atributo SI da goethita, no presente trabalho, está favorecendo os agregados de maior tamanho e os macroporos. O contrário ocorreu com os agregados de menor tamanho, microporos, Ds e RP. Segundo NORRISH & TAYLOR, 1961 o aumento da substituição isomórfica do ferro pelo alumínio, na estrutura da goethita, provoca uma contração na cela unitária diminuindo a dimensão deste cristal.

O aumento da superfície especifica, causado pela contração da cela unitária, disponibiliza grupos funcionais que contribuem para a interação entre as partículas (CORNELL & SCHWERTMANN, 1996) promovendo maior estabilidade da agregação das mesmas. Assim, goethitas com altas taxas de substituição isomórfica contribuem para agregação das partículas do solo e, conseqüentemente, para um maior número de macroporos justificando o efeito negativo na densidade do solo e resistência do solo à penetração (Tabela 1). SCHAHABI & SCHWERTMANN (1970), e BLACKEMORE (1973), encontraram relação direta entre goethitas sintéticas de pior cristalização e a

Tabela 1. Coeficiente de correlação calculado entre os atributos dos óxidos de ferro da fração argila e os atributos físicos do solo da área convexa e côncava.

	LMA[1]		DMC[2]		SI[3]		Teor[4]		ASE[5]		Razão[6]	Fe_d
	Gt	Hm	Gt	Hm	Gt	Hm	Gt	Hm	Gt	Hm		
						Área Convexa						
DMP[7]	0,01	-0,04	0,04	0,01	0,24	0,00	-0,16	-0,10	0,01	-0,11	-0,07	-0,13
DMG[8]	0,04	0,01	-0,03	-0,06	0,17	0,00	-0,19*	-0,13	0,04	-0,04	-0,07	-0,19*
> 2 mm[9]	-0,01	-0,05	0,06	0,01	0,26*	0,01	-0,16	-0,09	-0,01	-0,11	-0,08	-0,12
2_1 mm[10]	0,06	0,08	-0,10	-0,11	-0,03	0,05	-0,07	-0,04	0,06	0,08	-0,01	-0,12
<1 mm[11]	-0,02	0,01	-0,01	0,04	-0,21*	-0,03	0,16	0,09	-0,01	0,06	0,07	0,16
Micro[12]	-0,01	0,15	0,04	-0,17	-0,23*	-0,10	0,07	0,12	-0,01	0,06	-0,03	0,18
Macro[13]	0,00	-0,16	0,01	0,16	0,18*	-0,07	0,07	-0,01	0,00	-0,19*	0,10	-0,15
VTP[14]	0,05	-0,14	0,01	0,13	0,08	-0,15	0,15	0,01	0,05	-0,14	0,11	0,15
Ds[15]	-0,17	0,14	0,10	-0,17	-0,20*	0,16	-0,08	0,14	-0,17	0,09	-0,13	0,01
RP[16]	0,14	0,19*	-0,11	-0,13	-0,19*	-0,03	0,08	-0,14	0,14	0,13	0,17	-0,19*
						Área Côncava						
DMP[7]	0,01	-0,02	-0,05	0,04	0,02	0,13	-0,09	-0,02	0,08	0,01	0,07	0,03
DMG[8]	-0,02	-0,05	-0,04	0,05	-0,01	0,15	-0,11	-0,03	0,09	-0,02	0,07	0,03
> 2 mm[9]	0,02	-0,02	-0,06	0,03	0,02	0,13	-0,06	0,01	0,08	0,02	0,07	0,05
2_1 mm[10]	-0,15	-0,06	-0,03	0,05	-0,18	0,25*	0,00	0,09	0,10	-0,15	-0,05	0,11
<1 mm[11]	0,01	0,02	0,06	-0,04	0,01	-0,15	0,06	-0,02	-0,09	0,01	-0,06	-0,06
Micro[12]	-0,03	0,08	-0,07	-0,08	-0,02	0,05	0,28*	0,20*	-0,10	-0,03	0,01	0,03
Macro[13]	0,05	-0,11	0,07	0,12	0,04	-0,08	-0,25*	-0,18	0,10	0,05	0,03	-0,02
VTP[14]	0,11	-0,02	-0,04	0,01	0,06	-0,12	-0,02	-0,04	0,01	0,11	0,01	-0,01
Ds[15]	-0,09	0,02	0,09	-0,01	-0,11	0,08	0,12	0,11	-0,02	-0,09	-0,04	0,04
RP[16]	-0,11	0,03	0,08	-0,01	-0,05	-0,13	0,07	0,05	-0,01	-0,11	-0,03	0,02

[1]Largura a Meia Altura (º2θ); [2]Diâmetro Médio do Cristal (ηm), [3]Substituição Isomórfica (mol%), [4] g kg^{-1}, [5] Área de superfície específica,[6]Razão Gt/(Gt+Hm) [7]Diâmetro médio ponderado (mm), [8]Diâmetro médio geométrico(mm), [9]Agregados >2 mm (%), [10]Agregados entre 2_1 mm (%), [11]Agregados <1 mm (%), [12]Microporos (%), [13]Macroporos (%),[14]Volume total de poros (VTP), [15]Densidade do solo (Mg m^{-3}), [16]Resistência do solo à penetração (MPa). Hm=Hematita, Gt=Goethita, Fe_d= Ferro ditionito (%), * significativo à 5%.

Tabela 2. Coeficiente de correlação calculado entre os atributos dos óxidos de ferro da fração argila e os atributos físicos do solo da área convexa e côncava.

	LMA[1]		DMC[2]		Razão[3]
	Ct	Gb	Ct	Gb	
			Área Convexa		
DMP[4]	0,031	0,077	-0,062	-0,130	0,004
DMG[5]	-0,019	0,150	-0,016	-0,166	-0,058
> 2 mm[6]	0,010	0,069	-0,035	-0,129	-0,001
2_1 mm[7]	-0,003	0,216*	-0,017	-0,154	0,001
<1 mm[8]	-0,008	0,100	0,037	0,175	0,000
Micro[9]	0,105	-0,174	-0,113	0,134	0,203*
Macro[10]	-0,009	0,154	0,015	-0,130	0,230*
VTP[11]	0,043	0,062	-0,060	-0,101	-0,154
Ds[12]	0,056	-0,108	0,081	0,180*	0,131
RP[13]	-0,091	-0,128	0,121	0,166	-0,000
			Área Côncava		
DMP[4]	-0,185	-0,119	0,179	0,146	0,072
DMG[5]	0,152	-0,057	0,143	0,091	0,035
> 2 mm[6]	-0,199*	-0,135	0,193	0,158	0,067
2_1 mm[7]	0,076	0,043	0,034	-0,02	-0,076
<1 mm[8]	0,197*	0,119	-0,185	-0,145	-0,053
Micro[9]	-0,038	-0,031	0,052	-0,008	-0,053
Macro[10]	0,065	-0,058	-0,045	0,080	0,053
VTP[11]	-0,053	-0,149	0,075	0,149	0,012
Ds[12]	-0,079	-0,009	0,031	0,011	0,071
RP[13]	-0,039	0,180	0,036	-0,197*	-0,019

[1]Largura a Meia Altura (º2θ); [2]Diâmetro Médio do Cristal (ηm), [6]Razão Ct/(Ct+Gb) [7]Diâmetro médio ponderado (mm), [8]Diâmetro médio geométrico(mm), [9]Agregados >2 mm (%), [10]Agregados entre 2_1 mm (%), [11]Agregados <1 mm (%), [12]Microporos (%), [13]Macroporos (%),[14]Volume total de poros (VTP), [15]Densidade do solo (Mg m^{-3}), [16]Resistência do solo à penetração (MPa), [17]Umidade (%). Ct=Caulinita, Gb=Gibbsita, * significativo à 5%

estabilidade do agregado. A relação positiva entre os agregados de dimensão entre 1 e mm e a SI da Hm encontrada na área côncava possui as mesmas tendências encontradas para a SI da Gt.

A correlação negativa entre Fe_d com DMG foi significativa. Este resultado já era previsto, devido o Fe_d indicar o conteúdo dos óxidos de ferro mais cristalinos (Tabela 1). Resultados semelhantes foram obtidos por GHIDIN et al. (2006) em um Latossolo Bruno (LBw). A LMA da Gb influenciou positivamente os agregados de dimensão entre 1 e 2 mm, assim como o DMC da Gb influenciou positivamente a densidade do solo. A correlação positiva obtida entre a razão Ct/(Ct+Gb) e microporos, comprova o efeito positivo da Ct nos agregados de menor dimensão e estabilidade concordando com FERREIRA et al.,1999 e VITORINO et al., 2003.

Para analisar a correlação espacial dos atributos, realizou-se semivariogramas cruzados entre os atributos físicos e mineralógicos que apresentaram dependência espacial (Figuras 2, 3, 4 e 5).

Na área convexa foram estabelecidas correlações espaciais positivas entre os atributos agregados <1 mm e razão Gt/(Gt+Hm), agregados <1 mm e o teor de Gt, Ds e LMA da Hm, Ds e SI da Hm, microporos e LMA Hm, RP e ASE da Gt, RP e LMA da Hm, RP e LMA da Gt, VTP e Fe_d, agregados <1 mm e Fe_d, microporos e Fe_d, DMP e teor de Hm, Ds e DMC da Gb, agregados <1 mm e DMC da Gb, microporos e DMC da Gb e negativas entre os atributos DMP e razão Gt/(Gt+Hm), DMP e teor de Gt, Ds e DMC da Hm, macroporos e Si da Hm, microporos e DMC da Hm, RP e DMC da Gt, RP e Fe_d, agregados >2 mm e Fe_d, RP e teor de Gt, e agregados <1 mm e LMA da Gb (Figuras 2, 3 e 4).

Na área côncava foram estabelecidas correlações espaciais positivas entre os atributos microporos e teor de Gt, microporos e razão Gt/(Gt+Hm), RP x DMC da Gt, e correlação negativa entre os atributos Ds e LMA da Gt (Figura 5).

Os demais atributos não apresentaram correlação, pois em algumas relações os semivariogramas apresentaram valores de semivariância em dois quadrantes. Outros atributos apresentaram semivariograma cruzado sem dependência espacial

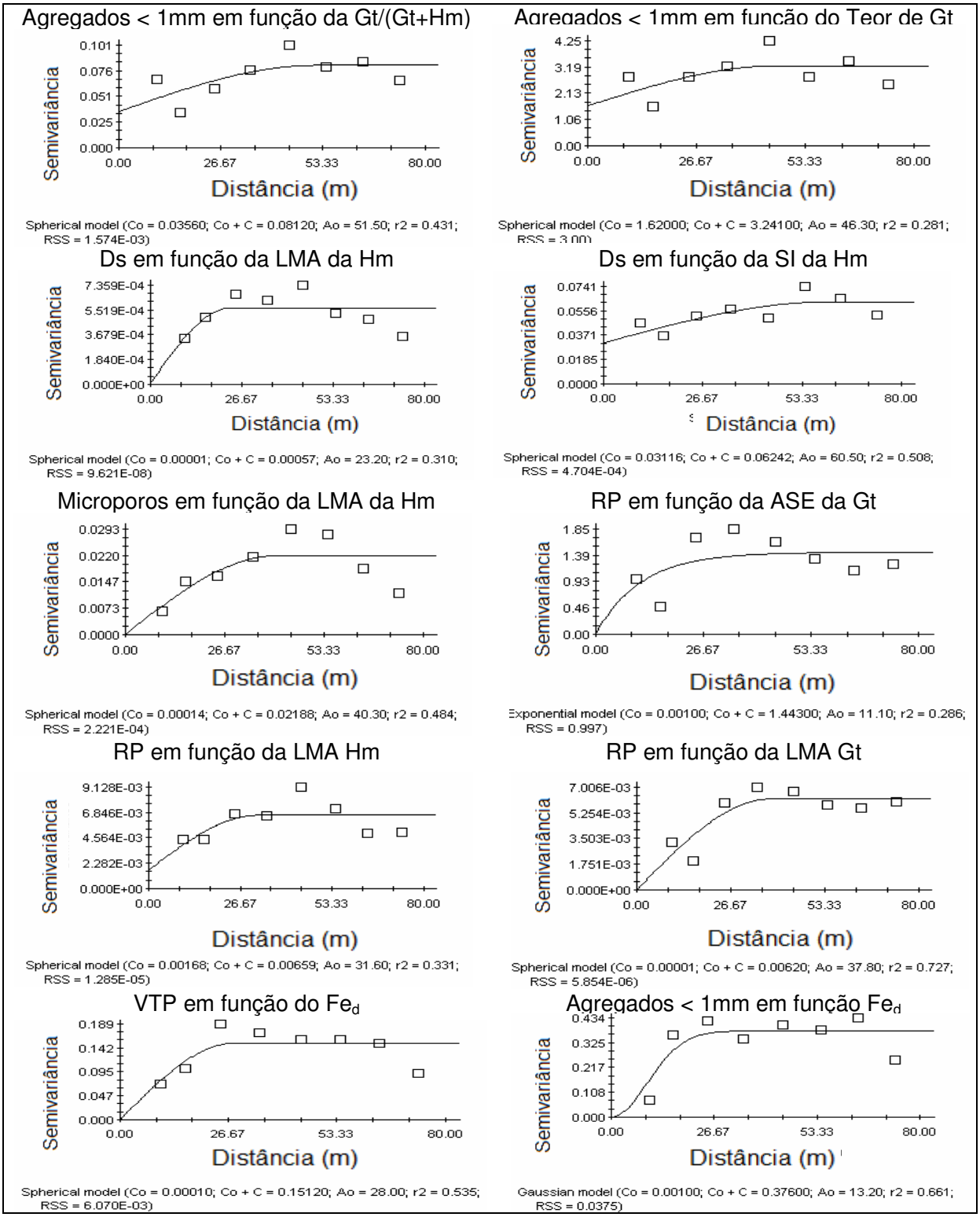

Figura 2. Semivariogramas cruzados da área convexa (correlação espacial positiva).

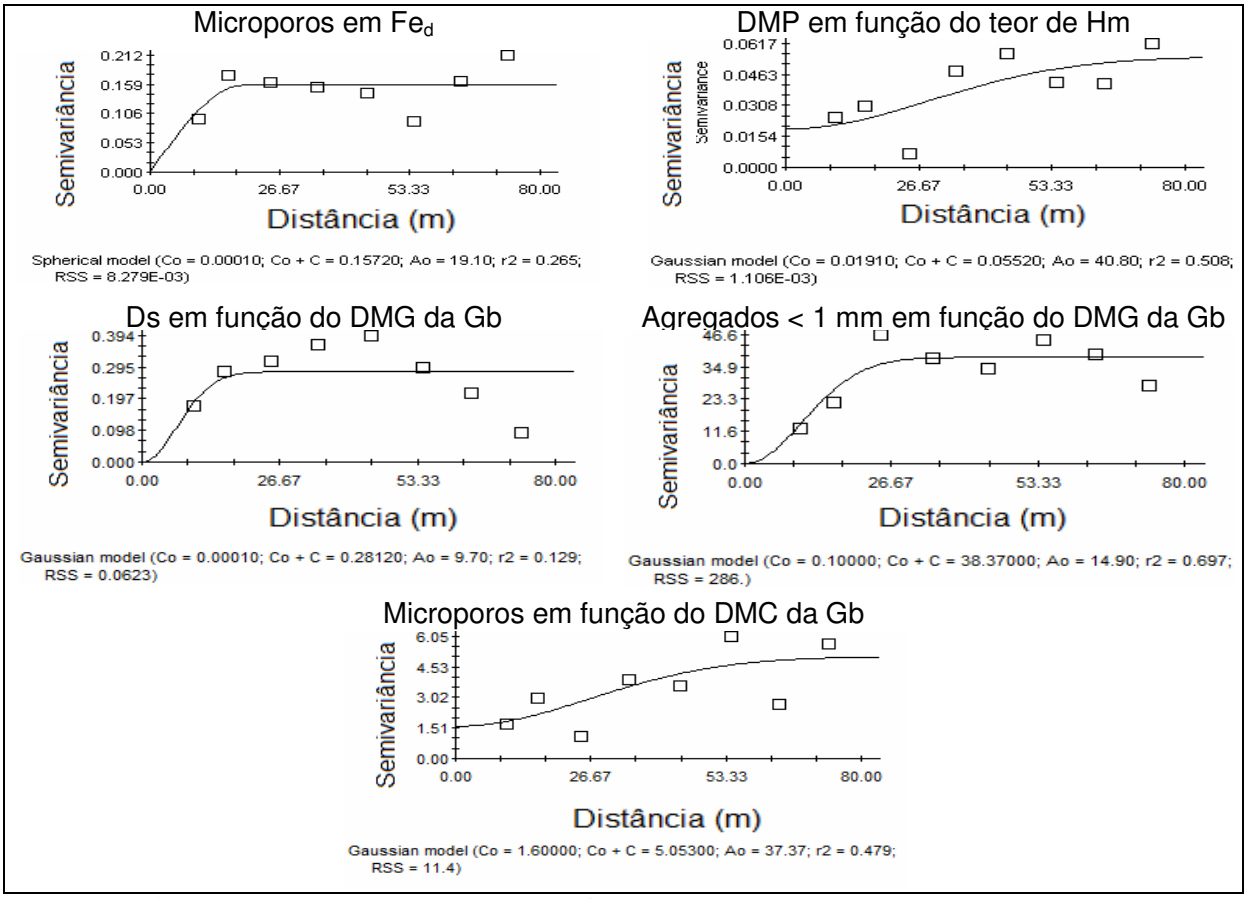

Figura 3. Semivariogramas cruzados da área convexa (correlação espacial positiva).

evidenciando o efeito peita puro dos dados. Estes resultados podem ser atribuídos à baixa correlação espacial entre os atributos.

Os resultados comprovaram a influência negativa dos óxidos de ferro mais cristalinos nos atributos físicos do solo (SCHAHABI & SCHWERTMANN, 1970; BLACKEMORE, 1973), pois o Fe_d se correlacionou positivamente com os agregados < 1 mm e microporos e negativamente com os agregados >2 mm (Figuras 2 e 3).

O DMC da Gb correlacionou-se positivamente com a Ds, agregados < 1 mm e microporos e a LMA da Gb negativamente com os agregados <1 mm (Figuras 3 e 4). PEDROTTI et al. (2003) concluíram que as formas de alumínio amorfas e menos cristalinas associaram-se mais aos atributos físicos, principalmente os relacionados com a agregação das partículas do solo, o que justifica a relação encontrada no

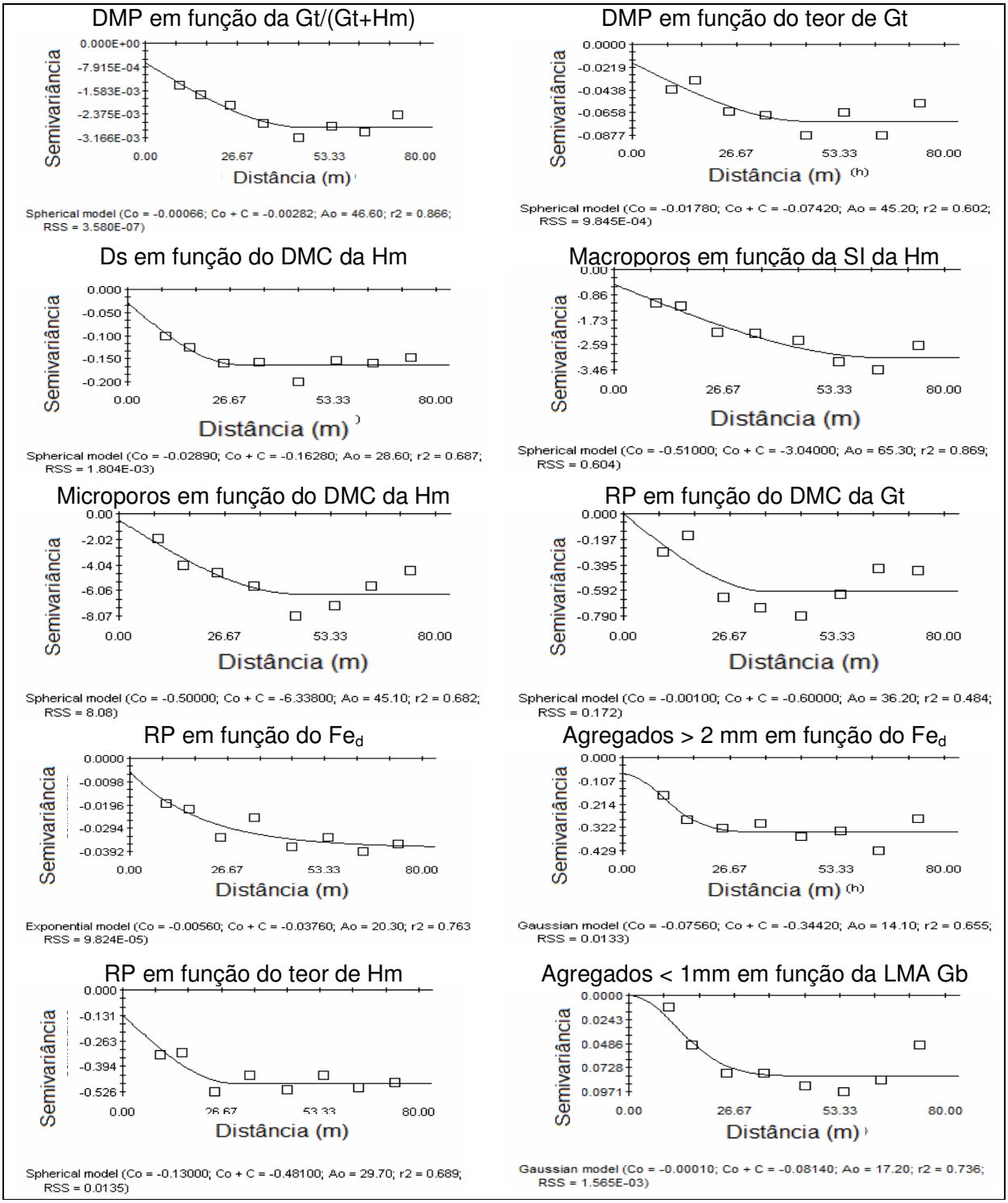

Figura 4. Semivariogramas cruzados da área convexa (correlação espacial negativa).

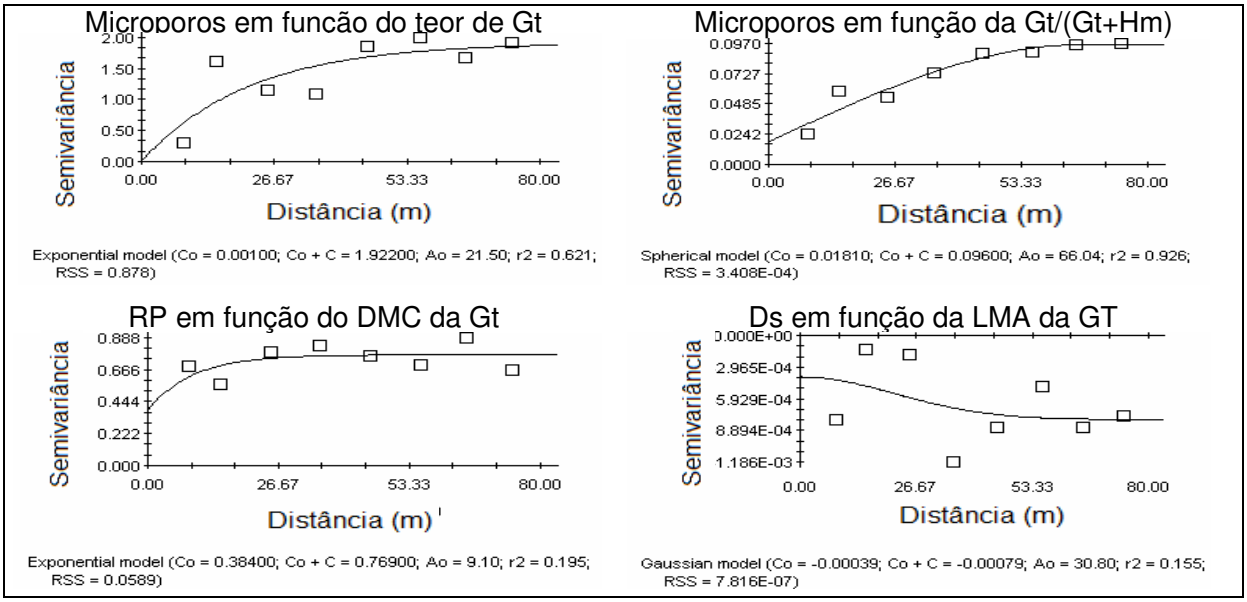

Figura 5. Semivariogramas cruzados da área côncava.

presente estudo. Este resultado sinaliza para a influência do grau da cristalinidade da Gb em alguns atributos do solo, assim como o ocorrido com a goethita.

A análise de correlação espacial revelou a relação positiva do teor de Hm no DMP e negativa na RP, o que deve ser conseqüência dos maiores teores deste mineral em relação à goethita.

4.4. Conclusões

1. As relações encontradas entre a substituição isomórfica da goethita e os atributos físicos do solo permitem inferir que há efeito da cristalinidade deste mineral nos atributos indicadores de qualidade física do solo. Goethitas com altos valores e substituição isomórfica favoreceram a dimensão dos agregados, porosidade, e o contrário ocorreu com a densidade do solo e resistência do solo à penetração.

2. Gibbsitas de maior grau de cristalinidade favorecem maiores valores de densidade e microporos e agregados de maior tamanho.

3. A avaliação dos semivariogramas cruzados demonstrou ser uma ferramenta complementar à avaliação da correlação simples (Pearson) entre os atributos físicos e mineralógicos.

4.5 Referências

BARBERIS, E.; AJMONE MARSAN, F.; BOERO, V.; ARDUINO, E. et al. Aggregation of soil particles by iron oxides in various size fractions of soil B horizons. Journal of Soil Science, Oxford, v. 42, p. 535-542, 1991.

BARBIERI, D.M. Formas do relevo e variabilidade espacial de atributos químicos e mineralógicos de um argissolo cultivado com cana-de-açúcar. 2007. 83 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007.

BHATTI, A. U.; MULLA, D. J.; KOEHLER, F. E.; GURMANI, A. H. Identifying and removing spatial correlation from yield experiments. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 55, p.1523-1528, 1991.

BLACKMORE, A. V. Aggregation of clay by the productsof iromn (III) hydrolysis. Australian Jounal Soil Research, Melbourne, v. 11, p.75-85 , 1973.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo.II-Correlação espacial entre mineralogia e agregados. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 32, p. 2279-2288, 2008.

CHESTERS, G.; ATTOE, O. J.; ALLEN, O. N. Soil aggregation in relation to various soil constituents. Soil Science Society of America Journal, Madison, p. 272- 277, 1957.

CORNELL, R. M. The film-forming abilities of iron-oxides and oxyhydroxides. Clay Minerals, Londres, v.10, p. 209-213. 1973.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. The iron oxides. Structure, Properties, Reactions, Occurrence and Uses,1996. 573p.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos.2. ed. Rio de Janeiro, 2006. p. 306.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região Sudeste do Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 23, p.515-524, 1999.

GHIDIN, A. A.; MELO, V. F.; LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. II – Relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.30, p.307-319, 2006.

GUISARDI, M. Variabilidade espacial da granulometria de argissolos em diferentes pedoformas em Catanduva-SP. 2003. 79f. Trabalho de Graduação – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

INDA JÚNIOR, A. V.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P. C. I; BOENI, M. SALTON, J. C.; TONIN, A. T. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. Ciência Rural. Santa Maria, v. 37, p. 1301-1307, 2007.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Avaliação da estimativa de substituição de Fe por Al em hematitas de solos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 22, p. 209-213, 1998.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequênce in Southern Brazil and their application in classification of kaolinitic Soils. Geoderma, Amsterdam, v. 29, p. 27-39,1982.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; WHITE, J. L.; ENSMINGER, L. E.; CLARK, F. E., eds. Methods of soil analysis – Physical ad mineralogical properties, including statistics of measurement d sampling. American Society of Agronomy, 1965, p. 499-510.

KROTH, E. M.; PAGE, J. B. Aggregate formation in sils with special reference to cementing substances. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v.11, p.27-34, 1947.

LUTZ, J. F. The relation of free iron in the soil to aggregation, Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v.1, p.43-45, 1936.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clay by a dithionite-citrate system bulfered with sodium bicarbonate. Clays and Clay Minerals, New York, v. 7, p. 317-327, 1960.

MINITAB, Release. Making Data analysis Easler: version 13.1, 2000

NORRISH, K.; TAYLOR, R. M. The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. Journal of Soil Science, Oxford, v. 12, p. 294-306, 1961.

PEDROTTI, A.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; SILVA, M. L. N.; LIMA, J. M.; CARVALHO, R. Relação entre atributos físicos , mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 27 p. 1-9, 2003.

ROBERTSON, G.P. GS^+ geostatistics for the environmental sciences: GS^+ user' guide. Plainwell: Gamma Design Software, 1998, 152 p.

SANCHEZ, R. B. Agricultura de Precisão em Argissolos com variação nas formas de relevo sob o cultivo de cana-de-açúcar. 2007.101 f. Tese (Doutorado em produção vegetal)- Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias , Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal 2007.

SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; GONCALVES, A. C. A.; FIDALSKI, J. Variabilidade e correlação espacial de algumas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto e preparo convencional. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 32, p. 1411-1417, 2008.

SCHAHABI, S.; SCHWERTMANN, U. Der Einfluβ von synthetischen Eisenoxidem auf die Aggregation zweier Löβbödenhorizonte. Z. Pflanzenernähr, Bodenkd, v. 125 p.193-204, 1970.

SCHULZE, D. G.; SCHWERTMANN, U. The influence of aluminium on iron oxides: X. Properties of Al-substituted goethites. Clay Minerals, Londres**,** v. 19, p. 521-539, 1984.

SCHULZE, D. G. The influence of aluminium on iron oxides VIII. Unit-cel dimension of Al-substituted of goethites and estimation of Al from them. Clays Clay Minerals, New York, v. 32, p. 36-44, 1984.

SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of Southern and Central Brazil. Soil Science, Baltimore, v. 139, p.344-50, 1985.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 15, p. 229-235, 1991.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. American Journal Science, v. 263, p.616-627, 1965.

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S. R.; VACHAUD, G.; NIELSEN, D.R. The use of cokriging with limited soil observations. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.47, p. 175-184,1983.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V.; V. H.; SCHAEFER, G. R., (Ed.) Tópicos em ciência do solo, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v. 1, p. 1-54.

VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; MOTTA, P. E. F. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da região Sudeste do Brasil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 38, p.133-141, 2003.

CAPÍTULO 5 – IMPLICAÇÕES

O presente estudo permitiu o entendimento do comportamento dos minerais da fração argila hematita, goethita, caulinita e gibbsita e dos atributos físicos em diferentes curvaturas bem como a relação entre estes atributos. Estas informações são inéditas em argissolos de origem arenítica e sinalizam para a necessidade de estudos que envolvam outros atributos condicionados pela mineralogia, como por exemplo a adsorção de fósforo. Assim como a utilização de outros modelos de paisagem em áreas de diferentes dimensões.

A dependência espacial dos atributos mineralógicos e físicos do solo e a influência das curvaturas nestes atributos revelam a importância da caracterização do relevo na divisão de áreas homogenias no campo. O entendimento da variabilidade espacial do solo e a influência do relevo nesta, permite o estabelecimento das relações de causa e efeito da distribuição dos atributos do solo na paisagem.

A compreensão das relações entre a mineralogia e os atributos físicos do solo utilizando técnicas geoestatísticas se torna complementar às técnicas convencionais encontradas na literatura. Relações estas, geralmente, obtidas por meio de uma simples comparação e associação de médias desses atributos.

Portanto o presente trabalho vem de encontro às necessidade de novas tecnologias para os estudos das variações dos atributos no solo e para a implantação do planejamento do uso do solo visando o manejo racional do mesmo.

APÊNDICES

Difratogramas dos óxidos de ferro (ÁREA CONVEXA)

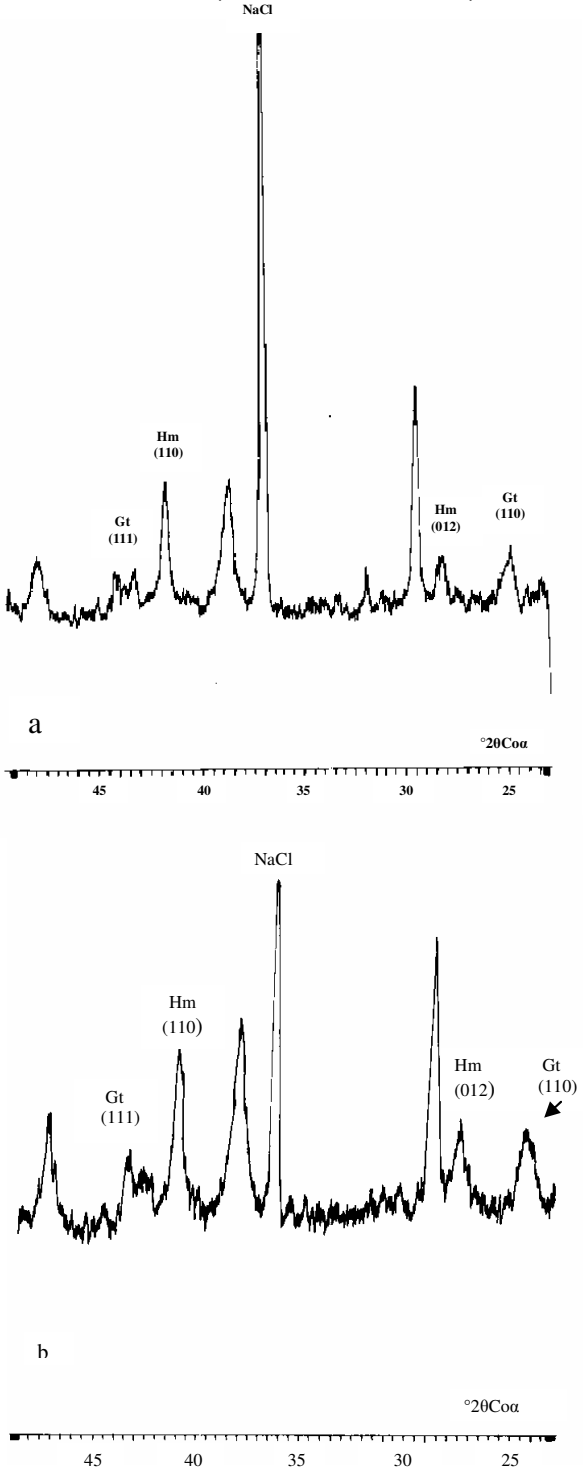

Figura 1A. Difratogramas dos óxidos de ferro presentes na fração argila. a) amostra coletada no ponto 3 e b) amostra coletada no ponto 34.

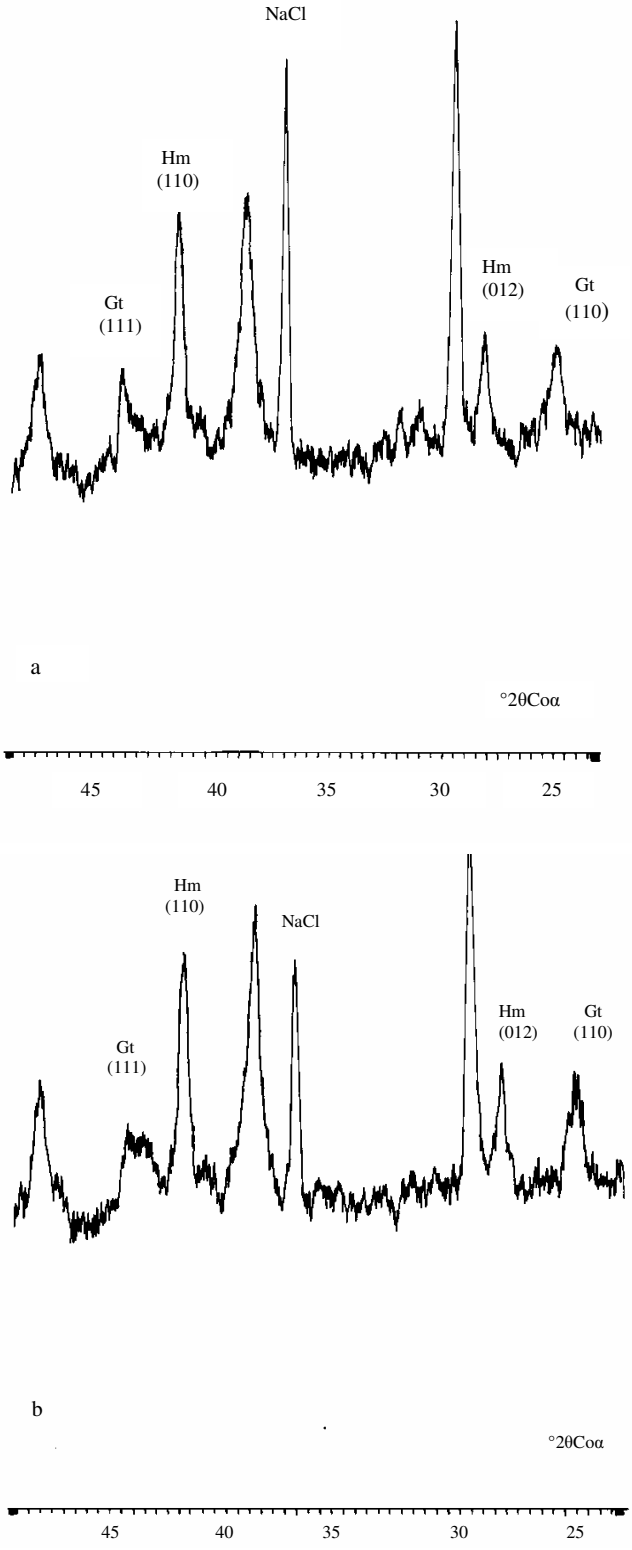

Figura 2A. Difratogramas dos óxidos de ferro presentes na fração argila. a) amostra coletada no ponto 94 e b) amostra coletada no ponto 119.

Difratogramas dos óxidos de ferro (ÁREA CÔNCAVA)

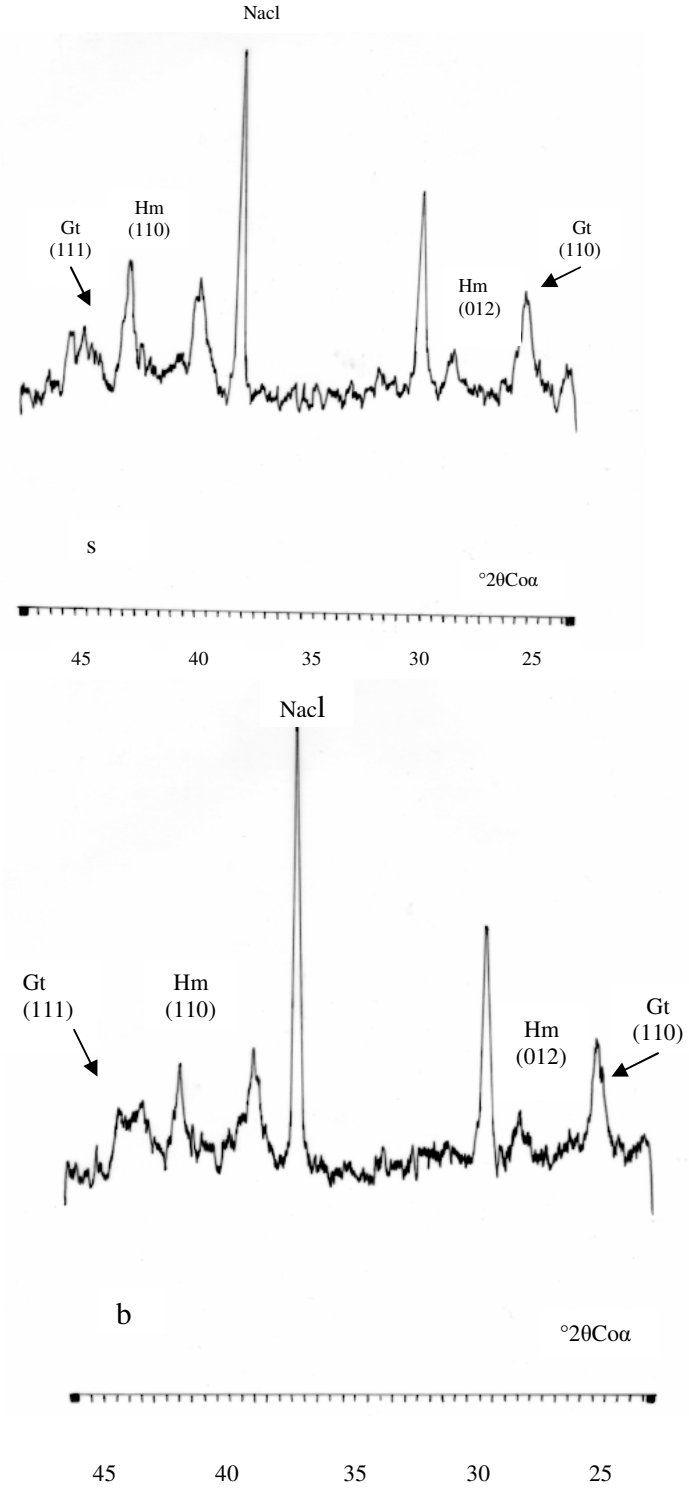

Figura 3A. Difratogramas dos óxidos de ferro presentes na fração argila. a) amostra coletada no ponto 15 e b) amostra coletada no ponto 32.

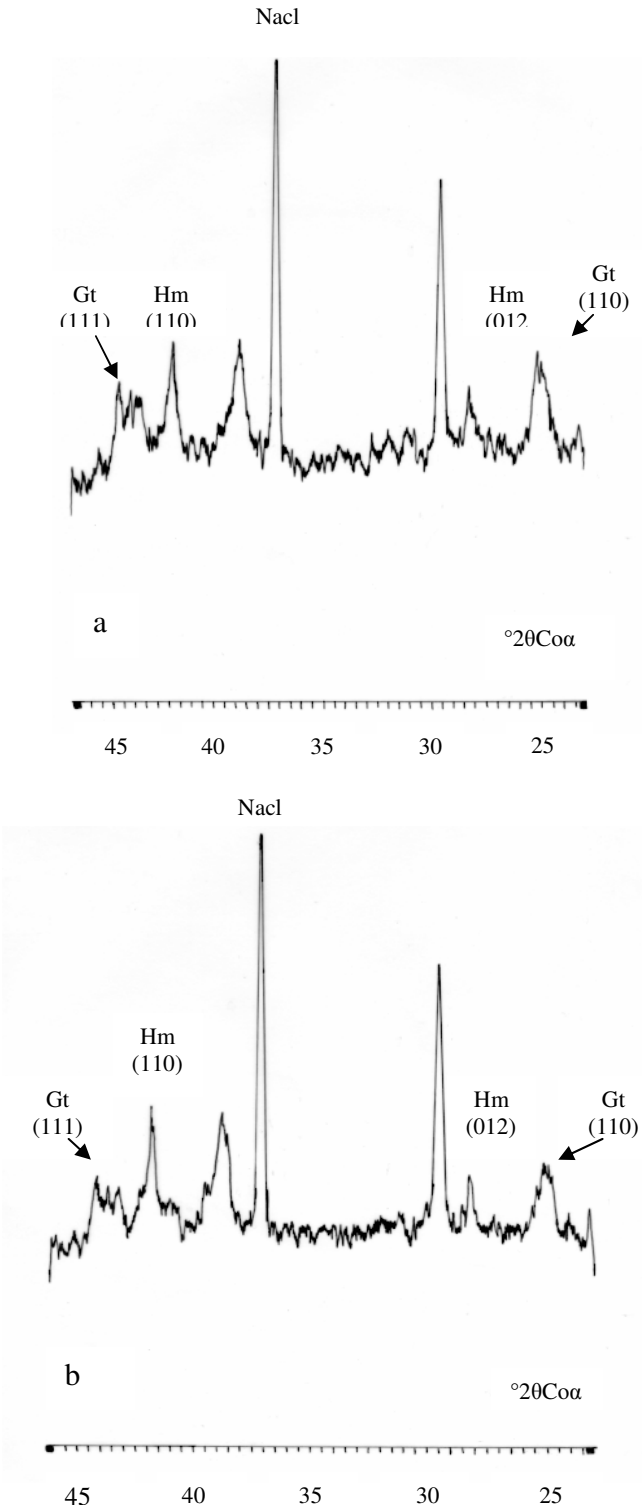

Figura 4A. Difratogramas dos óxidos de ferro presentes na fração argila. a) amostra coletada no ponto 66 e b) amostra coletada no ponto 99.

Difratogramas dos minerais caulinita e gibbsita (ÁREA CONVEXA)

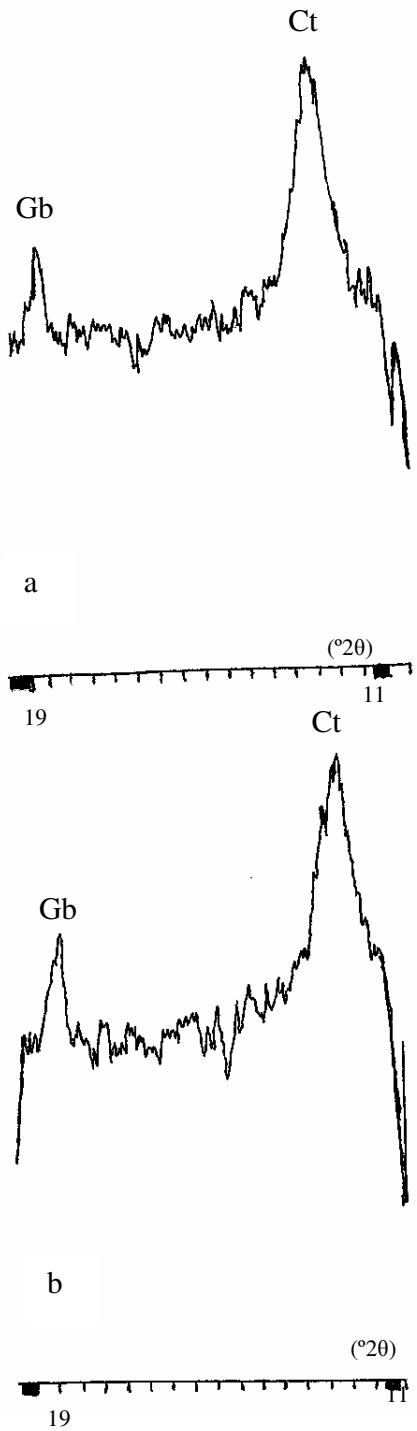

Figura 5A. Difratogramas a) amostra coletada no ponto 3 e b) amostra coletada no ponto 9.

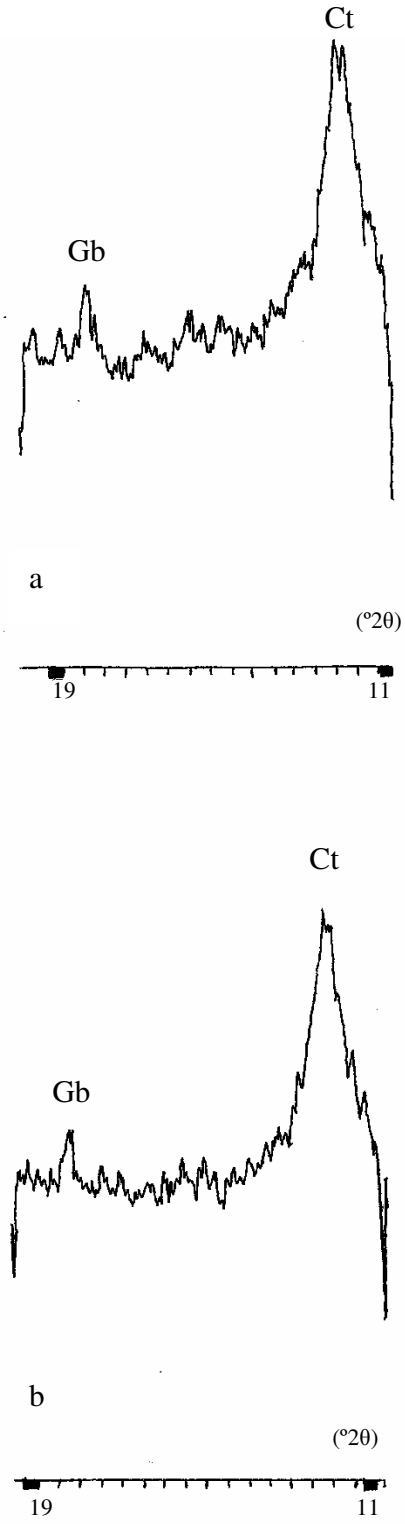

Figura 6A. Difratogramas a) amostra coletada no ponto 86 e b) amostra coletada no ponto 104.

Difratogramas dos minerais caulinita e gibbsita (ÁREA CÔNCAVA)

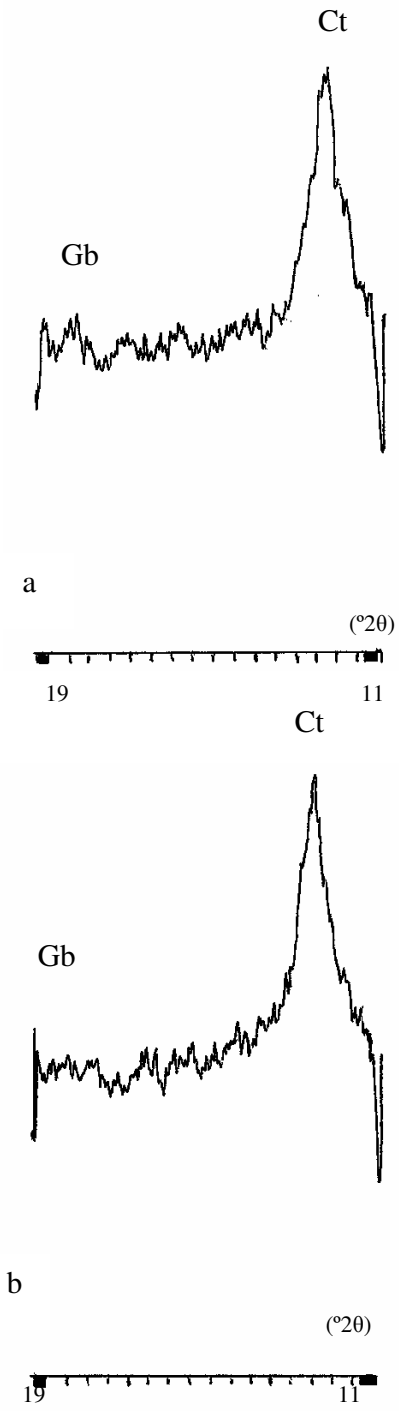

Figura 7A. Difratogramas a) amostra coletada no ponto 5 e b) amostra coletada no ponto 8.

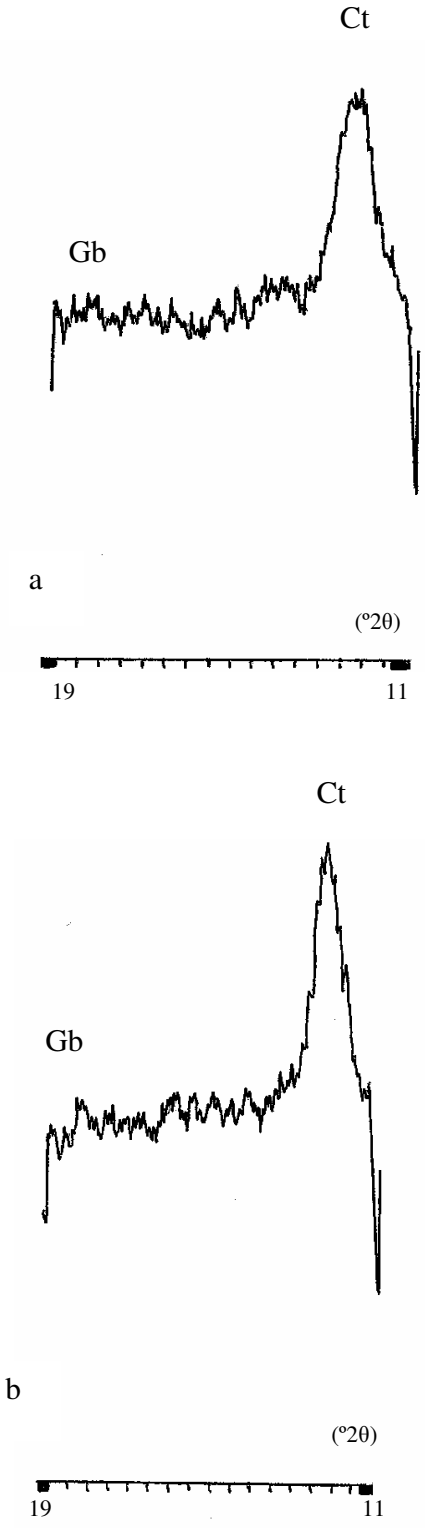

Figura 8A. Difratogramas a) amostra coletada no ponto 113 e b) amostra coletada no ponto 120.