

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO**

**CARACTERIZAÇÃO E VARIABILIDADE ESPACIAL DE
ATRIBUTOS FÍSICOS EM UM ARGISSOLO AMARELO
NO ESTADO DO CEARÁ**

JOÃO PAULO CAJAZEIRA

Fortaleza-CE
março-2007

**CARACTERIZAÇÃO E VARIABILIDADE ESPACIAL DE
ATRIBUTOS FÍSICOS EM UM ARGISSOLO AMARELO
NO ESTADO DO CEARÁ**

JOÃO PAULO CAJAZEIRA

**MARÇO – 2007
FORTALEZA – CEARÁ
BRASIL**

**CARACTERIZAÇÃO E VARIABILIDADE ESPACIAL DE
ATRIBUTOS FÍSICOS EM UM ARGISSOLO AMARELO
NO ESTADO DO CEARÁ**

JOÃO PAULO CAJAZEIRA
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior

Dissertação apresentada à Coordenação do
Curso de Pós-Graduação em Agronomia,
Área de Concentração em Solos e Nutrição
de Plantas, da Universidade Federal do
Ceará, como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre.

MARÇO – 2007
FORTALEZA – CEARÁ
BRASIL

Esta dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Agronomia, Área de Concentração em Solos e Nutrição de Plantas, outorgado pela Universidade Federal do Ceará. Uma via do presente estudo encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca de Ciência e Tecnologia da referida Universidade.

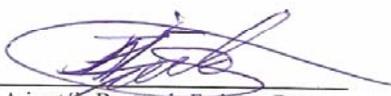
A citação de qualquer trecho desta dissertação é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas de ética científica.


JOÃO PAULO CAJAZEIRA

Dissertação aprovada em: 29 / 03 / 2007


Prof. Raimundo Nonato de Assis Júnior – Doutor
(Orientador)


Prof. Ricardo Espíndola Romero – Doutor
(Examinador)


José de Arimatéia Duarte de Freitas – Doutor
(Examinador)

“O mestre disse a um dos seus alunos: Tu queres saber em que consiste o conhecimento? Consiste em ter consciência tanto de conhecer uma coisa quanto de não a conhecer. Este é o conhecimento.”

Confúcio

Aos meus queridos Pais, Edmílson e Salete, pelo apoio, participação e força em todos os momentos da minha vida acadêmica.

Ofereço

A minha noiva, Ana Maria, por sua incondicional fidelidade e compreensão nos momentos de ausência por causa da pesquisa.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A *Deus*, pelo dom da vida, saúde e pelo privilégio de poder estudar e continuar meus estudos.

À *Universidade Federal do Ceará*, de forma especial ao *Departamento de Ciências do Solo*, pelos ensinamentos e acolhida.

Ao *Laboratório de Física do solo*, na pessoa do Mestre *Franze*, com o qual tive o prazer de trabalhar e conquistar uma grande amizade.

Ao *Laboratório de Fertilidade do Solo*, pelo apoio técnico para realização de algumas análises. Ao Srs. *Tavares e Antônio José*.

Ao *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)*, pela concessão de bolsa de estudo, sem a qual as limitações para este trabalho seriam maiores.

À *Coordenação do curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas* pela liberação de verbas para pesquisa.

Ao Professor, e Amigo, *Raimundo Nonato de Assis Júnior* por sua sapiência, conselhos e tranqüilidade na condução da pesquisa.

Aos Doutores Prof. *Ricardo Espíndola Romero e José de Arimatéia Duarte de Freitas* por aceitarem participar da banca examinadora com suas sugestões e observações para melhoria do trabalho de dissertação.

Ao Professor *Francisco Marcus Lima Bezerra*, por ceder a área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola e pelo apoio técnico no campo onde o trabalho foi conduzido.

Ao Amigo *Helon Hébano* pela sua ajuda no campo otimizando o tempo de coleta das amostras e a Amiga *Joedna Silva Cruz* pelas dúvidas sanadas quando do uso de alguns softwares computacionais.

Aos *Professores* da Pós-Graduação dos Departamentos de Ciências do Solo e Engenharia Agrícola com os quais tive o prazer de estudar durante esses dois anos de mestrado.

Aos *Colegas, Amigos e Servidores* da Pós-Graduação com os quais convivi todo esse tempo, pelas lições aprendidas e ensinadas.

Por fim, a *todos* que, de uma maneira ou de outra, colaboraram para a realização desta pesquisa.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE TABELAS.....	<i>x</i>
LISTA DE FIGURAS.....	<i>xi</i>
RESUMO.....	<i>xv</i>
SUMMARY.....	<i>xvi</i>
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	03
2.1 O solo e a agricultura.....	03
2.2 Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo.....	04
2.3 Estatística clássica, geoestatística e a ciência do solo.....	06
2.4 Influência dos atributos do solo na sua produtividade.....	12
2.5 Caracterização físico-hídrica do solo.....	13
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.1 Descrição da área e do solo em estudo.....	15
3.2 Metodologia.....	16
3.2.1 Trabalhos no campo.....	16
3.2.2 Trabalhos realizados em laboratório.....	17
3.2.2.1 Análises físicas.....	17
Densidade do solo.....	17
Densidade das partículas.....	18
Porosidade total.....	18
Microporosidade e Macroporosidade	19
Umidade obtida através da mesa de tensão.....	19
Umidade obtida através do extrator Richards.....	19
Análise granulométrica e argila dispersa em água.....	20
Grau de flocculação.....	21
Estabilidade dos agregados.....	21
3.2.2.2 Análises estatísticas e geoestatísticas.....	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
4.1 Estatística clássica (distribuição de frequência).....	24
4.2 Geoestatística (cálculo da semivariância).....	40

4.3 Geoestatística (mapas de superfície).....	51
5. CONCLUSÕES.....	66
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Parâmetros para os atributos físicos do solo: areia, silte, argila total, argila dispersa em água, grau de floculação para profundidade de 0-0,2 m.....	26
Tabela 2. Parâmetros para os atributos físicos do solo: areia, silte, argila total, argila dispersa em água, grau de floculação para profundidade de 0,2-0,4 m.....	26
Tabela 3. Parâmetros os atributos físicos do solo: densidade do solo, densidade das partículas, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e umidade 0,033 MPa e 1,5 MPa para profundidade de 0-0,2 m.....	30
Tabela 4. Parâmetros para os atributos físicos do solo: densidade do solo, densidade das partículas, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e umidade 0,033 MPa e 1,5 MPa para profundidade de 0,2-0,4 m.....	30
Tabela 5. Parâmetros para os atributos físicos do solo: estabilidade de agregados 4,76-2,00mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,5 mm, 0,5-0,25 mm e < 0,25 mm para profundidade de 0-0,2 m.....	37
Tabela 6. Parâmetros para os atributos físicos do solo: estabilidade de agregados 4,76-2,00mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,5 mm, 0,5-0,25 mm e < 0,25 mm para profundidade de 0,2-0,4 m.....	37
Tabela 7. Parâmetros dos semivariogramas isotrópicos das propriedades físicas analisadas.....	40

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Semivariograma com efeito pepita, Ortiz (2002).....	11
Figura 2. Demarcação da área.....	16
Figura 3. Croqui da área experimental destacando-se os pontos onde foram realizadas as coletas de solo.....	17
Figura 4. Aplicação das tensões de 0,033 MPa (a) e 1,5 MPa (b) no aparelho extrator de Richards, respectivamente.....	20
Figura 5. Histogramas relacionados às propriedades areia, silte, argila total, argila dispersa em água e grau de floculação na profundidade de 0-0,2 m.....	28
Figura 6. Histogramas relacionados às propriedades areia, silte, argila total, argila dispersa em água e grau de floculação na profundidade de 0,2-0,4 m.....	29
Figura 7. Histogramas relacionados às propriedades densidade do solo, densidade das partículas, porosidade total e macroporosidade na profundidade de 0-0,2 m.....	32
Figura 8. Histogramas relacionados às propriedades microporosidade, umidade 0,033 MPa e umidade 1,5 MPa na profundidade de 0-0,2 m.....	33
Figura 9. Histogramas relacionados às propriedades densidade do solo, densidade das partículas, porosidade total e macroporosidade na profundidade de 0,2-0,4 m.....	34

Figura 10. Histogramas relacionados às propriedades microporosidade, umidade 0,033 MPa e 1,5 MPa na profundidade de 0,2-0,4 m.....	35
Figura 11. Histogramas relacionados com a estabilidade dos agregados 4,76-2,00 mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,50 mm, 0,50-0,25 mm e < 0,25 mm na profundidade de 0-0,2 m.....	38
Figura 12. Histogramas relacionados com a estabilidade dos agregados 4,76-2,00 mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,50 mm, 0,50-0,25 mm e <0,25 mm na profundidade de 0,2-0,4 m.....	39
Figura 13. Semivariogramas isotrópicos correspondentes as variáveis areia, silte, argila total, argila dispersa em água, grau de floculação e densidade do solo na profundidade de 0-0,2 m.....	45
Figura 14. Semivariogramas isotrópicos correspondentes as variáveis areia, silte, argila total, argila dispersa em água, grau de floculação e densidade do solo na profundidade de 0,2-0,4 m.....	46
Figura 15. Semivariogramas isotrópicos correspondentes as variáveis densidade das partículas, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, umidade 0,033 MPa e umidade 1,5 MPa na profundidade de 0-0,2 m.....	47
Figura 16. Semivariogramas isotrópicos correspondentes as variáveis densidade das partículas, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, umidade 0,033 MPa e umidade 1,5 MPa na profundidade de 0,2-0,4 m.....	48
Figura 17. Semivariogramas isotrópicos correspondentes à estabilidade dos agregados com diâmetro 4,76-2,00 mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,50 mm, 0,50-0,25 mm e < 0,25 mm na profundidade de 0-0,2 m.....	49

Figura 18. Semivariogramas isotrópicos correspondentes à estabilidade dos agregados com diâmetro 4,76-2,00 mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,50 mm, 0,50-0,25 mm e < 0,25 mm na profundidade de 0,2-0,4 m.....	50
Figura 19. Distribuição espacial das variáveis areia, silte e argila total na profundidade de 0-0,2 m.....	54
Figura 20. Distribuição espacial das variáveis areia, silte e argila total na profundidade de 0,2-0,4 m.....	55
Figura 21. Distribuição espacial das variáveis argila dispersa em água, grau de floculação e densidade das partículas na profundidade de 0-0,2 m...	56
Figura 22. Distribuição espacial das variáveis argila dispersa em água, grau de floculação e densidade das partículas na profundidade de 0,2-0,4 m.....	57
Figura 23. Distribuição espacial das variáveis densidade do solo, porosidade total e macroporosidade na profundidade de 0-0,2 m.....	58
Figura 24. Distribuição espacial das variáveis densidade do solo, porosidade total e macroporosidade na profundidade de 0,2-0,4 m.....	59
Figura 25. Distribuição espacial das variáveis microporosidade, umidade 0,033 MPa e umidade 1,5 MPa na profundidade de 0-0,2 m.....	60
Figura 26. Distribuição espacial das variáveis microporosidade, umidade 0,033 MPa e umidade 1,5 MPa na profundidade de 0,2-0,4 m.....	61
Figura 27. Distribuição espacial das variáveis estabilidade de agregados 4,76-2,00 mm, estabilidade de agregados 2,00-1,00 mm e estabilidade de agregados 1,00-0,50 mm na profundidade de 0-0,2 m.....	62

- Figura 28. Distribuição espacial das variáveis estabilidade de agregados 4,76-2,00 mm, estabilidade de agregados 2,00-1,00 mm e estabilidade de agregados 1,00-0,50 mm na profundidade de 0,2-0,4 m..... 63
- Figura 29. Distribuição espacial das variáveis estabilidade de agregados 0,5-0,25 mm e estabilidade de agregados menores que 0,25 mm na profundidade de 0-0,2 m..... 64
- Figura 30. Distribuição espacial das variáveis estabilidade de agregados 0,5-0,25 mm e estabilidade de agregados menores que 0,25 mm na profundidade de 0,2-0,4 m..... 65

RESUMO

O objetivo do trabalho foi caracterizar e determinar a variabilidade espacial de atributos físicos de um Argissolo Amarelo, utilizando métodos geoestatísticos e confecção de mapas de superfície pelo método da Krigagem, em duas camadas de solo. Foram realizadas coletas de solo em intervalos regulares de 2,5 m, numa área de 400 m², sendo 81 pontos em cada uma das camadas (0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m), totalizando 162 amostras que foram submetidas às determinações físicas e os dados obtidos analisados pela estatística descritiva para verificar a normalidade da distribuição de frequência e posteriormente submetidos a geoestatística. O modelo que melhor se ajustou à curva do semivariograma, na maioria das variáveis, foi o esférico. No entanto, para a variável densidade das partículas e agregados com diâmetro 2,00-1,00 mm, na profundidade de 0 – 0,2 m e grau de flocculação, densidade do solo e umidade obtida com tensão 1,5 MPa, na profundidade de 0,2 – 0,4 m o modelo que melhor se ajustou foi o exponencial. O efeito pepita relativo para o grau de flocculação, densidade do solo e densidade das partículas foi de 100%, caracterizando o efeito pepita puro, confirmando a aleatoriedade dos dados. Os maiores alcances foram observados nas profundidades de 0,2 – 0,4 m para percentagem de silte (51,00 m) e percentagem de areia (35,06 m). Os valores da densidade do solo foram considerados relativamente altos sendo de 1,69 e 1,65 Mg.m⁻³ para 0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m, respectivamente. Houve uma maior retenção de umidade nas camadas inferiores.

Palavras-chave: Geoestatística; krigagem; semivariograma; dependência espacial.

SUMMARY

The objective of this research was to characterize and determine the spatial variability of physical attributes of Alfisols, using geostatistical methods and making of surface maps for the method of Kriging, in two soil depths. They were made soil collections in regular intervals of 2.5 m, in an area of 400 m², being 81 points in each one of the layers (0 – 0.2 m and 0.2 – 0.4 m), to add 162 samples that were submitted to the physical determinations and the obtained data analyzed by the descriptive statistics to verify the normality of the frequency distribution and later on submitted to the geostatistical. The model that better it was adjusted to the curve of the semivariogram, in most of the variables, it was the spherical. However, for the variable density of the particles and aggregate with diameter 2.00-1.00 mm, in the depth of 0 – 0.2 m and flocculation degree, bulk density and soil-water content with tension 1.5 MPa, in the depth of 0.2 – 0.4 m the most appropriate model that better adjusted it was the exponential. The nugget ratio for the flocculation degree, bulk density and density of the particles was of 100%, characterizing “random variance”, confirming the independence of the data. The largest ranges were observed in the depths of 0.2 – 0.4 m for lime percentage (51.00 m) and percentage of sand (35.06 m). The values of the bulk density were considered relatively high being of 1.69 and 1.65 Mg.m⁻³ for 0 – 0.2 and 0.2 – 0.4 m, respectively. There was a larger humidity retention in the inferior layers.

Key words: Geostatistic; kriging; semivariogram; space dependence.

1. INTRODUÇÃO

Diante de uma crescente demanda de alimentos por parte do mercado consumidor globalizado e exigências cada vez maiores por produtos que zelem pela qualidade, produtores estão cada vez mais conscientes de seu papel na agricultura. Buscam medidas para otimizar a produção com a diminuição das perdas, aumentando a potencialidade produtiva do solo.

Com essa finalidade, é imprescindível a adoção de medidas que visem o aumento da eficácia dos insumos, incluindo sua aplicação, além de utilizar a terra de maneira racional e sustentável, conservando e melhorando progressivamente seus recursos naturais. O manejo adequado auxilia na manutenção de características e propriedades físicas e químicas do solo, pois, estes, são fatores que estão ligados diretamente com o aumento e a manutenção da produtividade. Afora isso, os mercados mundiais, além da qualidade dos produtos agrícolas, passaram a exigir controles sobre todo o sistema de produção, e isso inclui a forma com que o solo vem sendo manejado, ou seja, as tecnologias empregadas para a viabilidade da produção.

Portanto, há uma crescente preocupação, por parte da sociedade, com a sobrevivência do homem no planeta, o que tem concretizado conceitos como produção sustentável na qual procura-se adequar a atividade agrícola a uma ação que seja ambientalmente correta, socialmente justa e economicamente viável (Hansen, 1996). No ano de 1927, quando a população mundial girava em torno de dois bilhões de habitantes, já era consenso entre os cientistas que expandir a área cultivada não seria solução para alimentar toda a população; competiu aos estudiosos, notadamente da

ciência do solo, viabilizar meios para aumentar a capacidade produtiva (Keeney, 2000). O mesmo autor destaca a importância desta ciência na produção de alimentos e seus desafios diante de demandas igualmente prioritárias, mas antagônicas.

A estatística é uma ferramenta bastante utilizada no sentido de verificar as similaridades e dissimilaridades dos atributos do solo. Vieira & De Maria (1994), citam a necessidade de se fazer uso de grandes parcelas e com muitas repetições, para se ter maior sensibilidade à heterogeneidade do solo. No entanto, devido às exigências da estatística clássica, proposta por R.A. Fisher, dificilmente serem atendidas em condições de campo, já que a maioria das propriedades do solo varia no espaço e no tempo, devido seu caráter anisotrópico, tornou-se necessário ferramentas estatísticas adicionais que considerem essas variações; a geoestatística tem se mostrada bastante oportuna nestas situações.

Deste modo, a aplicação das técnicas de geoestatística permite análise de dependência espacial, como também, estimativa de dados, para locais não amostrados, através de um estimador sem influência de fatores externos, para isso se faz necessário detalhar a área a ser analisada e conhecer o posicionamento geográfico de cada ponto amostrado ou o primeiro ponto, caso os demais sejam equidistantes, pois cada atributo do solo terá suas informações associadas a um dado ponto no espaço, permitindo a interpolação, bem como a projeção dos resultados com base na estrutura de sua variabilidade natural. A utilização da geoestatística apresenta grande importância econômica, pois quando se conhece a dependência dos dados é possível estabelecer, de maneira mais adequada, a implantação da malha amostral.

Neste sentido, a hipótese de trabalho foi de que pode haver variabilidade espacial de atributos físicos do solo, originada tanto por fatores de formação do solo quanto por seu contínuo manejo; trabalha-se, também, com a hipótese de que há uma variância finita dentro do domínio espacial estipulado.

O presente trabalho foi conduzido em um solo classificado como Argissolo Amarelo Eutrófico abrupto, textura arenosa/média, A moderado, mesoeutrófica (*Alfisol*), com o objetivo principal de avaliar a variabilidade espacial de alguns atributos físicos do solo, usando métodos geoestatísticos, a fim de fornecer subsídios para o planejamento de experimentos conduzidos na área, auxiliando na escolha dos pontos amostrais, amparado pela teoria das variáveis regionalizadas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O solo e a agricultura

Segundo a Sindipetro, a agricultura hoje ocupa 25% da superfície terrestre, sendo que destes, 75% está em solo considerado de baixa fertilidade, metade em solos acidentados, com uma produtividade modesta (Educar, 2005).

O uso cada vez mais intenso das terras agrícolas, aliado ao desenvolvimento de tecnologias modernas de cultivo e às pressões econômicas para reduzir custos de produção, tem ocasionado mudança na mentalidade quanto às práticas de cultivo do solo. Assim, a correlação entre parâmetros físicos do solo em função dos sistemas de manejo e do desenvolvimento de raízes na rizosfera adquire importância cada vez maior (Crestana et al., 1994).

No entanto, a utilização de equipamentos pesados, a intensa mobilização do solo, oriunda da sua mecanização excessiva e, principalmente, o preparo do solo realizado em condição de umidade inadequada vem causando, em muitas regiões, a degradação da estrutura original, ocasionando sua compactação, i.e., alteração no arranjo das partículas, tornando-o mais denso. Essa compactação altera várias de suas propriedades, notadamente as relacionadas aos seus aspectos físicos, como o aumento da resistência à penetração de raízes e da densidade do solo, redução da porosidade total, principalmente a macroporosidade e parâmetros hídricos, ocasionando, com isso, alterações, na maioria das vezes indesejáveis, no espaço poroso do solo (Silva et al., 1986).

De acordo com Marcos (1968), o estudo da estruturação do solo no sentido morfológico é puramente descritivo, enquanto que do ponto de vista físico, é funcional. Segundo o autor, embora os agregados sejam separados, sua estabilidade avaliada e sua formação extensamente estudada, não há conhecimento de alguma lei ou princípio comandando a sua formação, tamanho e composição. Tentativa nesta direção foi reportada, entre outros, no trabalho de Harris et al. (1966).

Além do intenso uso do maquinário agrícola e abrasão por implementos de cultivo, Reichert et al. (1993) relacionam outras forças responsáveis pela desagregação do solo, são elas: (a) impacto de água (gotas de chuva) e cisalhamento pela água (escoamento), e (b) entrada de água nos agregados (Kemper, 1965). O método de peneiramento em água simula adequadamente condições de irrigação em sulcos, na qual ocorre umedecimento dos agregados e forças de cisalhamento (Kemper & Chepil, 1965), mas não simula a desagregação por impacto de gotas de chuva (Glanville & Smith, 1988).

Silva & Mielniczuk (1997) ressaltam que a formação e a estabilização da estrutura do solo ocorrem mediante a atuação de processos físicos, químicos e biológicos. Esses, por sua vez, atuam por mecanismos próprios, nos quais são envolvidas substâncias que agem na agregação e na estabilização. Entre essas, as principais são: argila, sílica coloidal, compostos orgânicos, metais polivalentes, carbonato de cálcio, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, exsudados orgânicos e substâncias orgânicas provenientes da ação dos microrganismos. Além das substâncias agregantes, existem os agentes de agregação, representados por clima, raízes, microrganismos e pelo próprio tracionamento do solo.

Segundo Vieira & Vieira (1981), é necessário que se utilize o solo da maneira mais racional possível, buscando uma metodologia adequada que expresse as possibilidades do meio e que represente um aproveitamento equilibrado do ecossistema, fazendo-se necessário lembrar que para lograr êxito na exploração do solo é necessário deter o conhecimento de suas possibilidades e da relação que existe entre elas e o meio ambiente.

2.2. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo

A preocupação com a variabilidade espacial remonta ao início do século passado, quando Smith (1910) estudou a disposição de parcelas no campo em experimentos de

rendimento de variedades de milho, numa tentativa de minimizar o efeito de variações no solo. Montgomery (1913), preocupado com o efeito do nitrogênio no rendimento do trigo, fez um experimento de 224 parcelas nas quais mediram o rendimento dos grãos.

Segundo Bacchi & Reichardt (1992), a variabilidade espacial de atributos físicos dos solos é decorrente da ação diferenciada dos processos de gênese e de manejo. Quando se trata da ciência do solo, as dificuldades tornam-se maiores, porque, sendo a formação do solo resultante de uma série de fatores (fatores de formação do solo), o produto final é bastante heterogêneo em relação às suas características e propriedades. O assunto tem sido abordado em seus diversos aspectos e bastante explorado nos últimos anos, através da ferramenta da geoestatística.

Cruz (2005) relata que a heterogeneidade é inerente ao solo, o que tipifica sua anisotropia. Em conseqüência, o solo apresenta ampla variabilidade espacial de seus atributos, tanto no sentido espacial quanto no temporal, a qual se deve ao material de origem diverso e às condições variadas de sua formação e pode ser aleatória ou depender da posição das amostras no espaço. Segundo Souza (1992), é importante deter o conhecimento da variação espacial de variáveis físicas e químicas do solo para levantamentos e classificação de solos, avaliação da fertilidade, desenvolvimento de esquemas de amostragem mais adequados, para o planejamento experimental, bem como para as definições de práticas apropriadas de manejo e de recuperação.

No sentido de práticas apropriadas de manejo, Grego & Vieira (2005) acrescentam a importância da variabilidade espacial na pesquisa agrícola, que estuda o solo e a sua capacidade produtiva, pois a consideram o princípio básico para o manejo preciso das áreas agrícolas, qualquer que seja sua escala. Nesse contexto, Souza (1992) aponta que a variabilidade pode ainda ser alterada pelo manejo do solo.

As propriedades hídricas também são afetadas pela anisotropia do solo. Segundo Warrick & Nielsen (1980) e Webster & Olivier (1992), a condutividade hidráulica é uma das propriedades do solo que apresenta maior variabilidade espacial. Por isso recomenda-se um grande número de observações para uma análise relativamente confiável (Van Lier & Libardi, 1999). Outros trabalhos abordam a variabilidade espacial das propriedades hídricas do solo, como os de Vieira et al. (1981) e Logsdon & Jaynes (1996).

Timm (2002) explica que a variabilidade espacial do solo pode ocorrer em diferentes níveis, relacionados a diferentes fatores, tais como: variação do material de origem, clima, relevo, organismos e tempo, i.e., relacionado com os processos de

formação do solo e efeitos das práticas de manejo adotadas no uso agrícolas. Ferramentas estatísticas autocorrelogramas, crosscorrelogramas, semivariogramas, análise espectral, krigagem, co-krigagem, modelos autoregressivos, modelos autoregressivos integrado média móvel (ARIMA), modelos de espaço de estados etc., têm sido usados para estudar a variabilidade espacial dos atributos do solo, e podem, potencialmente, conduzir a práticas de manejo que permitam um melhor entendimento do processo de interação no sistema solo-planta-atmosfera.

Segundo Chichota et al. (2003), acredita-se que as variações aumentem com a distância entre amostras e que uma parcela explicável pela dependência espacial esteja embutida na variação geral da propriedade ou característica. Assim, o valor de determinado atributo numa posição poderia ser predito, em parte, pelo valor do mesmo atributo numa posição próxima. Técnicas como o autocorrelograma podem ser utilizadas para testar esta hipótese.

2.3. Estatística clássica, geoestatística e a ciência do solo

Em 1956, Fisher propôs uma teoria de análise estatística segundo a qual o problema da variação poderia ser resolvido através da casualização e repetição, e tem sido referida como “*estatística clássica*” (Nielsen et al., 1983). Ela considera o campo em termos de conjunto de observações, reduzidas a uma média e medidas da sua divergência, sem considerar a sua distribuição espacial. Para atender tais exigências, procura-se selecionar um local típico e representativo, onde as amostras são retiradas ao acaso, evitando-se locais espacialmente variáveis. Na maioria das vezes, entretanto, essas exigências não são cumpridas, havendo comprometimento na avaliação dos resultados. Devido às limitações da estatística clássica, de suas exigências nunca terem sido testadas em condições de campo e serem dificilmente satisfeitas, já que a maioria das propriedades do solo varia no espaço e no tempo, tornou-se necessária utilização de ferramentas estatísticas adicionais que considerem e reflitam essas variações. Alternativamente, pode-se empregar a teoria das variáveis regionalizadas, proposta por Matheron (1963, 1971), para mineração e posteriormente para ciência do solo (Vieira et al., 1981; McBratney & Webster, 1983). A característica básica dessa teoria está no fato de se utilizar dessa estrutura da variância, no espaço ou no tempo, para avaliação do domínio representado por uma amostra. Na utilização da geoestatística, há necessidade de conhecer a localização relativa das amostras no espaço ou no tempo, a partir do que

se pode calcular a estrutura da variância, a qual expressa a dependência entre as medidas, através de autocorrelogramas e semivariogramas. Assim, pode-se determinar a distância ou o tempo de decorrência entre as amostras, o qual representa o domínio da medida. Quando os dados apresentarem periodicidade ou houver concentração de variância em determinados períodos, a análise espectral pode ser utilizada para determiná-los (Silva et al., 1989).

Até recentemente, as pesquisas na área agrônômica concentravam-se no uso da estatística clássica (análise de variância, média, coeficiente de variação, análise de regressão etc.), que pressupõe a independência entre as observações, desconsiderando o local de amostragem no campo. Neste caso, os experimentos são conduzidos tendo em vista a minimização do impacto da variabilidade espacial, isto é, ignorando o fato de que as observações podem ser dependentes espacialmente. Nielsen & Alemi (1989) comentam que o fato das observações dentro e entre tratamentos não serem independentes entre si, em muitos casos, torna o desenho experimental inadequado. Tais observações podem apresentar graus de variabilidade bastante altos, o que dificulta a análise e até pode prejudicar o experimento de tal forma que a parcela seja considerada inadequada para a experimentação feita. Estas variações podem, no entanto, estar relacionadas com a variabilidade espacial das características ou propriedades do solo, tanto vertical como horizontalmente, mesmo em parcelas aparentemente homogêneas (Cadima et al., 1980; Libardi et al., 1986; Reichardt et al., 1986; Albuquerque et al., 1996).

Para evitar o problema de analisar o grau de dependência espacial, são empregados, muitas vezes, métodos como a utilização de áreas consideradas homogêneas e a adoção de repetições distribuídas no terreno ao acaso. Neste caso, sendo verificada a distribuição normal de freqüências, assume-se, sem testes adequados, a independência entre as amostras (Vieira, 2000; Chichota et al., 2003).

Embora seja mais conhecida em problemas de geologia e mineração, a teoria das variáveis regionalizadas, comumente conhecida como geoestatística, também pode ser aplicada a outras ciências, como por exemplo, a do solo, promovendo a obtenção da estrutura da variância, porque considera a dependência entre as medidas, o que não ocorre na estatística clássica. Assuntos específicos de real interesse e importância agrônômica incluem: umidade, textura, densidade, disponibilidades de água às plantas, condutividade hidráulica, velocidade de infiltração, elevação, precipitação, temperatura (Libardi et al., 1986).

A análise geoestatística é usada para definir a dependência espacial das propriedades do solo tanto para a isotropia quanto anisotropia (Burgess & Webster, 1980). Propriedade da superfície do solo (Brejda et al., 2000), conteúdo de nutrientes dos solos (Lee et al., 2001), lixiviação de nitrato (Ersahis, 2001), distribuição de pesticidas no solo e parâmetros ecológicos (Rossi et al., 1992) são exemplos de pesquisas analisadas pela geoestatística para prognosticar a variação espacial das propriedades do solo.

O entendimento da variabilidade exige uma maior quantidade de informações, as quais podem ser obtidas a partir de operações de amostragem de solo no campo. Quanto maior o número de amostras, mais alto é o ônus financeiro para o agricultor, e, portanto, o método da geoestatística é uma alternativa na otimização deste processo (Mulla et al., 1992).

Conhecido o semivariograma da variável, e havendo dependência espacial entre as amostras, podem-se interpolar valores em qualquer posição no campo de estudo, sem tendência e com variância mínima. Esta interpolação chama-se krigagem, em homenagem ao engenheiro de minas D.G. Krige (Vieira, 2000).

Trabalhando com dados de concentração de ouro, Krige (1951) concluiu que somente a informação dada pela variância é insuficiente para explicar o fenômeno em estudo. Para tal, é necessário levar em consideração à distância entre as observações. A partir daí surgiu o conceito da geoestatística, que leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial (Ortiz, 2002).

A geoestatística se difundiu bastante na Ciência do Solo durante a década de 80, quando diversos trabalhos ajudaram a expandir essa ferramenta, como os realizados por Reichardt (1984) e Vieira et al. (1983). Outros autores apresentam a geoestatística como ferramenta para o estudo de propriedades do solo e determinação do número de amostras a serem retiradas de uma área (Warrick et al., 1986; Trangmar et al., 1985; Silva, 1998 e Ortiz, 2002).

Segundo Gonçalves et al. (1999), a teoria das variáveis regionalizadas permite a modelagem da dependência espacial de uma propriedade, podendo ser usada para estimar valores médios com mínima variância por meio da krigagem. A variância da estimativa depende somente do grau de dependência espacial, ou seja, do semivariograma e da configuração dos pontos vizinhos usados na krigagem.

Ortiz (2002) considera que o estudo da dependência espacial de variáveis do solo, através da teoria das variáveis regionalizadas, permite a interpretação e a projeção dos

resultados com base na estrutura da sua variabilidade natural. O estudo da variabilidade de um solo, além de caracterizar uma região, pode indicar o número e a distribuição de amostras a serem retiradas possibilitando ainda maior detalhamento da área e dos resultados.

Webster & Olivier (1990) afirmam que muitas propriedades do solo variam continuamente no espaço e, conseqüentemente, os valores em locais mais próximos entre si tendem a ser mais semelhantes, até um determinado limite, correspondente ao domínio destas propriedades, que aqueles tomados a maiores distâncias. Caso isto ocorra, os dados não podem ser tratados como independentes e um tratamento estatístico mais adequado é necessário, pois o tratamento estatístico puro da heterogeneidade ignora a existência da correlação espacial entre os valores medidos. A análise geoestatística permite descrever esta correlação, o que torna possível, em aplicação prática, a interpolação por krigagem (Vieira et al., 1983), além de permitir a identificação de padrões de amostragem adequados (McBratney & Webster, 1983; Fonteh & Podmore, 1994).

Por isso, Vieira et al. (1983), McBratney & Webster (1983) e Souza et al. (1997), preconizam que o estudo da dependência espacial das propriedades do solo pode reduzir o número de amostras em relação ao uso dos procedimentos amostrais definidos na estatística clássica. Com esta preocupação em mente, a amostragem casual simples poderia ser evitada, visto que existe a probabilidade de coletar amostras em locais similares, duplicando dessa forma a informação.

Ainda neste contexto, Libardi et al. (1986) descrevem que as coletas de amostras na estatística clássica são feitas ao acaso, ignorando-se a sua posição geográfica. Na geoestatística, os locais de amostragem são importantes porque se considera a dependência entre as medidas. Nesse sentido, a geoestatística é uma ferramenta que não pode ser ignorada, uma vez que é capaz de propiciar o desenvolvimento de tecnologia para a amostragem e descrever a variabilidade das propriedades do meio físico de um sistema, além de possibilitar a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem.

Teixeira et al. (2000), destacam a importância de se realizar uma coleta bem feita, pois quando a coleta de amostras de solo não é bem-sucedida, todo o trabalho posterior fica comprometido, seja por problemas de insuficiência numérica de amostras, seja pela sua baixa qualidade. Para determinar alguns dos parâmetros edafológicos (umidade,

fertilidade, granulometria, entre outros), o uso de amostras deformadas é suficiente, mas, em alguns casos, é necessário manter inalteradas as condições do solo “*in situ*”, ou seja, em sua estrutura natural, caso em que são absolutamente necessárias as amostras indeformadas.

Segundo Orlando Filho & Rodella (1983), cerca de 80% a 85% do erro total nos resultados usados na recomendação de fertilizantes e corretivos podem ser atribuídos à amostragem no campo e de 15% a 20% podem ser decorrentes do trabalho de laboratório. Daí a necessidade de um bom plano amostral.

Reichardt et al. (1986) consideraram que para obter dados representativos sobre suas características físicas, mecânicas e químicas, se faz necessário retirar grande número de amostras, o que dificulta a fase operacional da coleta, logo a necessidade de uma malha amostral adequada se faz necessária.

Segundo Trangmar et al. (1985), a ferramenta geoestatística permite descrever, com maior precisão, uma variável qualquer, não só por diminuir a variação aleatória a ela atribuída, mas também por definir a distância mínima entre as amostras para que possam ser consideradas independentes. Desta forma, a análise da variabilidade e da dependência espacial de uma variável é importante para subsidiar o planejamento de experimentos, bem como para avaliar os efeitos dos tratamentos por reduzir a variação experimental atribuída ao erro aleatório.

Conhecendo as coordenadas geográficas do ponto amostrado podem-se analisar os dados, possibilitando, segundo Vendrusculo (2001), representar a área com maior detalhamento. O nível de detalhamento é obtido por meio da distância entre pontos de amostragem e depende tanto da propriedade a ser analisada quanto da escala de trabalho, i.e., tamanho da área amostrada (Grego & Vieira, 2005).

Em experimentos realizados sob condições rigidamente controladas, como casa de vegetação e/ou laboratórios, é esperado que o coeficiente de variação (C.V.) seja baixo, geralmente menor que 5%. Mas para experimentos conduzidos sob condições onde não se pode ter um controle rígido o C.V. pode apresentar valores altos.

O semivariograma é definido como sendo a metade da diferença do quadrado entre valores da amostra numa dada distância “*lag space*” (variância), i.e.:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \{ \text{Var}[Z(t) - Z(t + h)]^2 \} \dots \dots \dots (1)$$

Segundo Guimarães (2001), a $\text{Var}[Z(t) - Z(t + h)]$ é a variância dos dados por uma distância h , mas, na expressão acima, esta variância está sendo dividida por dois, então se utiliza o prefixo “*semi*” para distinguir da variância e daí vem o nome semivariância para $\gamma(h)$ e semivariograma para o gráfico de $\gamma(h)$ em função de h .

A caracterização do semivariograma é dada pelo alcance da dependência espacial (a), que é a distância limite da dependência espacial, sendo que as medições realizadas a distâncias maiores que (a), tem distribuição aleatória e, portanto, são independentes entre si.

O Efeito Pepita (C_o) é o valor que revela a descontinuidade do semivariograma próximo à origem em distâncias menores do que a menor distância de amostragem (Vieira et al., 1983). Quando o Efeito Pepita (C_o) for aproximadamente igual ao Patamar ($C_o + C$), tem-se o efeito pepita puro, o que demonstra uma ausência total de dependência espacial (Tragmar et al., 1985).

Segundo Vieira et al. (1983), diferentes tipos de erros aleatórios ou sistemáticos, na obtenção das amostras e medidas das variáveis em intervalos inferiores ao de amostragem, geram uma descontinuidade na origem, denominada de efeito pepita (“*nugget effect*”). Um exemplo de semivariograma pode ser visto na Figura 1.

O Patamar ($C_o + C$), corresponde à variância da amostra (s^2) para dados estacionários. O patamar é, portanto, o ponto onde toda semivariância da amostra é de influência aleatória. Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras.

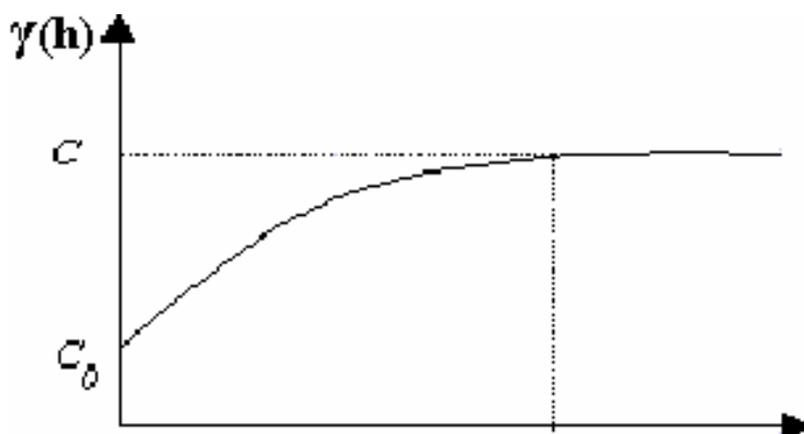


Figura 1. Semivariograma com efeito pepita, Ortiz (2002).

A letra minúscula “a” da Figura 1 é denominado de alcance, é a zona de influência da amostra. Ele marca a distância a partir da qual, para determinada variável, um ponto não tem influência sobre outro vizinho, ou seja, inicia-se a aleatoriedade para aquele atributo. Esse tipo de situação do semivariograma refere-se ao crescimento que tende até o patamar, que marca o valor da variância total da variável em estudo.

2.4. Influência dos atributos do solo na sua produtividade

Tendo como escopo a manutenção da produtividade do sistema agrícola, condições satisfatórias das propriedades físicas devem ser desenvolvidas, pois somente o uso de fertilizantes, melhoramento genético e medidas para controle de pragas e doenças, não preservarão a produtividade, se ocorrer uma degradação significativa das condições físicas (Oliveira et al., 1983).

Segundo Carpenedo & Mielniczuk (1990), a desagregação estrutural é evidenciada pelo aumento da densidade do solo, redução do tamanho dos agregados, da macroporosidade, da taxa de infiltração de água e do desenvolvimento radicular das plantas, vários pesquisadores desenvolveram pesquisas neste sentido, dentre eles destacam-se trabalhos desenvolvidos por Cintra (1980); Silva (1980); Machado & Brum (1978); D’Agostini (1981) e Dalla Rosa (1981).

O preparo do solo pela aração e gradagem e o uso subsequente de cultivares são realizados, na maioria das vezes, fora das condições ideais de umidade. Conseqüentemente, são esperadas modificações nas propriedades físicas, prejudicando a capacidade produtiva do solo (Byrnes et al., 1982). As modificações que sofrerá a estrutura serão diferentes de solo para solo e, no mesmo solo, serão diferentes com a variação do equipamento empregado e da intensidade de seu preparo. Os efeitos serão na diminuição da infiltração das águas de chuva, aumentando o escoamento superficial e possibilitando maior erosão (Lal, 1979).

Quando o solo passa de uma condição natural, mato ou campo nativo, para o cultivo anual, ocorrem modificações nas propriedades físicas, sendo estas mais afetadas quanto maior a intensidade de preparo do solo. As principais alterações são evidenciadas pela diminuição de macroporos, tamanho dos agregados, taxa de infiltração de água e aumento da densidade do solo (Souza & Cogo, 1978; Dalla Rosa, 1981; Machado et al., 1981; Reinert et al., 1984; Ros et al., 1997).

Conforme Kiehl (1979), quanto mais elevada for a densidade do solo maior será seu grau de compactação, menor será sua estruturação, menor sua porosidade total e, conseqüentemente, maiores serão as restrições para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Archer e Smith (1972), relatam que a densidade do solo é uma importante propriedade para avaliação das condições de campo, além de ser um elemento indispensável para o cálculo da porosidade total do solo, para conversão de expressão de conteúdo de água, auxiliar na avaliação da estrutura, e que mudanças em seu valor afetam a água disponível, a capacidade de aeração do solo, a sua taxa de drenagem e a penetração de raízes das plantas. Existem, atualmente, três metodologias para a determinação deste atributo, a saber: metodologia do anel ou cilindro volumétrico, do torrão impermeabilizado e da proveta.

O aumento da densidade implica em efeitos desfavoráveis que causam impedimento físico no desenvolvimento radicular e restringem o movimento da água e do ar ao longo do perfil, por conseguinte intensificam a erosão dos solos. Todas essas restrições geram limitações no uso e manejo com implicações na diminuição da produtividade e impactos negativos no ambiente (Silva et al., 1998).

2.5. Caracterização físico-hídrica do solo

Segundo Jorge & Prado (1988), a caracterização físico-hídrica do solo é essencial para nortear as práticas de manejo do mesmo, destacando-se irrigação, drenagem, cultivos e subsolagem. As duas características físicas responsáveis pela porosidade que atuam de forma mais decisiva na economia da água no solo são a textura e a estrutura. O conhecimento do movimento de água dentro do perfil de um solo é de fundamental importância para a solução de problemas envolvendo irrigação, drenagem, armazenamento e transporte de água e de nutrientes, bem como o controle da infiltração e escoamento superficial, responsável pela erosão (Pauletto et al., 1988).

Kutilek & Nielsen (1994) apontam que amostras perturbadas não podem ser utilizadas para caracterizar as propriedades hidráulicas do solo. Os dados obtidos são inúteis, mesmo aqueles obtidos de amostras de solos arenosos e homogêneos. Na prática, porém, observa-se que toda coleta de solo causa alguma perturbação em seu arranjo poroso.

Várias têm sido as propostas para medir a retenção da água no solo, estas propriedades são relativamente difíceis de serem medidas (Dirksen, 1999). Os

parâmetros do modelo muitas vezes tornam-se impossíveis de medirem diretamente, devido ao tempo, aos recursos financeiros, à instrumentação, à escala e às restrições conceituais (Abbaspour et al., 2001). Em procedimentos básicos de laboratório, a retenção da água é medida em amostras em equilíbrio e a condutividade hidráulica do solo não saturado é medida em amostras onde é estabelecido um fluxo estacionário (American Society of Agronomy, 1982). Vários métodos são sugeridos para inferir propriedades hidráulicas do solo de dados obtidos em fluxo não-estacionários.

Naime (2001) relata a importância dos macroporos nos processos solo-planta-raízes. Tais processos têm movimentado pesquisadores a descrever tamanhos e formas (Perret et al., 1999). A definição de macroporo pode parecer simples. No entanto, sua definição se torna nebulosa e ambígua. Não há consenso entre os pesquisadores quanto à definição das faixas de tamanho de poros em função de sua dimensão. Para classificar os poros, a grandeza utilizada é o diâmetro do cilindro equivalente (ECD), derivado da área de seção transversal assumida como sendo circular. Perret et al. (1999) adotaram a definição proposta por Luxmoore et al. (1990): “O termo macroporo inclui todos os poros em um perfil que, geralmente, são drenados até a capacidade de campo, com diâmetro equivalente maior ou igual a 1 mm”.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da área e do solo em estudo

A área experimental fica localizada no *Campus do Pici*, pertencente à Universidade Federal do Ceará e está a 60 m da estação meteorológica do Centro de Ciências Agrárias, com uma dimensão de 20 x 20 m. O experimento foi conduzido no município de Fortaleza, durante o período de agosto a dezembro de 2006. As coordenadas geográficas do primeiro ponto são 3° 44'39,7" de latitude S e os meridianos de 38°34'51,1" de longitude W.Grw (de Greenwich), numa altitude de 19,6 m referenciada pelo nível do mar.

De acordo com a classificação de Wilhelm Köppen (1918), o clima é do tipo Aw' e C₂W₂A'a'; Segundo a classificação de Thornthwaite (1948). Trata-se de uma região pertencente ao grupo de clima tropical chuvoso, com temperatura média do mês mais frio maior ou igual a 18°C. Os índices pluviométricos apresentam uma média anual de 1.390 mm, sendo a precipitação do mês mais seco menor que 30 mm, onde a época mais seca ocorre no inverno e o máximo de chuvas ocorre no outono e a temperatura média anual é de 26,5°C.

O solo foi classificado como um Podzólico Vermelho Amarelo equivalente eutrófico abrupto A moderado textura franco argilo-arenosa (Coelho & Mota, 1978), o que corresponde a um Argissolo Amarelo Eutrófico abrupto, textura arenosa/média, A moderado, mesoeutrófico (PAe) no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Embrapa, 2006), um “*Alfisol*” pelo Sistema Norte Americano de Classificação

de Solos – *Soil Taxonomy* (Buol et al., 1997), e como um “*Lixissolo*” pelo Sistema de Classificação da FAO-UNESCO (1997), com declividade média determinada pelo clinômetro de ABNEY de 3%. A área encontrava-se em pousio coberta apenas por plantas ruderais, por exemplo, salsa (*Mimosa pudica* L), carrapicho (*Cenchrus equinatus*), pé-de-galinha (*Eleusine indica*), tiririca (*Cyperus rotundus* L.), dentre outras. Antes do pousio, a referida área foi cultivada com a cultura do melão (*Cucumis melo* L.).

3.2. Metodologia

3.2.1 Trabalhos no campo

A área selecionada foi demarcada com piquetes e barbante (Figura 2), de maneira que à distância entre um ponto e outro fosse de 2,5 metros, totalizando 81 pontos em uma área com dimensão de 400 m² (20 x 20 m) (Figura 3).



Figura 2. Demarcação da área.

Em cada ponto foram realizadas duas coletas de solo, com estrutura deformada e indeformada (natural), sendo esta última realizada com o amostrador de Uhland e anéis volumétricos de aço inox com volume de 50 cm³, em duas profundidades, sendo a primeira de 0-0,2 m (camada que sofre influência do implemento agrícola) e a segunda de 0,2-0,4 m (camada sem influência

do implemento agrícola), totalizando 162 amostras; as amostras com estrutura natural foram utilizadas nas determinações de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e curva de retenção de umidade. As amostras com estrutura deformada foram usadas nas determinações de granulometria, argila dispersa em água (argila natural), grau de floculação, densidade das partículas e determinação de umidade no aparelho extrator de Richards; paralelamente, foram realizadas análises de agregados, no tocante a sua estabilidade, com torrões previamente separados no campo.

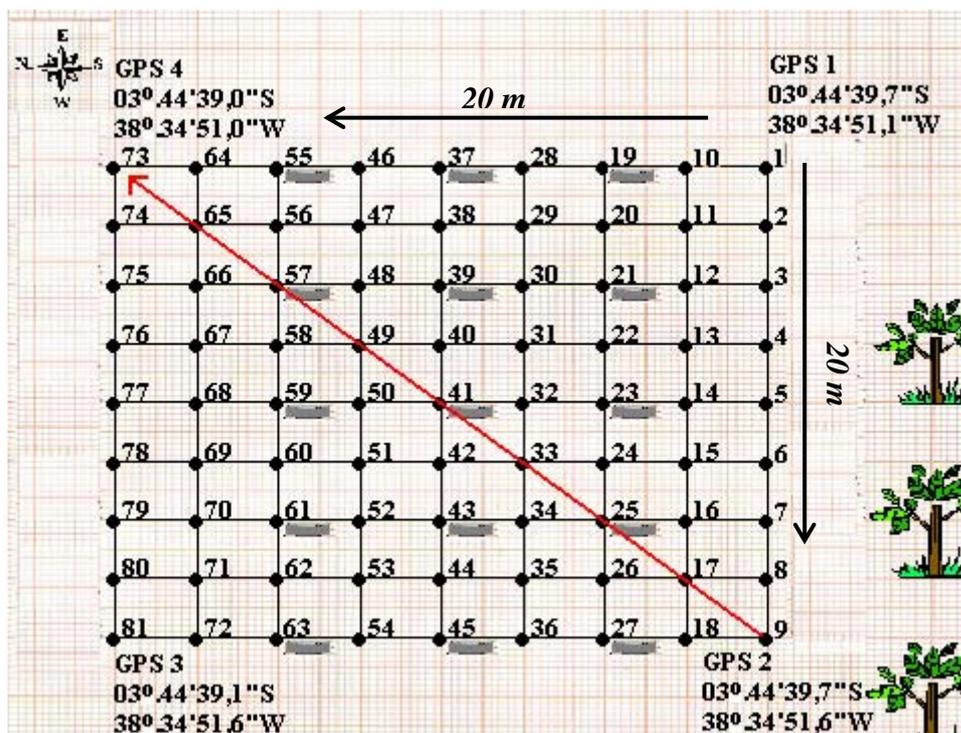


Figura 3. Croqui da área experimental destacando-se os pontos onde foram realizadas as coletas de solo.

Todas as amostras coletadas em campo foram devidamente identificadas com etiquetas e acondicionadas adequadamente para o encaminhamento ao Laboratório de Física do Solo, do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará.

3.2.2 Trabalhos realizados em laboratório

3.2.2.1 Análises físicas

Toda metodologia utilizada neste trabalho para as determinações físicas das amostras de solo está baseada na literatura pertinente.

Densidade do solo

Para determinação da densidade do solo, neste trabalho, utilizou-se a metodologia do anel volumétrico conforme Blake & Hartge (1986). Após a aplicação das tensões usadas para determinação do espaço intersticial do solo, as amostras foram secas em estufa a uma temperatura de 105° C até peso constante, depois foram levadas ao dessecador para esfriar e posterior pesagem em balança com duas casas decimais.

A densidade do solo é definida como a relação entre a massa do solo seco e o volume total do solo (volume do espaço ocupado pelas partículas sólidas mais o espaço poroso).

Foi calculada pela fórmula:

$$\rho_s \text{ (Mg/m}^3\text{)} = \frac{\textit{peso do solo seco 105}^\circ\text{C(g)}}{\textit{volume total do solo(cm}^3\text{)}} \dots\dots\dots(2)$$

Densidade das partículas

É definida como a relação entre a massa total das partículas sólidas de uma determinada amostra de solo e o volume ocupado exclusivamente por essas partículas. É de grande importância no cálculo da porosidade total e da velocidade de sedimentação.

A densidade das partículas foi determinada seguindo a metodologia do balão volumétrico que consiste na determinação do volume de álcool etílico gasto para aferir um balão de 50 mL com 0,02 kg de terra fina seca ao ar (TFSA) em seu interior (Blake & Hartge, 1986). Para tal, foram pesados 0,02 kg de solo, colocado em lata de alumínio de peso conhecido e levado à estufa a uma temperatura de 105° C até peso constante. Depois, levou-se ao dessecador e em seguida, transferiu-se o conteúdo de solo para o interior do balão com o auxílio de um funil. Aferiu-se com álcool etílico até a ausência de bolhas de ar e anotou-se o volume gasto na bureta de 50 mL.

Foi calculada pela fórmula:

$$\rho_p \text{ (Mg/m}^3\text{)} = \frac{\textit{massa do solo seco a 105}^\circ\text{C(g)}}{50 - (\textit{volume gasto de álcool(mL)})} \dots\dots\dots(3)$$

Porosidade total

Caracteriza o espaço apenas em relação ao volume total de poros do solo. Algumas técnicas já foram testadas e usadas na determinação da porosidade de vários materiais porosos, porém apenas poucas delas foram adequadamente avaliadas e aceitas para uso em solo (Danielson & Sutherland, 1986).

A porosidade total (volume total de poros - VPT) foi calculada usando-se volumes da densidade do solo e da densidade das partículas, através da equação proposta por Vomocil (1965):

$$\alpha = 1 - \left(\frac{\rho_s}{\rho_p}\right) \dots \dots \dots (4)$$

Em que:

α - porosidade total

ρ_s - densidade do solo

ρ_p - densidade das partículas

Microporosidade e Macroporosidade

A microporosidade foi determinada pela mesa de tensão, mediante a aplicação de uma tensão correspondente a 0,006 MPa sobre as amostras saturadas, até que a água que ocupava os macroporos ($\phi > 50 \mu\text{m}$) fosse drenada. Em seguida, as amostras foram pesadas e levadas à estufa a 105 °C até peso constante (após a última tensão 0,009 MPa) e, por diferença de massa de água, foi estimado o percentual de microporos. A macroporosidade foi calculada indiretamente, pela diferença entre a porosidade total e microporosidade, como se segue:

$$\text{Macroporosidade} = \text{Porosidade Total}(\text{m}^3 \text{ m}^{-3}) - \text{Microporosidade}(\text{m}^3 \text{ m}^{-3}) \dots \dots \dots (5)$$

Umidade obtida através da mesa de tensão

Utilizou-se a mesa de tensão para baixas tensões. As amostras com estrutura natural foram previamente saturadas, por um período de 24 horas, para serem levadas à mesa de tensão, onde se aplicaram diferentes tensões, a saber: 0,0009 MPa, 0,006 MPa (microporosidade) e 0,009 MPa, para a elaboração da curva característica de retenção de umidade do solo. Calculou-se a umidade em base de volume:

$$\text{Umidade } (\theta) = \frac{\text{Volume de água } (\text{m}^3)}{\text{Volume total da amostra } (\text{m}^3)} \dots \dots \dots (6)$$

Umidade obtida através do aparelho extrator de Richards

Foi determinada com o aparelho extrator de Richards, o qual permitiu a utilização de tensões mais elevadas. Para este trabalho utilizaram-se as tensões de 0,033 MPa, o que corresponde à capacidade de campo (CC) e 1,5 MPa o que corresponde ao ponto de murcha permanente (PMP).

Para esta determinação foram usadas quatro placas de cerâmicas porosas, duas de 1 Bar e duas de 15 Bar, para as tensões de 0,033 e 1,5 MPa, respectivamente. As placas foram saturadas por um período de 48 horas e em seguida dispuseram-se as amostras de solo, com estrutura deformada, em anéis de borracha para saturação por um período de 24 horas (Figura 4). Levou-se ao extrator para que as tensões fossem admitidas de forma gradativa.

A exemplo da umidade calculada pelo método da mesa de tensão, aqui também foi calculada com base em volume.



Figura 4. Aplicação das tensões de 0,033 MPa (a) e 1,5 MPa (b) no aparelho extrator de Richards, respectivamente.

Análise granulométrica e argila dispersa em água

É a medida da distribuição por tamanho das partículas individuais de uma amostra de solo. É de suma importância, pois indica o risco de erosão, disponibilidade de água para as plantas, o uso econômico de adubos, a mecanização adequada e qual a cultura a ser implantada.

A análise granulométrica foi determinada pelo método da pipeta, descrita por Day (1965), que se baseia na velocidade de queda das partículas e dispersão química com solução normal de hidróxido de sódio (NaOH), com agitação mecânica de 12.000 rpm (“*stirrer*”) e escala textural do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), com dispersão de 0,02 kg de TFSA.

As areias foram separadas por peneiramento em tamis de malha de 0,053 mm de diâmetro, segundo a classificação granulométrica do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. O silte e argila foram separados por sedimentação das partículas com diâmetro igual ou inferior a 0,053 mm, conforme a Lei de Stokes. A argila dispersa em água foi determinada pela mesma metodologia, com exceção do hidróxido de sódio (dispersante químico). A classificação textural foi determinada seguindo o sistema adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (Santos et al., 2005).

Grau de floculação

É a relação entre a argila naturalmente dispersa e a argila total, obtida após a dispersão. Indica a proporção da fração argila que se encontra floculada.

O grau de floculação foi determinado pela equação:

$$GF = \left[\frac{\text{argila dispersa em água (g kg}^{-1}\text{)}}{\text{argila total (g kg}^{-1}\text{)}} \right] \dots\dots\dots(7)$$

Estabilidade dos agregados

Estabilidade de agregados é a resistência que os mesmos apresentam referente às forças desintegradoras da água, ar e manipulação mecânica do solo.

A análise de agregados foi determinada por via úmida, onde foram realizados testes para determinação da sua estabilidade. Para esta determinação, adotou-se a técnica descrita por Kemper & Rosenau (1986) e Yoder (1936). Os torrões coletados em campo passaram por um processo mecânico de peneiramento, onde passavam por uma peneira com 8,00 mm de abertura de malha e coletavam-se os agregados na peneira de 4,76 mm. Em seguida, os agregados eram pesados em subamostras de 0,025 kg e umedecidos com jatos intermitentes de água sob pressão. Após um período de 24 h os agregados foram levados para o oscilador vertical, também conhecido como aparelho de Yoder, com frequência de 32 oscilações por minuto, composto por dois conjuntos de peneiras com malhas 2,0, 1,0, 0,50 e 0,25 mm de abertura nas quais ficam retidos agregados estáveis. O teor de agregados retidos em cada peneira foi expresso em cinco classes de diâmetro, a saber: 4,76-2,00 mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,50 mm, 0,50-0,25 mm e < 0,25 mm.

A estabilidade dos agregados foi determinada pela equação:

$$\text{Agregados estáveis} = \left(\frac{a - b}{c - (\Sigma b)} \right) \dots\dots\dots (8)$$

Em que:

a - peso do agregado seco a 105° C

b - peso das areias secas a 105° C

c - peso da amostra tomada para análise

3.2.2.2 Análises estatísticas e geoestatísticas

Os dados foram submetidos à estatística descritiva, onde se determinou os valores máximos e mínimos, média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação (C.V.), número de variáveis, assimetria e curtose.

Com o programa estatístico “Stat” (STATISTICA, 1999), aplicou-se o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (K-S), a 5% de significância e as variáveis que não apresentaram distribuição de frequência normal foram realizadas transformações logarítmicas.

Para a validação da normalidade dos dados foram tomadas em consideração as medidas de posição (média e mediana) e assimetria. Para ratificar a validação foi aplicado um teste desenvolvido por Morcillo (2004), no qual é levado em consideração o $d_{\text{experimental}}$, obtido quando do teste de normalidade e o $d_{\text{crítico}}$, obtido através da equação:

$$d_{\text{crítico}} = 1,36 (n_1 + n_2 / n_1 \times n_2)^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

Em que, para o número de amostras do trabalho, considera-se $n_1 = n_2 = 100$. Se, $d_{\text{experimental}} \geq d_{\text{crítico}}$, os dados não seguiram distribuição normal, sendo necessário transformá-los e caso $d_{\text{experimental}} < d_{\text{crítico}}$ os dados apresentaram uma distribuição normal e já se pôde aplicar a geoestatística com os dados exatamente com estavam.

Posteriormente, os dados foram submetidos a geoestatística. Para cada variável, foram determinados, modelo sugerido, classe espacial de dependência, efeito pepita (Co), patamar (Co+C), alcance e efeito pepita relativo (*nugget ratio*), usando

semivariogramas, confeccionados com o auxílio do *software* GS+ “*Geostatistical for Environmental Sciences*”, versão 5.0.3 Beta (Robertson, 1998). Com este programa foram construídas a estrutura do semivariograma e todos os seus dados. O efeito pepita é o fator observado para o grau de dependência; quanto mais próximo ele estiver da origem, maior será o grau de dependência. A classificação do grau de dependência espacial foi feita com base na razão entre o efeito pepita e o patamar (variância total), sendo considerada forte se a razão for $\leq 0,25$, moderada quando $> 0,25$ e $<$ que $0,75$, fraca se $\geq 0,75$ e $<$ que 1 e independente se a razão for igual a 1 (Guimarães, 2001). O alcance foi utilizado para observar a dependência espacial das variáveis estudadas.

O modelo utilizado foi sugerido pelo programa estatístico baseado na regressão e na soma dos quadrados dos resíduos, traçou-se a curva para os quatro modelos (linear, exponencial, gaussiano e esférico) e o que apresentou um patamar mais claro e definido e um menor erro foi sugerido.

Em seguida, foi realizada a interpolação dos dados para observar a distribuição da variabilidade espacial das variáveis estudadas na área, a este processo dá-se o nome de krigagem. É a partir dele que se produziu os mapas de superfície com o programa SURFER 8.0 (Golden Software, 2006).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Estatística clássica (distribuição de frequência)

Para que se possa utilizar as técnicas, tanto da estatística de Fisher como a técnica das variáveis regionalizadas, também denominada de geoestatística, se faz necessário que os dados brutos, depois de tabulados e organizados, apresentem uma distribuição de frequência normal, isto é, que as medidas de posição média, mediana e moda coincidam ou, pelo menos, cheguem a uma proximidade.

No entanto, não apenas as medidas de posição média e mediana foram utilizadas para a validação da hipótese de normalidade dos dados. Para tal validação, baseou-se em Souza et al. (2004a) que apontaram os valores de assimetria como indicativo de normalidade. Outro fator observado, quando da aplicação do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov numa significância de 0,05, foi o $d_{\text{experimental}}$ que comparado com o $d_{\text{crítico}}$ calculado, reforçou ou rejeitou a hipótese de normalidade. O $d_{\text{crítico}}$ calculado foi de 0,192.

Para a granulometria do solo (Tabela 1 e Tabela 2), as variáveis analisadas apresentaram distribuição normal, com exceção do grau de floculação na profundidade de 0-0,2 m e do silte na profundidade 0,2-0,4 m, por isso, eles foram transformados usando transformações logarítmicas antes do cálculo da semivariância. Os fatores observados para a determinação da distribuição não normal destes atributos foram o valor do $d_{\text{experimental}}$, para o grau de floculação, que foi de 0,203 e a assimetria e o valor do $d_{\text{experimental}}$, 6,79 e 0,240, respectivamente, para o silte.

O coeficiente de variação, geralmente expresso em percentagem, dá idéia da magnitude de variabilidade dos dados, porém nada informa quanto à estrutura de dependência espacial das propriedades do solo, o que só é possível através de técnicas geoestatísticas. Para esta pesquisa, a variabilidade dos dados foi classificada de acordo com os critérios propostos por Warrick & Nielsen (1980), que consideram os valores do coeficiente de variação entre 12% e 60% como média variabilidade e os valores abaixo e acima deste intervalo como baixa e alta variabilidade, respectivamente. Neste sentido, as variáveis areia, grau de floculação, densidade do solo, densidade das partículas, porosidade total e microporosidade para ambas profundidades apresentaram um C.V. abaixo de 12% (Tabela 1, Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4), sendo considerado, portanto, como baixa variabilidade; as demais variáveis apresentaram C.V. entre 12-60%.

Ao analisarem a variabilidade espacial de atributos físicos do solo, Nielsen et al. (1973) concluíram que, para as variáveis argila, areia e densidade do solo, na camada superficial do solo, os dados apresentavam uma distribuição normal. Segundo os mesmos autores, em uma área de 150 ha com 120 pontos de amostragem, foi obtido um coeficiente de variação (C.V.) para argila, silte e areia de 42%, 22% e 17%, respectivamente.

Os dados obtidos para as mesmas variáveis citadas acima obtiveram o mesmo comportamento decrescente para a camada superficial. No presente trabalho os C.V. para a camada de 0-0,2 m, foram, para argila, silte e areia, de 22,78%, 17,81% e 3,79%, respectivamente. Observam-se menores valores quando comparado com os dos autores citados, isto pode ser atribuído à diferença de tamanho da área de estudo, quase quatro mil vezes maior que a do presente trabalho, ao tipo de solo e as amostras retiradas, pois, devido à mecanização da área, pode-se ter retido amostras do horizonte superficial como de horizontes de transição.

Observou-se um incremento nos teores de argila de quase 69% da camada superficial para a subsuperficial, em valores passou de 126 g kg⁻¹ para 212 g kg⁻¹, nos teores de silte de 1,59% (63 g kg⁻¹ para 64 g kg⁻¹) e um decréscimo para variável areia na ordem de 10,7%, passando de 809 g kg⁻¹ para 722 g kg⁻¹. Isso se refletiu na classificação textural que passou de franco arenosa para franco argilo-arenosa. Outro aspecto interessante sobre as argilas é que no solo ocorra predominância de argilas do tipo 1:1, provavelmente caulinita, pois este argilomineral é o principal constituinte da fração argila dos solos dos Tabuleiros (Romero & Lima, 2004). Reforçando, a relação silte/argila, responsável pelo grau de intemperismo, foi de 0,50 e 0,30, nas

profundidades de 0-0,2 e 0,2-0,4 m, respectivamente, além da densidade das partículas do solo, muito próxima deste mineral de argila.

O comportamento das variáveis argila dispersa em água (natural) e do grau de floculação foram inversamente proporcionais, ou seja, a argila floculada diminuiu com a profundidade, logo os valores de argila naturalmente dispersa no solo tenderam a aumentar.

Os histogramas das variáveis granulométricas podem ser observados na Figura 5 e Figura 6.

Tabela 1. Parâmetros para os atributos físicos do solo: areia, silte, argila total, argila dispersa em água, grau de floculação para profundidade de 0-0,2 m.

Parâmetros	ATRIBUTOS				
	Areia	Silte	Argila g kg ⁻¹	Argila Dispersa em Água	Grau de Floculação
Média	809,00	63,00	126,00	15,00	876,00
Mediana	815,00	61,00	121,00	12,00	904,00
Desvio Padrão	30,74	11,35	28,80	8,08	71,32
C.V. (%) ^a	3,79	17,81	22,78	54,28	8,13
Mínimos	720,00	42,00	77,00	01,00	702,00
Máximos	859,00	98,00	205,00	40,00	992,00
Curtose	0,80	0,69	0,16	0,81	-0,49
Assimetria	-1,02	0,93	0,66	1,07	-0,88
d ^b	0,10	0,13	0,07	0,16	0,20

^a Coeficiente de variação.

^b d experimental.

Tabela 2. Parâmetros para os atributos físicos do solo: areia, silte, argila total, argila dispersa em água, grau de floculação para profundidade de 0,2-0,4 m.

Parâmetros	ATRIBUTOS				
	Areia	Silte	Argila g kg ⁻¹	Argila Dispersa em Água	Grau de Floculação
Média	722,00	64,00	212,00	51,00	756,00
Mediana	737,00	60,00	197,00	48,00	759,00
Desvio Padrão	49,64	20,94	43,48	15,15	51,22

Tabela 2, Cont

Parâmetros	ATRIBUTOS				
	Areia	Silte	Argila	Argila Dispersa em Água	Grau de Flocculação
	g kg ⁻¹				
C.V. (%) ^a	6,87	32,50	20,42	29,38	6,76
Mínimos	573,00	46,00	137,00	13,00	622,00
Máximos	801,00	233,00	348,00	98,00	639,00
Curtose	1,05	54,70	0,76	1,35	1,80
Assimetria	-1,03	6,79	0,93	0,80	0,36
d ^b	0,12	0,24	0,16	0,11	0,05

^a Coeficiente de variação.

^b d experimental.

No tocante a densidade do solo, densidade das partículas, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e umidade obtida mediante o aparelho extrator de Richards, nas tensões de 0,033 e 1,5 MPa, todas apresentaram distribuição de frequência normal. Em todos os casos as medidas de posição foram iguais ou muito próximas (Tabelas 3 e 4).

Foi observado neste trabalho que, a variável densidade do solo apresentou uma distribuição de frequência normal e um baixo coeficiente de variação, o mesmo foi reportado por Kiliç et al. (2004), trabalhando em dois Neossolos Flúvicos na Turquia. Cruz (2005), em trabalho conduzido num Argissolo cultivado com cana-de-açúcar, encontrou o mesmo comportamento para referida variável.

Segundo Kiehl (1979), para as condições dos solos das regiões tropicais, a densidade do solo deve estar entre 1,1 a 1,6 Mg m⁻³. Os dados mostram que, esta variável está no limite superior, sendo de 1,69 Mg m⁻³ para profundidade de 0-0,2 m e 1,65 Mg m⁻³ para profundidade de 0,2-0,4 m, observa-se ainda, que houve um pequeno decréscimo com o incremento da profundidade. Isto pode ser um indicativo do início da formação de uma camada endurecida na superfície, provavelmente do intenso maquinário agrícola que trafega naquela área quando do início ou final de experimentos que lá são conduzidos.

O mesmo aconteceu com a densidade das partículas, tendo uma diminuição de 2,62 Mg m⁻³ para 2,59 Mg m⁻³. Na realidade os valores de densidade das partículas eram esperados, pois estão relacionados com a mineralogia do solo e este atributo é bastante estático. Em solos tropicais há uma predominância de quartzo e feldspatos e a

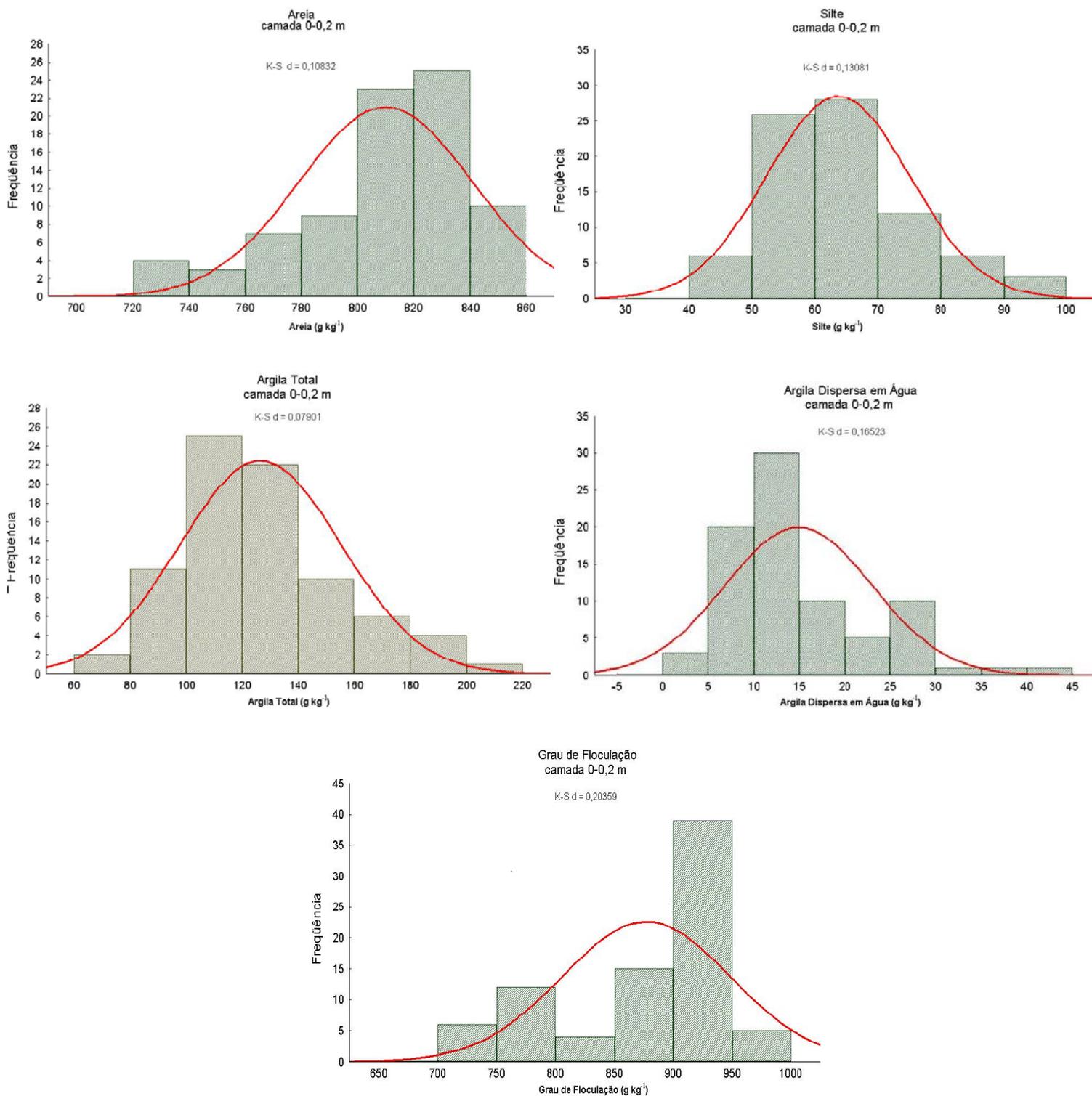


Figura 5. Histogramas relacionados às propriedades areia, silte, argila total, argila dispersa em água e grau de flocculação na profundidade de 0-0,2 m.

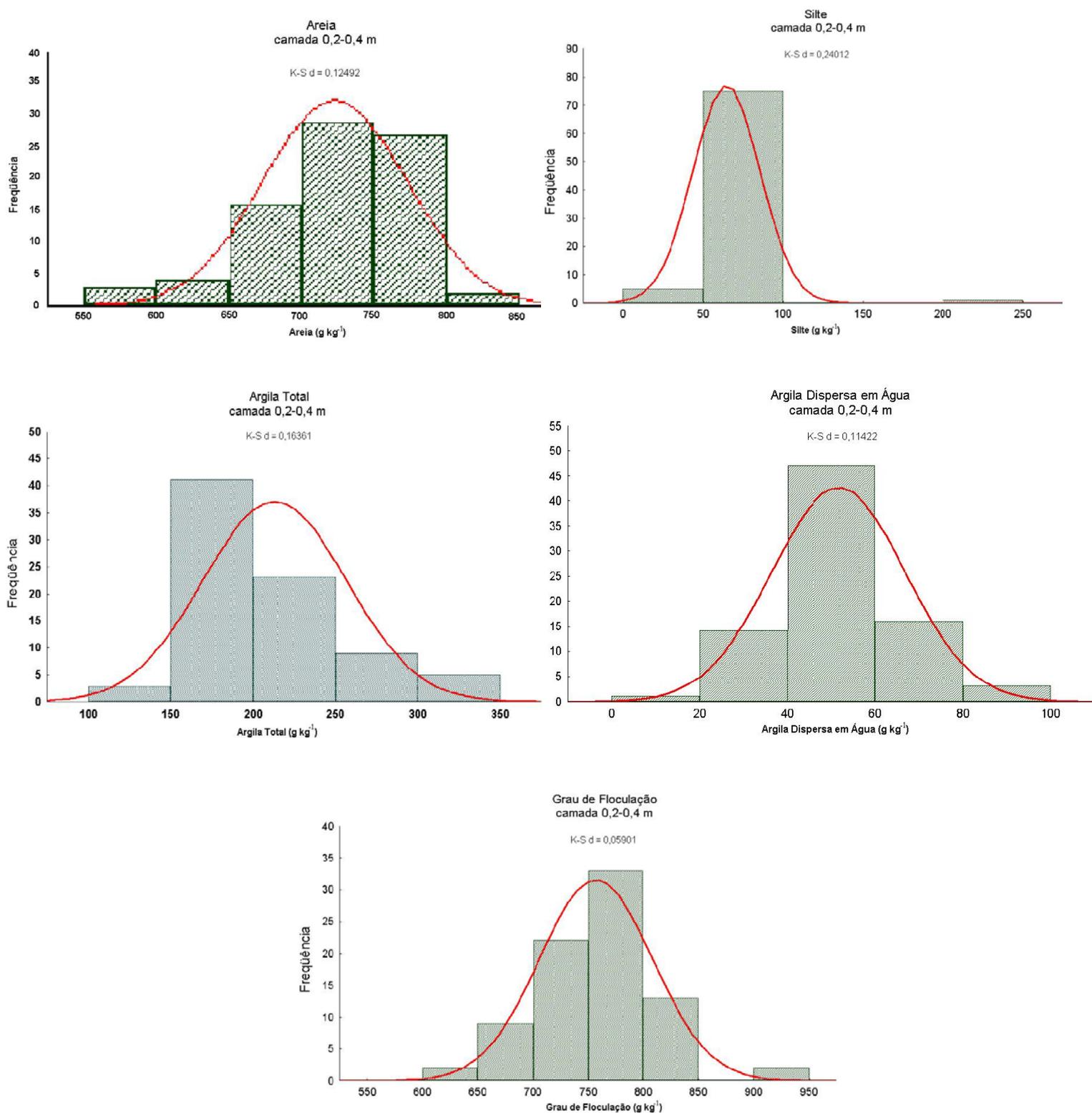


Figura 6. Histogramas relacionados às propriedades areia, silte, argila total, argila dispersa em água e grau de flocação na profundidade de 0,2-0,4 m.

Tabela 3. Parâmetros para os atributos físicos do solo: densidade do solo, densidade das partículas, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e umidade 0,033 MPa e 1,5 MPa para profundidade de 0-0,2 m.

ATRIBUTOS							
Parâmetros	Densidade		Porosidade			Umidade	
	Solo	Partículas	Total	Macro	Micro	0,033 MPa	1,5 MPa
	Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³	m ³ m ⁻³		m ³ m ⁻³	
Média	1,69	2,62	0,35	0,15	0,19	0,11	0,06
Mediana	1,70	2,61	0,35	0,15	0,19	0,10	0,06
Desvio Padrão	0,06	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01
C.V. (%) ^a	3,68	1,58	7,11	24,85	11,53	20,20	22,75
Mínimos	1,44	2,49	0,30	0,08	0,13	0,06	0,03
Máximos	1,80	2,69	0,44	0,26	0,24	0,19	0,11
Curtose	3,30	0,27	2,03	0,66	-0,20	1,20	1,06
Assimetria	-1,40	-0,52	1,02	0,77	-0,23	0,44	1,02
d ^b	0,10	0,15	0,07	0,08	0,06	0,07	0,11

^a Coeficiente de variação.

^b d experimental.

Tabela 4. Parâmetros para os atributos físicos do solo: densidade do solo, densidade das partículas, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e umidade 0,033 MPa e 1,5 MPa para profundidade de 0,2-0,4 m.

ATRIBUTOS							
Parâmetros	Densidade		Porosidade			Umidade	
	Solo	Partículas	Total	Macro	Micro	0,033 MPa	1,5 MPa
	Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³	m ³ m ⁻³		m ³ m ⁻³	
Média	1,65	2,59	0,36	0,13	0,23	00,15	0,09
Mediana	1,65	2,58	0,35	0,12	0,22	00,14	0,09
Desvio Padrão	0,06	0,04	0,02	0,03	0,02	00,03	0,02
C.V. (%) ^a	4,01	1,89	7,24	28,98	11,14	22,44	22,36
Mínimos	1,45	2,50	0,30	0,06	0,17	00,10	0,05
Máximos	1,81	2,69	0,45	0,23	0,29	00,23	0,15
Curtose	0,56	-0,86	1,58	-0,37	-0,39	-0,4	-0,13
Assimetria	-0,42	0,06	0,71	0,36	0,33	00,70	0,59
d ^b	0,04	0,11	0,08	0,08	0,07	0,13	0,09

^a Coeficiente de variação.

^b d experimental.

densidade desses minerais gira em torno de 2,5-2,65 Mg m⁻³ (Kiehl, 1979). Em decorrência deste caráter estático, este atributo apresentou o menor C.V., sendo de 1,58% para camada de 0-0,2 m e 1,89% para a camada de 0,2-0,4 m. O mesmo resultado foi encontrado por Cruz (2005), trabalhando num solo de mesma ordem. Afora isso, observou-se que a densidade das partículas apresentou, devido este caráter, o menor coeficiente de assimetria de todas as variáveis analisadas, sendo de 0,06 para camada de 0,2-0,4 m (Figura 9).

A porosidade total se manteve praticamente a mesma nas duas profundidades. No entanto, os poros com maior diâmetro ($\phi > 50 \mu\text{m}$) apresentaram uma diminuição em seu volume, passaram de 0,15 m³ m⁻³ para 0,13 m³ m⁻³. Os microporos, ao contrário, aumentaram seu volume com o incremento da profundidade, passaram de 0,19 m³ m⁻³ para 0,23 m³ m⁻³. Este comportamento pode estar relacionado com o aumento no teor de argila, além de compressões mecânicas que a área vem recebendo, diminuindo assim sua porosidade de aeração e aumentado, evidentemente, a microporosidade, tanto para uma camada como para a outra.

Com a diminuição da macroporosidade e com o aumento da microporosidade na camada subsuperficial, observou-se um maior acúmulo de água na camada de 0,2-0,4 m de profundidade, que passou de 0,11 m³ m⁻³ para 0,15 m³ m⁻³, na tensão da capacidade de campo (0,033 MPa) e 0,06 para 0,09 m³ m⁻³, na tensão do ponto de murcha permanente (1,5 MPa).

Os histogramas para estas variáveis podem ser apreciados na Figura 7, Figura 8, Figura 9 e Figura 10.

Para estabilidade dos agregados, verificou-se que os C.V. foram, em geral, os mais elevados se comparado com as demais variáveis estudadas (Tabela 5 e Tabela 6). No entanto, sua variação foi classificada como média, tendo seu valor máximo de 52,50%, correspondente aos agregados com diâmetro 0,5-0,25 mm, na profundidade de 0-0,2 m. Valores semelhantes foram encontrados por Souza et al. (2004b), que encontraram C.V. médios para as mesmas variáveis, concordando com estes resultados estão os encontrados por Sá et al. (2000).

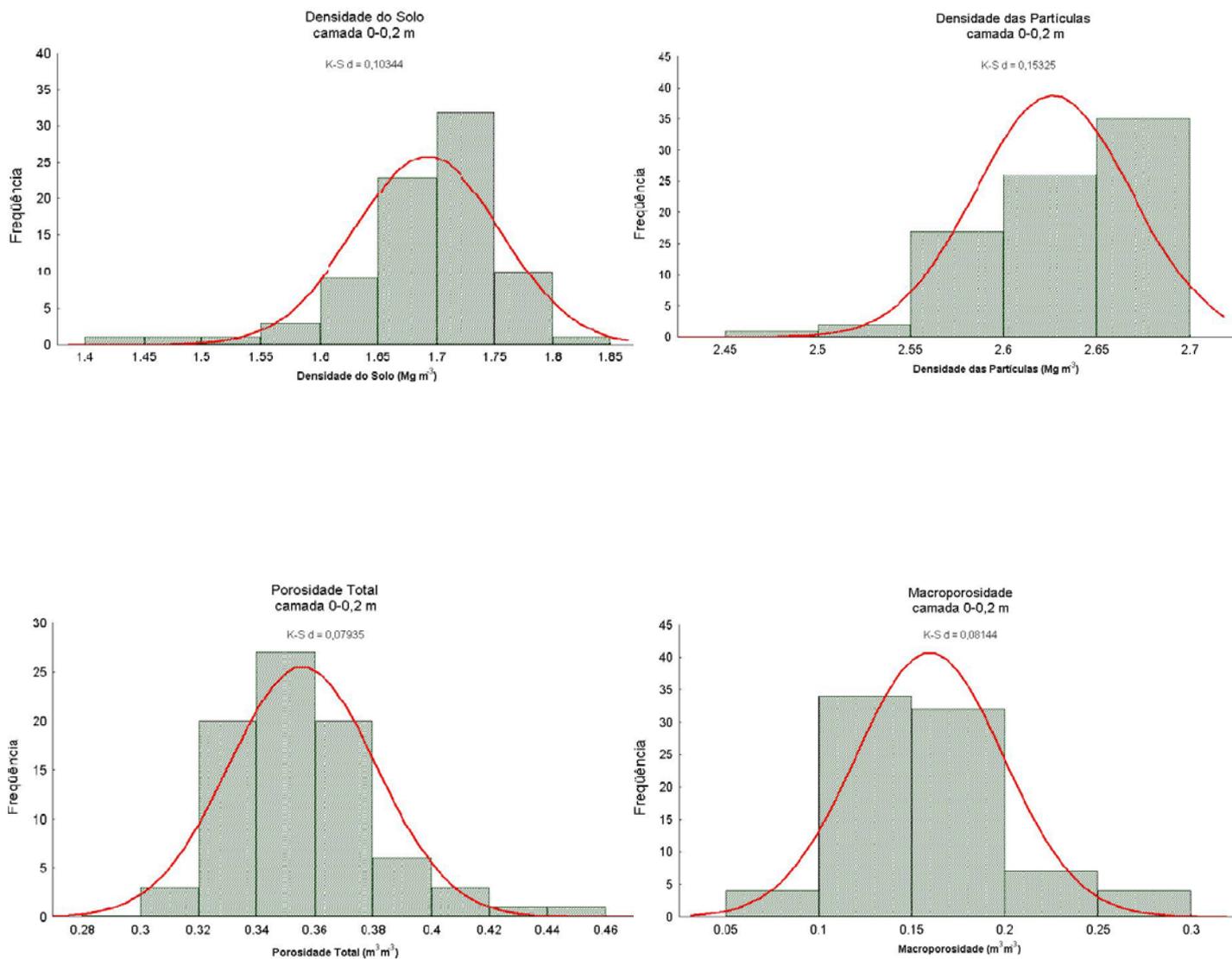


Figura 7. Histogramas relacionados às propriedades densidade do solo, densidade das partículas, porosidade total e macroporosidade na profundidade de 0-0,2 m.

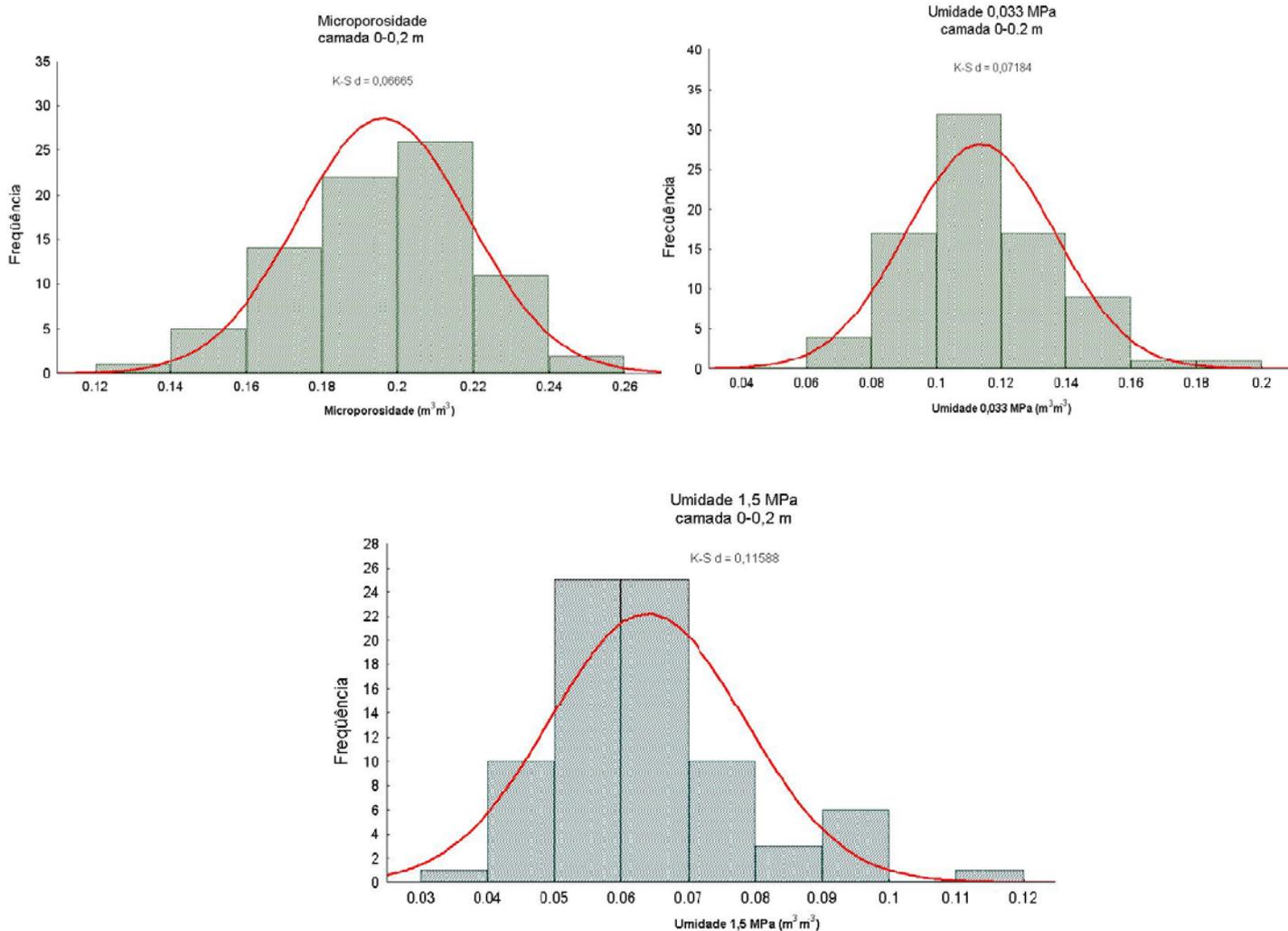


Figura 8. Histogramas relacionados às propriedades microporosidade, umidade 0,033 MPa e umidade 1,5 MPa na profundidade de 0-0,2 m.

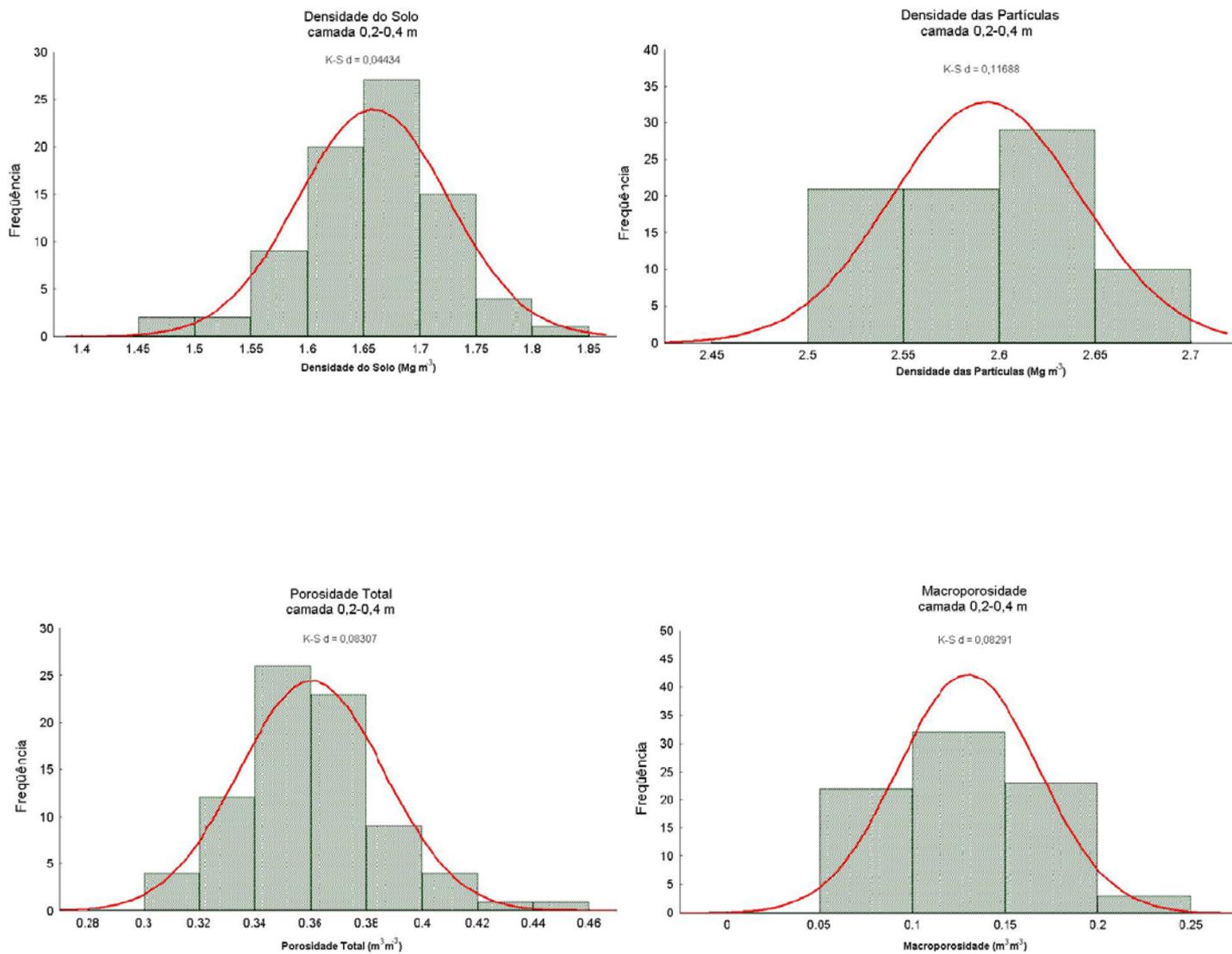


Figura 9. Histogramas relacionados às propriedades densidade do solo, densidade das partículas, porosidade total e macroporosidade na profundidade de 0,2-0,4 m.

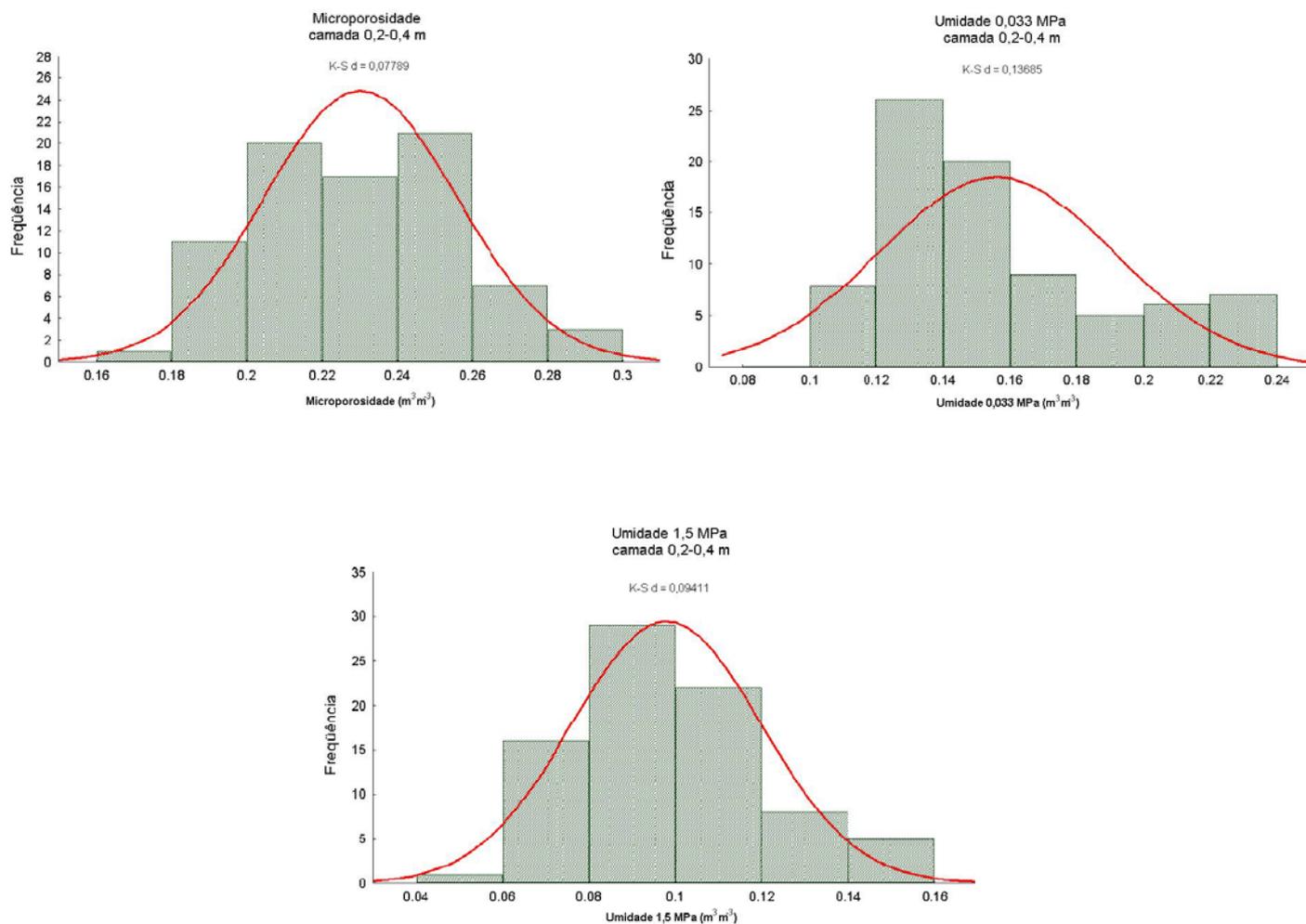


Figura 10. Histogramas relacionados às propriedades microporosidade, umidade 0,033 MPa e umidade 1,5 MPa na profundidade de 0,2-0,4 m.

Cruz (2005), em sua estatística descritiva, observou que os agregados de mesmo diâmetro também apresentaram o C.V. mais elevado, em torno de 106,1%, sendo classificado como alta variabilidade.

Os agregados que apresentaram maior estabilidade aos testes submetidos (via úmida) foram aqueles com diâmetro maior, ou seja, 4,76-2,00 mm, que foram de 549 g kg agregados⁻¹ e 566 g kg agregados⁻¹ para as camadas de 0-0,2 e 0,2-0,4 m, respectivamente, o que era esperado em se tratando de um solo com textura franca arenosa. O mesmo resultado foi obtido por Flores (2005), trabalhando em um Argissolo Vermelho no município de Pelotas (RS), onde os agregados que apresentaram maior estabilidade foram aqueles com diâmetro 4,76-2,00 mm e menor de 0,25 mm, e com menor estabilidade aqueles com diâmetro 0,5-0,25 mm sendo de 47 g kg agregados⁻¹ e 49 g kg agregados⁻¹ para profundidade 0-0,2 m e 0,2-0,4 m, respectivamente.

Nota-se que a estabilidade dos agregados apresentou os maiores valores na camada subsuperficial, se comparada com a camada superficial. Possivelmente, o manejo do solo possa estar contribuindo para tal.

Os resultados referentes à análise descritiva encontram-se nas Tabela 5 e Tabela 6, onde se observa um ajuste normal à distribuição de frequência para todas as variáveis.

Os histogramas para as variáveis de análise de agregados podem ser vistos na Figura 11 e Figura12.

Tabela 5. Parâmetros para os atributos físicos do solo: estabilidade de agregados 4,76-2,00mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,5 mm, 0,5-0,25 mm e < 0,25 mm para profundidade de 0-0,2 m.

ATRIBUTOS					
Parâmetros	Agregados (mm)				
	4,76-2,00	2,00-1,00	1,00-0,5	0,5-0,25	< 0,25
	g kg agregados ⁻¹				
Média	549,00	52,00	49,00	47,00	300,00
Mediana	575,00	46,00	45,00	42,00	279,00
Desvio Padrão	154,24	23,16	25,04	24,98	97,02
C.V. (%) ^a	28,05	44,25	50,09	52,50	32,33
Mínimos	128,00	5,68	4,00	5,00	104,00
Máximos	880,00	131,00	123,00	118,00	615,00
Curtose	0,15	1,99	0,59	0,36	1,00
Assimetria	-0,61	1,13	0,87	0,86	0,86
d ^b	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11

^a Coeficiente de variação.

^b d experimental.

Tabela 6. Parâmetros para os atributos físicos do solo: estabilidade de agregados 4,76-2,00mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,5 mm, 0,5-0,25 mm e < 0,25 mm para profundidade de 0,2-0,4 m.

ATRIBUTOS					
Parâmetros	Agregados (mm)				
	4,76-2,00	2,00-1,00	1,00-0,5	0,5-0,25	< 0,25
	g Kg agregados ⁻¹				
Média	566,00	68,00	73,00	49,00	242,00
Mediana	584,00	68,00	68,00	42,00	233,00
Desvio Padrão	161,38	27,04	37,70	25,84	85,44
C.V. (%) ^a	28,50	39,72	51,07	51,97	35,28
Mínimos	243,00	16,00	11,00	11,00	102,00
Máximos	849,00	132,00	181,00	124,00	434,00
Curtose	-1,08	-0,67	-0,27	0,13	-0,96
Assimetria	-0,22	0,33	0,58	0,81	0,26
d ^b	0,09	0,10	0,10	0,12	0,07

^a Coeficiente de variação.

^b d experimental.

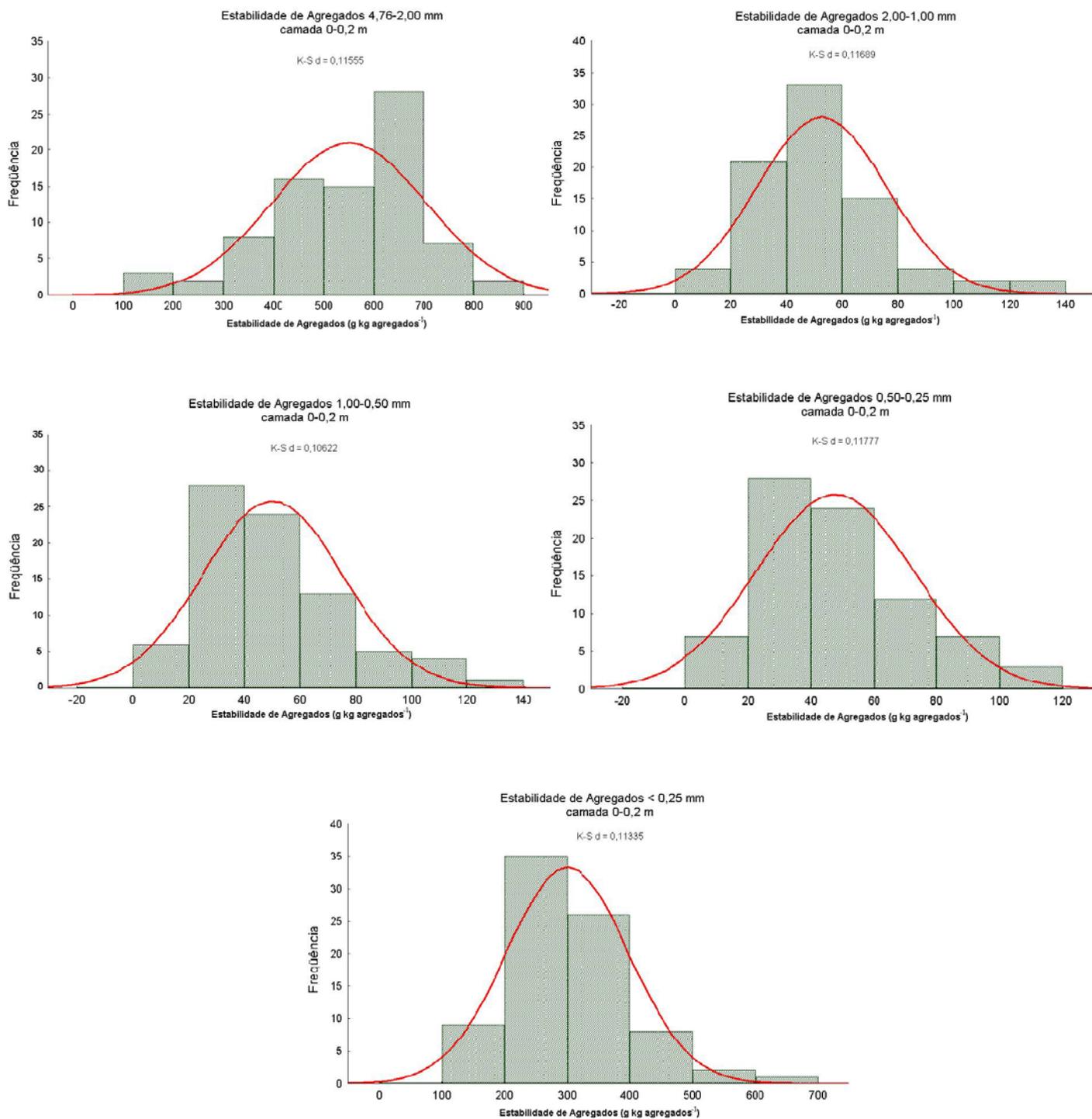


Figura 11. Histogramas relacionados com a estabilidade dos agregados 4,76-2,00 mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,50 mm, 0,50-0,25 mm e < 0,25 mm na profundidade de 0-0,2 m.

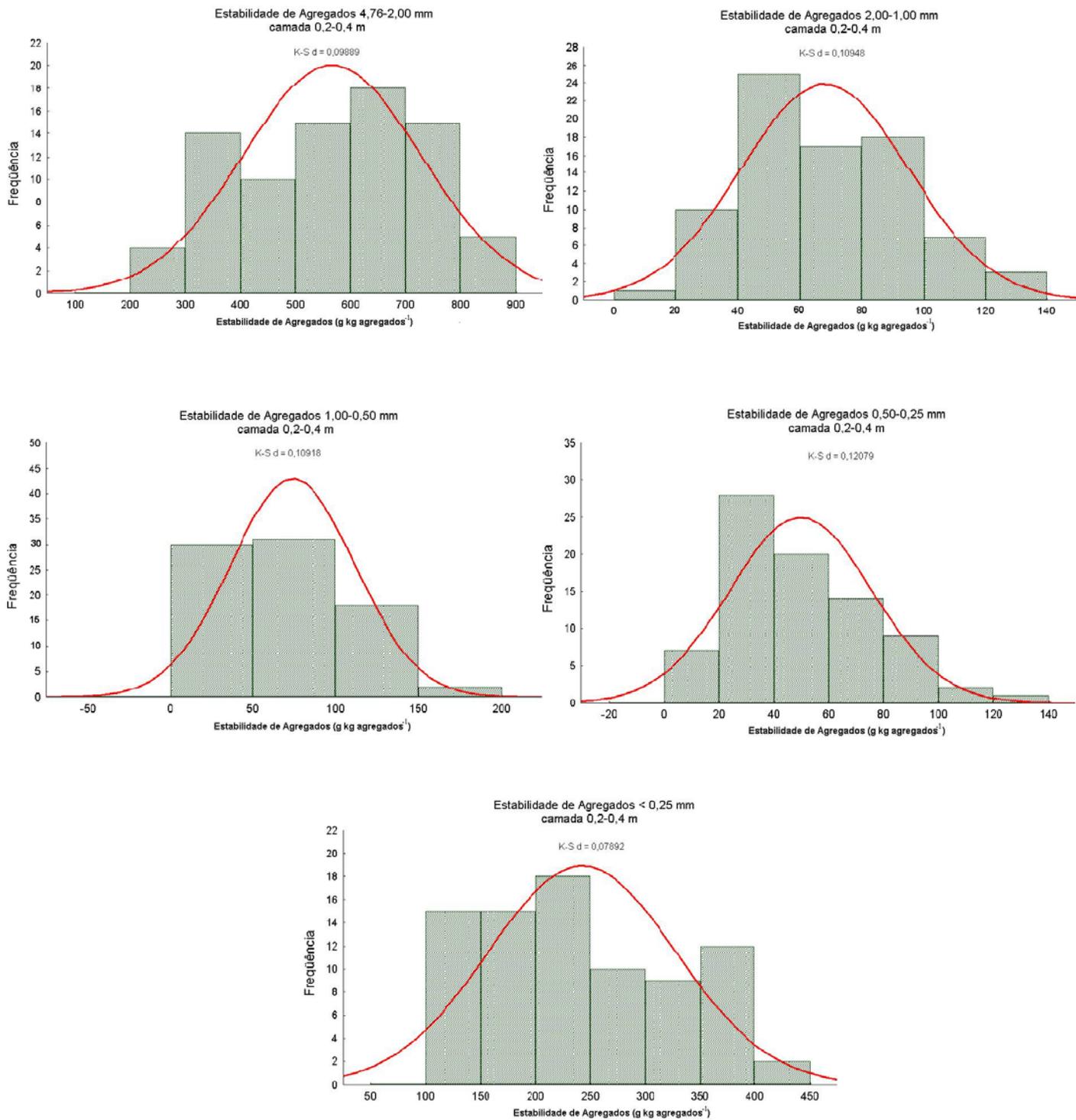


Figura 12. Histogramas relacionados com a estabilidade dos agregados 4,76-2,00 mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,50 mm, 0,50-0,25 mm e < 0,25 mm na profundidade de 0,2-0,4 m.

4.2. Geoestatística (cálculo da semivariância)

As variáveis do solo mostraram diferenças na dependência espacial com determinadas análises de semivariância. Os modelos esférico e exponencial foram os que melhor se ajustaram à curva para definir as variáveis, sendo o primeiro mais utilizado (Tabela 7). Esta seleção está de acordo com Carvalho et al. (2003), que encontraram estes mesmos modelos para variabilidade espacial de atributos físicos do solo.

Para as variáveis areia, silte, argila total, argila dispersa em água, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, umidade 0,033 MPa, agregados com diâmetro 4,76-

Tabela 7. Parâmetros dos semivariogramas isotrópicos das propriedades físicas analisadas.

Atributos do Solo	Classe ^c	Modelo	Efeito Pepita C ₀	Patamar C ₀ + C	Alcance A ₀ (m)	ER ^d (%)
Areia (g kg ⁻¹)						
0-0,2 m	F	Esférico	1,0000	16230	27,42	0,06
0,2-0,4 m	M	Esférico	1033,0	40040	35,06	25,79
Silte (g kg ⁻¹)						
0-0,2 m	F	Esférico	23,700	132,00	5,25	17,95
0,2-0,4 m	F	Esférico	0,0184	0,0832	51,00	22,11
Argila total (g kg ⁻¹)						
0-0,2 m	F	Esférico	80,000	1174,0	21,64	6,81
0,2-0,4 m	F	Esférico	754,00	3093,0	33,98	24,37
Argila disp. Água (g kg ⁻¹)						
0-0,2 m	F	Esférico	6,4000	65,380	3,15	9,78
0,2-0,4 m	M	Esférico	85,600	251,30	11,77	34,06
Grau de flocculação (g kg ⁻¹)						
0-0,2 m	I	EPP ^e	5073,4	5073,4	-	100,00
0,2-0,4 m	F	Exponencial	552,00	2795,0	2,75	19,74
Densidade do solo (Mg m ⁻³)						
0-0,2 m	I	EPP	0,0039	0,0039	-	100,00
0,2-0,4 m	F	Exponencial	0,0009	0,0044	0,87	20,45
Densidade partículas (Mg m ⁻³)						
0-0,2 m	F	Exponencial	0,0004	0,0018	1,63	22,22
0,2-0,4 m	I	EPP	0,0024	0,0024	-	100,00
Porosidade total (m ³ m ⁻³)						
0-0,2 m	F	Esférico	0,0001	0,0006	3,78	16,66
0,2-0,4 m	F	Esférico	0,0001	0,0007	2,98	14,28
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)						
0-0,2 m	M	Esférico	0,0007	0,0018	16,69	38,88
0,2-0,4 m	M	Esférico	0,0006	0,0017	16,69	35,29
Microporosidade (m ³ m ⁻³)						
0-0,2 m	M	Esférico	0,0002	0,0006	17,54	33,33
0,2-0,4 m	F	Esférico	0,0002	0,0010	27,83	20,00
Umidade 0,033 MPa (m ³ m ⁻³)						
0-0,2 m	M	Esférico	0,0002	0,0007	20,21	28,57
0,2-0,4 m	M	Esférico	0,0007	0,0013	13,44	53,84

Tabela 7, Cont.

Propriedade do Solo	Classe ^c	Modelo	Efeito Pepita C _o	Patamar C _o + C	Alcance A _o (m)	ER ^d (%)
Umidade 1,5 MPa (m ³ m ⁻³)						
0-0,2 m	F	Esférico	0,0000	0,0004	27,94	0,00
0,2-0,4 m	F	Exponencial	0,0001	0,0008	14,03	12,50
Agregados 4,76-2,00 mm (g kg ⁻¹)						
0-0,2 m	M	Esférico	13280	33300	30,50	39,87
0,2-0,4 m	F	Esférico	42400	26090	2,98	16,25
Agregados 2,00-1,00 mm (g kg ⁻¹)						
0-0,2 m	F	Exponencial	127	555,5	2,12	22,86
0,2-0,4 m	F	Esférico	94	735,1	2,98	12,78
Agregados 1,00-0,5 mm (g kg ⁻¹)						
0-0,2 m	M	Esférico	337	674,1	11,94	49,99
0,2-0,4 m	F	Esférico	226	1430	2,98	15,80
Agregados 0,5-0,25 mm (g kg ⁻¹)						
0-0,2 m	M	Esférico	398	823,9	29,60	48,30
0,2-0,4 m	F	Esférico	89	674,9	2,98	13,18
Agregados < 0,25 mm (g kg ⁻¹)						
0-0,2 m	F	Esférico	4080	18580	45,91	21,95
0,2-0,4 m	F	Esférico	1380	7245	2,98	19,04

^c Classe Espacial: F, forte dependência espacial; M, moderada dependência espacial; I, ausência de dependência espacial (efeito pepita puro).

^d Efeito Pepita Relativo “*Nugget ratio*” = $[C_o/C_o+C] \times 100$.

Para o grau de flocculação (profundidade 0-0,2 m) e para o silte (profundidade 0,2-0,4 m), foram realizadas transformações logarítmicas; (log (g Kg⁻¹)).

^e EPP = Efeito Pepita Puro.

2,00 mm, 1,00-0,5 mm, 0,5-0,25 mm e menor que 0,25 mm, em ambas profundidades, umidade obtida numa tensão de 1,5 MPa, na profundidade de 0-0,2 m e agregados 2,00-1,00 mm, na profundidade de 0,2-0,4 m, o modelo que melhor se ajustou foi o esférico. Já para as variáveis densidade das partículas e agregados com diâmetro 2,00-1,00 mm, na profundidade de 0-0,2 m e grau de flocculação, densidade do solo, umidade obtida na tensão de 1,5 MPa, na profundidade de 0,2-0,4 m, apresentaram um melhor ajuste com o modelo exponencial. Isto está em acordo com Kiliç et al. (2004) que, estudando a variabilidade de atributos físicos, encontraram para o silte e para a densidade do solo o mesmo modelo encontrado no presente trabalho. Neste sentido, Souza et al. (2004b), encontraram para as variáveis porosidade total, macro e microporosidade um melhor ajuste com o modelo esférico, resultados semelhantes foram encontrados por Sousa (1999) para as variáveis areia, silte e argila, para ambas profundidades. Além das umidades obtidas a 0,033 e 1,5 MPa, sendo esta última para profundidade de 0-0,2 m.

As variáveis grau de flocculação e densidade do solo, para 0-0,2 m de profundidade e densidade das partículas na profundidade de 0,2-0,4 m, apresentaram uma relação

efeito pepita-patamar de 100%, significa dizer que, os valores do efeito pepita e do patamar coincidiram, caracterizando assim o fenômeno denominado de efeito pepita puro (EPP), onde o alcance é nulo e não há dependência espacial entre as amostras, podendo-se inferir que a variabilidade é máxima para estas variáveis e que os pontos são independentes entre si, atendendo o requisito básico para a aplicação da estatística clássica que, nesse caso, pode ser utilizada sem restrições.

Para Cambardella et al. (1994), o efeito pepita reflete a variabilidade não explicada ou variações não detectadas pela distância insuficiente da malha de amostragem. Esse parâmetro pode ser expresso como porcentagem do patamar, com o objetivo de facilitar a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em estudo (Trangmar et al., 1985).

A umidade na tensão de 1,5 MPa, para primeira profundidade apresentou um efeito pepita de 0%, indicando que o erro experimental é praticamente nulo e que não existe variação significativa a distâncias menores que a amostrada, ou seja, não há variabilidade espacial para distâncias menores que 2,5 m. Ainda sobre a variável umidade 0,033 e 1,5 MPa, observou-se que o efeito pepita foi mais elevado na profundidade de 0,2-0,4 m, indicando que, para esta profundidade ocorre uma variabilidade espacial para distâncias menores.

Todas as variáveis apresentaram um grau de dependência espacial forte (relação efeito pepita/patamar $< 25\%$), i.e., o efeito pepita está próximo à origem, moderado (relação efeito pepita/patamar $> 25\%$ e $< 75\%$) e independente (relação efeito pepita/patamar igual a 100%). Nas quais, para silte, argila total, porosidade total, umidade 1,5 MPa, agregados 2,00-1,00 mm e agregados menores que 0,25 mm apresentaram dependência espacial forte para ambas profundidades e areia, argila dispersa em água, densidade das partículas, apresentaram a mesma dependência para a profundidade de 0-0,2 m, ainda grau de flocculação, densidade do solo, microporosidade, agregados 4,76-2,0 mm, agregados 1,00-0,5 mm e agregados de 0,5-0,25 mm para a profundidade de 0,2-0,4 m.

Dependência igual foi verificada por Souza et al. (2004b), quando estudavam granulometria do solo. Cruz (2005), obteve o mesmo grau de dependência para as variáveis silte e argila total, numa profundidade de 0-0,2 m. Segundo a mesma autora, a macroporosidade e a microporosidade, para camada superficial, apresentaram uma moderada dependência, isto foi constatado neste trabalho. Geralmente, uma forte dependência espacial dos atributos do solo pode estar relacionada aos fatores intrínsecos

e à distância entre os pontos; possivelmente a forte dependência espacial detectada para as variáveis citadas acima seja decorrente de qualquer um dos fatores de formação do solo, tais como o relevo, clima, material de origem, atividade biológica e tempo.

Em se tratando de um Argissolo e sabendo-se que é um solo autóctone, as variáveis granulométricas têm ligações pedogenéticas, isto justifica o fato destas variáveis, apresentarem uma forte dependência espacial, salvo o teor de areia na profundidade 0,2-0,4 m que, mesmo assim, ficou muito próximo de forte (25,79%).

Apresentaram grau de dependência moderado macroporosidade, umidade na tensão de 0,033 MPa, para as duas profundidades estudadas, e microporosidade, agregados 4,76-2,00 mm, agregados de 1,00-0,5 e agregados de 0,5-0,25 mm para a profundidade de 0-0,2 m, por fim, areia e argila dispersa em água, na profundidade de 0,2-0,4 m. As demais variáveis, com exceção do grau de flocculação e densidade do solo na profundidade de 0-0,2 m e densidade das partículas na profundidade subsequente, apresentaram um grau de dependência espacial forte.

Os semivariogramas para as variáveis com moderada dependência espacial ajustaram-se melhor ao modelo esférico. Trabalhando em um Argissolo Vermelho Amarelo, Carvalho et al. (2003) obtiveram semivariogramas que apresentaram o melhor ajuste com o mesmo modelo para as variáveis macroporosidade e microporosidade, concordando com trabalhos conduzidos anteriormente por Salviano et al. (1998) e Souza et al. (1997).

Neste trabalho, foram obtidos para a relação efeito pepita/patamar, aqui denominada de efeito pepita relativo ou “*nugget ratio*”, os valores extremos desde 0%, para a variável umidade na tensão de 1,5 MPa na profundidade de 0-0,2 m e de 100% (EPP), para as variáveis grau de flocculação e densidade do solo, na profundidade de 0-0,2 m e densidade das partículas na profundidade de 0,2-0,4 m.

A maior parte das variáveis que apresentaram um alcance maior que a área de estudo, i.e., maior que 20 metros, se encontra na camada superficial, isto, provavelmente estar relacionado com o maquinário agrícola, pois pode ocorrer a diminuição da espessura do horizonte superficial e algumas amostras da camada de 0-0,2 m pode ser parte de horizonte de transição ou até mesmo um horizonte B. As variáveis onde se verificou tal ocorrência foram: areia (0-0,2 e 0,2-0,4 m), silte (0,2-0,4 m), argila total (0-0,2 e 0,2-0,4 m), microporosidade (0,2-0,4 m), umidade na tensão de 0,033 MPa (0-0,2 m), umidade na tensão de 1,5 MPa (0-0,2 m), agregados 4,76-2,00

mm (0-0,2 m), agregados 0,5-0,25 mm (0-0,2 m) e agregados menores que 0,25 mm (0-0,2 m).

Os valores do alcance foram máximos para o silte na camada inferior, com o valor de 51,00 m, seguido dos agregados menores que 0,25 mm, na camada superficial com 45,91 m e para areia na camada subsuperficial com 35,06 m.

Observou-se ainda que, quanto mais estreita a relação do efeito pepita com o patamar, menor tende a ser o alcance e maior tende a ser a variabilidade espacial. Assim, com exceção das variáveis microporosidade, agregados com diâmetro 4,76-2,00 mm, 1,00-0,50 mm e 0,50-0,25 mm na camada de 0-0,2 m, areia e argila dispersa em água na camada de 0,2-0,4 m e macroporosidade e umidade na tensão 0,033 MPa, para ambas camadas, as demais variáveis apresentaram uma estreita relação, destacando-se o teor de areia, argila total e argila dispersa em água, na camada superficial, sendo a relação de 0,0006, 0,06 e 0,09, respectivamente.

Como citado anteriormente, para a aplicação de geoestatística se faz necessário que se tenha o 2º momento da estatística que é a variância, em outras palavras tem que se ter um patamar claro e bem definido. Nessa linha de raciocínio, percebe-se a importância do patamar, também denominado de soleira ou “*sill*”. É a partir dele que se determina o limite de dependência e independência dos dados, ou seja, o alcance. Neste sentido, todos os semivariogramas gerados para as variáveis em estudo foram isotrópicos e apresentaram patamar. O semivariograma isotrópico leva em consideração uma volta de 360º em torno do ponto, ou seja, qualquer amostra que se retire do solo dentro de uma zona circular, para os determinados alcances, apresentaram valores correlacionados espacialmente.

Tanto a densidade do solo como a densidade das partículas tiveram os menores alcances de todas as variáveis, sendo 0,87 m para 0,2-0,4 m de profundidade e 1,63 m para 0-0,2 m de profundidade, respectivamente. Isto se deve ao fato do efeito pepita e o patamar apresentarem uma estreita relação de 0,0009 e 0,0044 para a densidade do solo e 0,0004 e 0,0018 para a densidade das partículas, como pode ser observado no semivariograma. Comportamento semelhante ocorreu para a variável porosidade total, sendo as diferenças efeito pepita/patamar de 0,0005 e 0,0006, e alcance de 3,78 e 2,98 m, respectivamente para a profundidade 0-0,2 e 0,2-0,4 m.

Na Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16, Figura 17 e Figura 18, são apresentadas as estruturas dos semivariogramas de todas as variáveis estudadas.

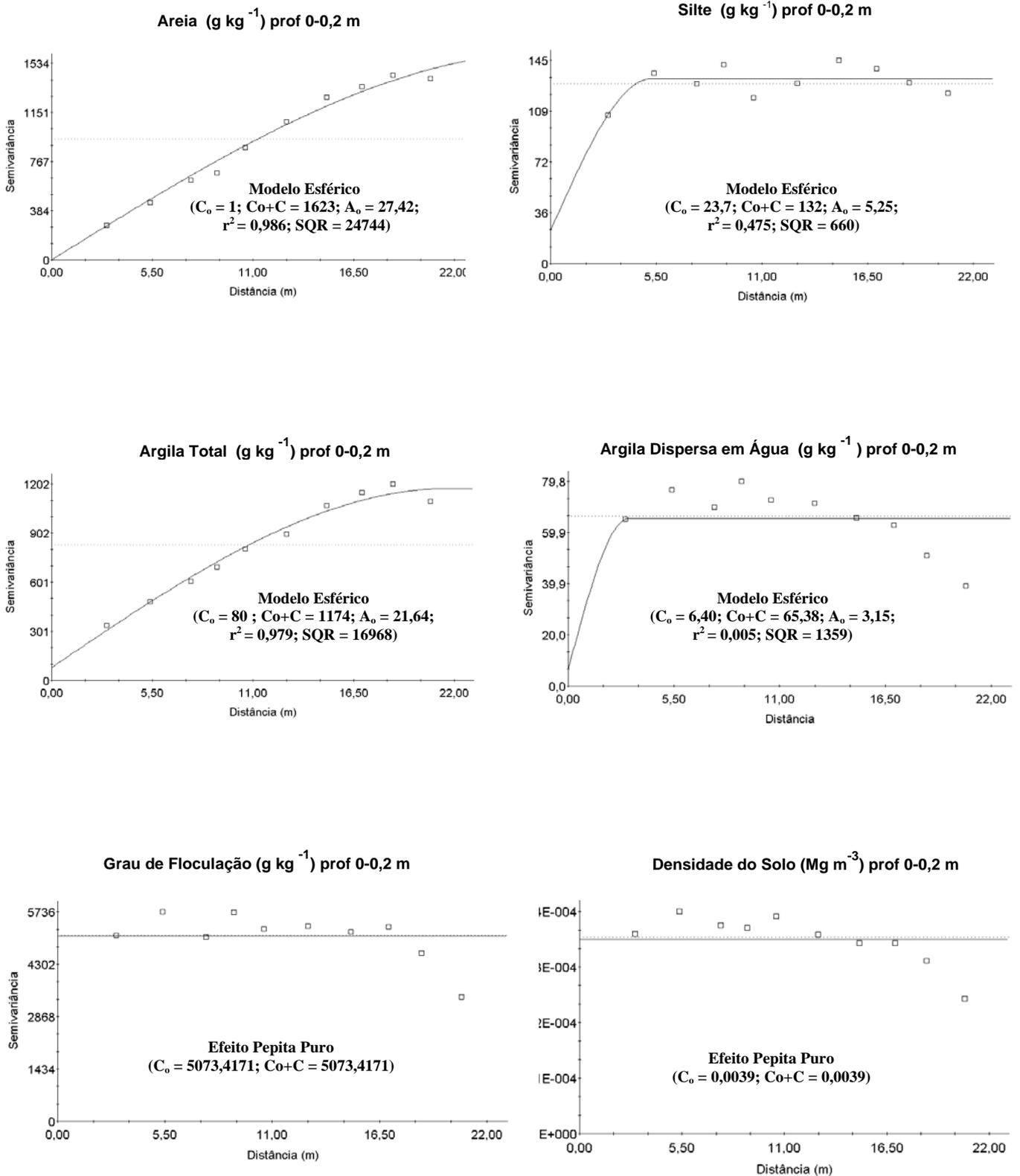


Figura 13. Semivariogramas isotrópicos correspondentes as variáveis areia, silte, argila total, argila dispersa em água, grau de flocculação e densidade do solo na profundidade de 0-0,2 m.

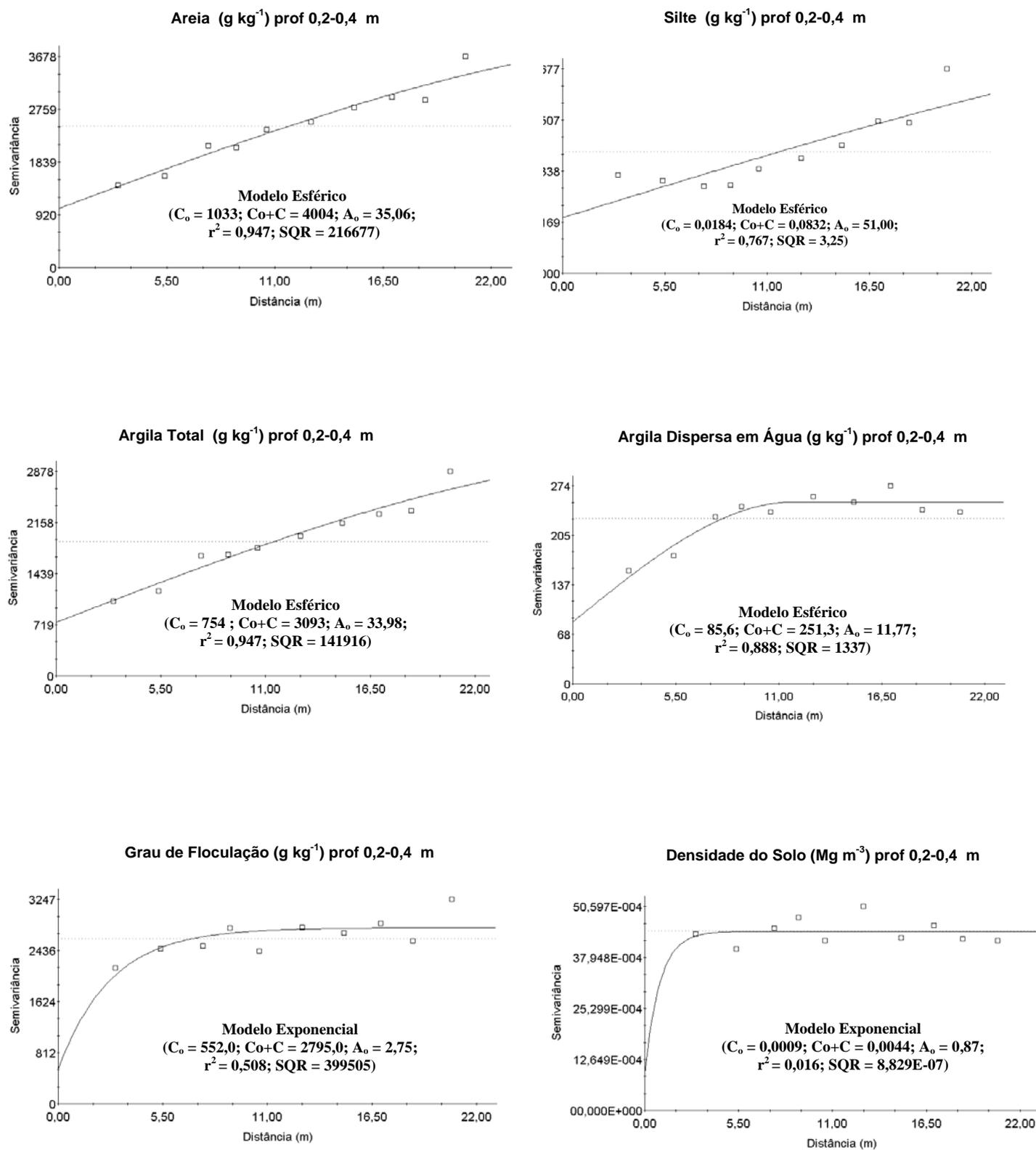


Figura 14. Semivariogramas isotrópicos correspondentes as variáveis areia, silte, argila total, argila dispersa em água, grau de floculação e densidade do solo na profundidade de 0,2-0,4 m.

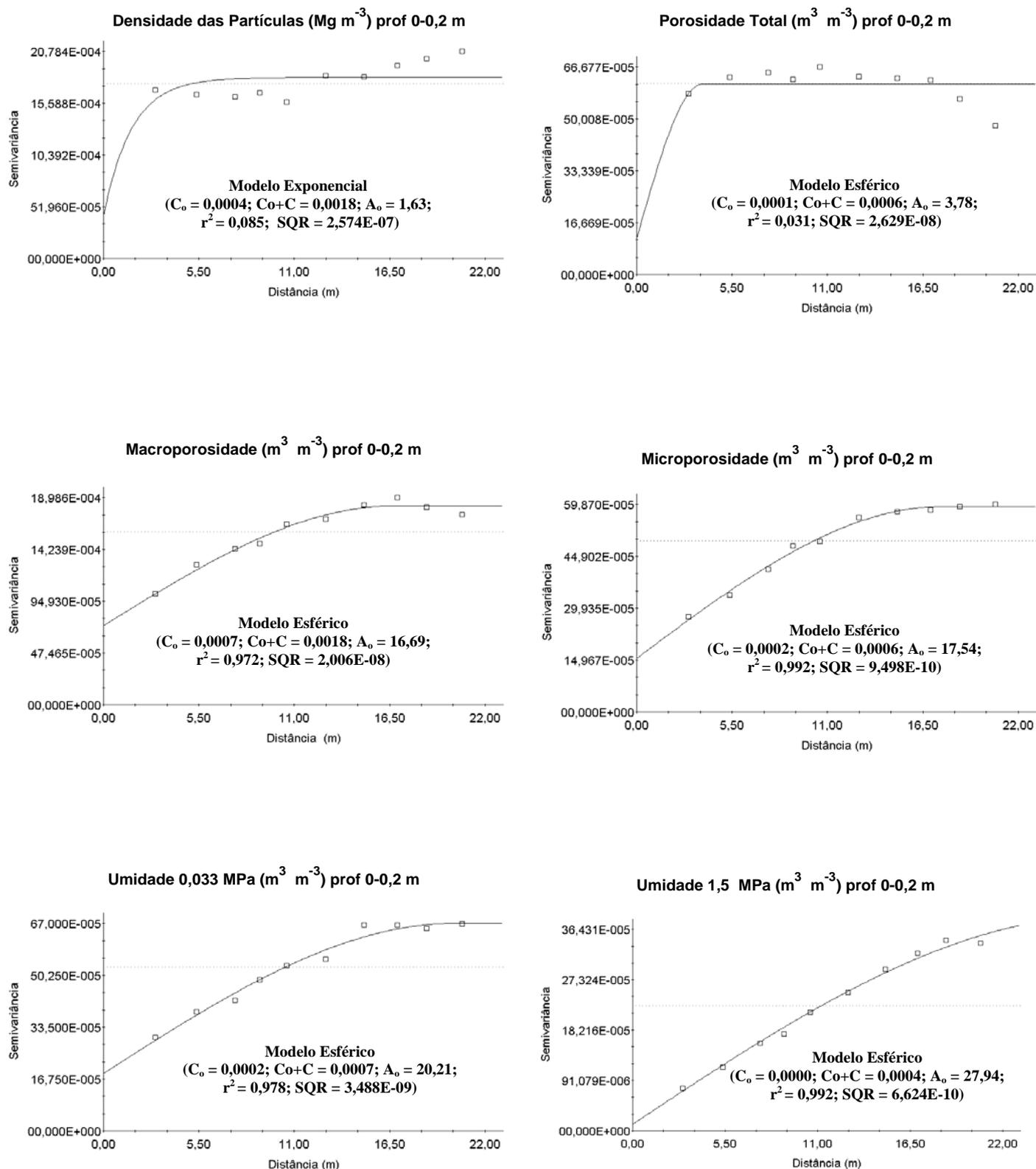


Figura 15. Semivariogramas isotrópicos correspondentes as variáveis densidade das partículas, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, umidade 0,033 MPa e umidade 1,5 MPa na profundidade de 0-0,2 m.

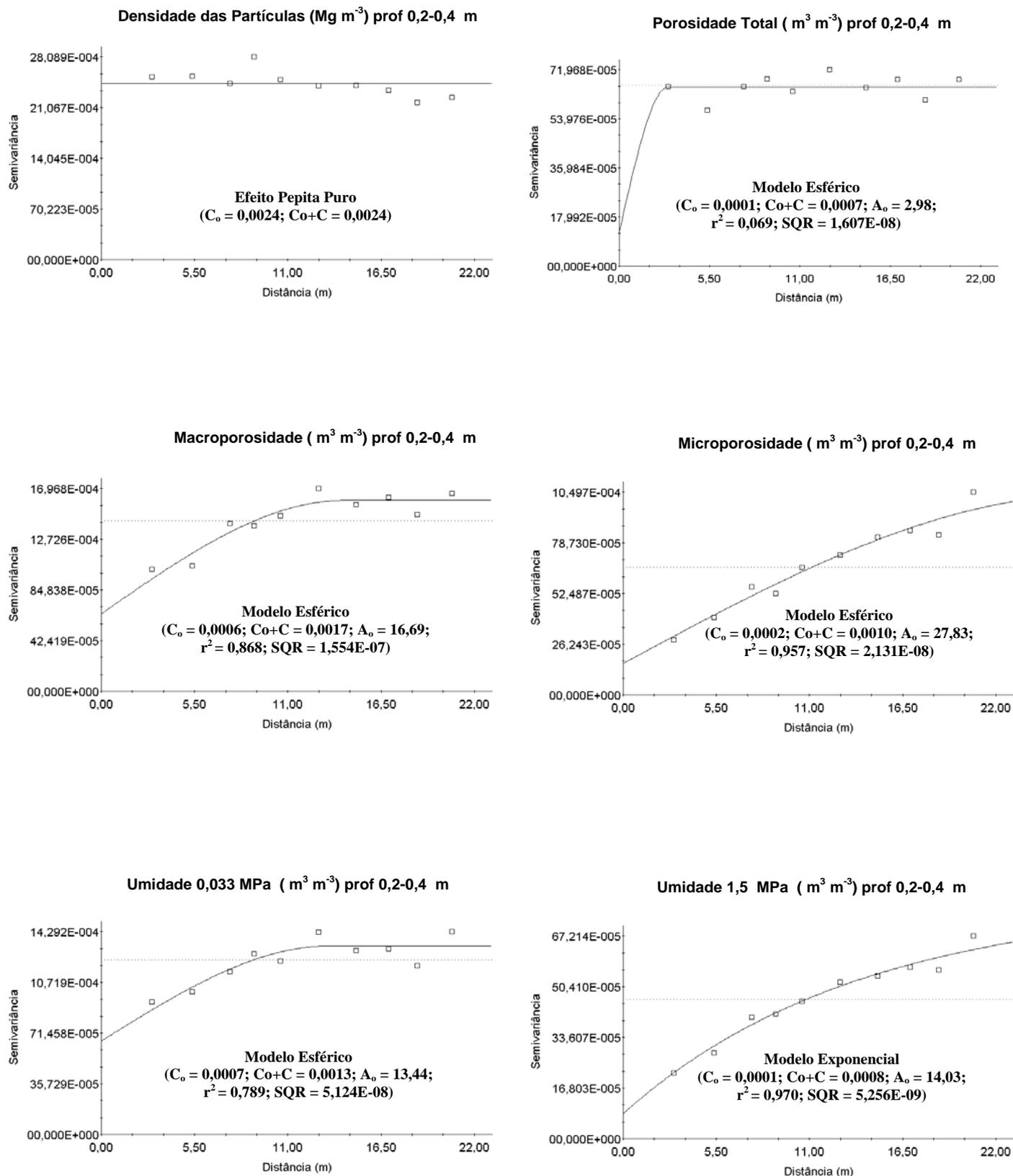


Figura 16. Semivariogramas isotrópicos correspondentes as variáveis densidade das partículas, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, umidade 0,033 MPa e umidade 1,5 MPa na profundidade de 0,2-0,4 m.

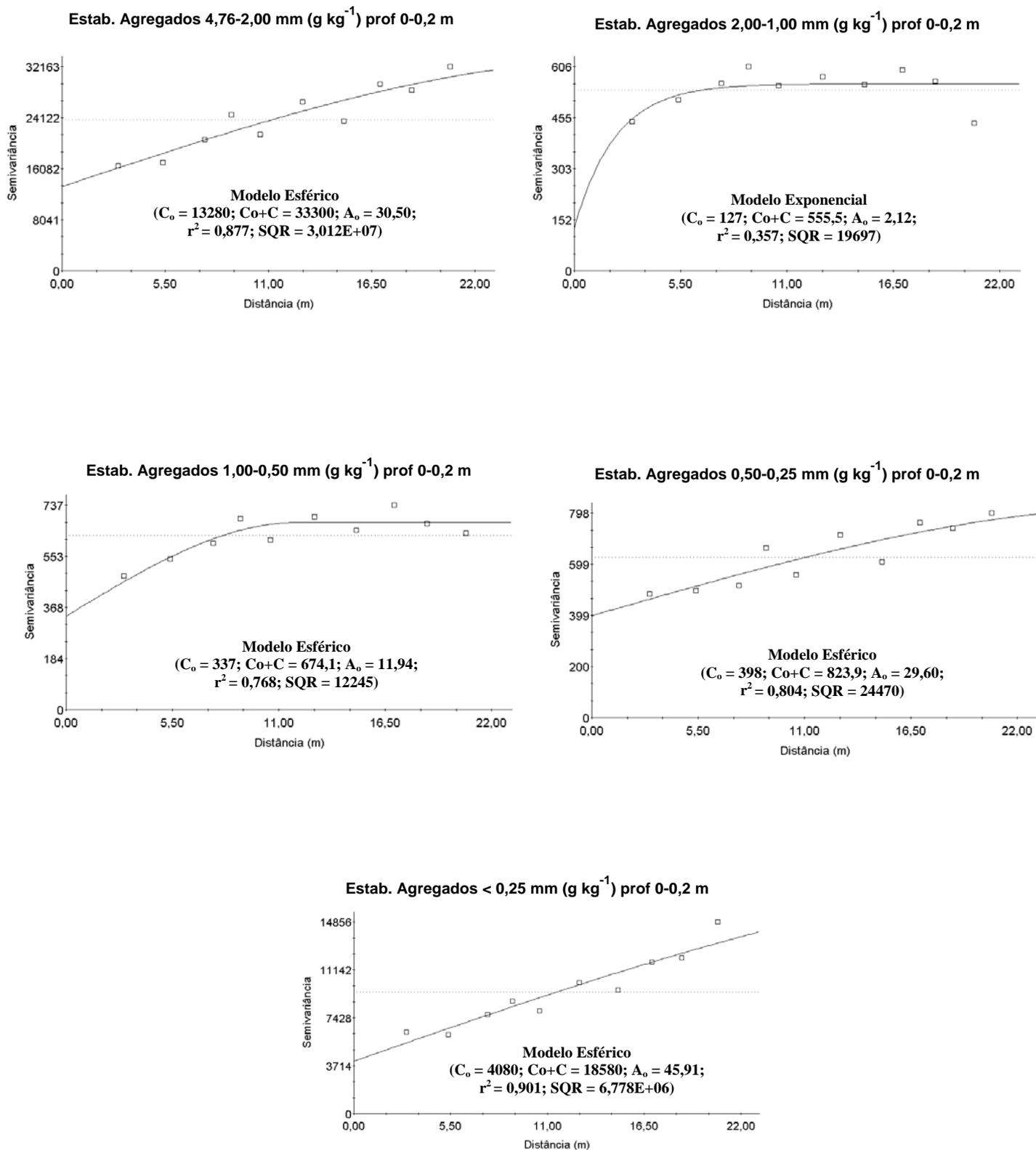


Figura 17. Semivariogramas isotrópicos correspondentes à estabilidade dos agregados com diâmetro 4,76-2,00 mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,50 mm, 0,50-0,25 mm e $< 0,25$ mm na profundidade de 0-0,2 m.

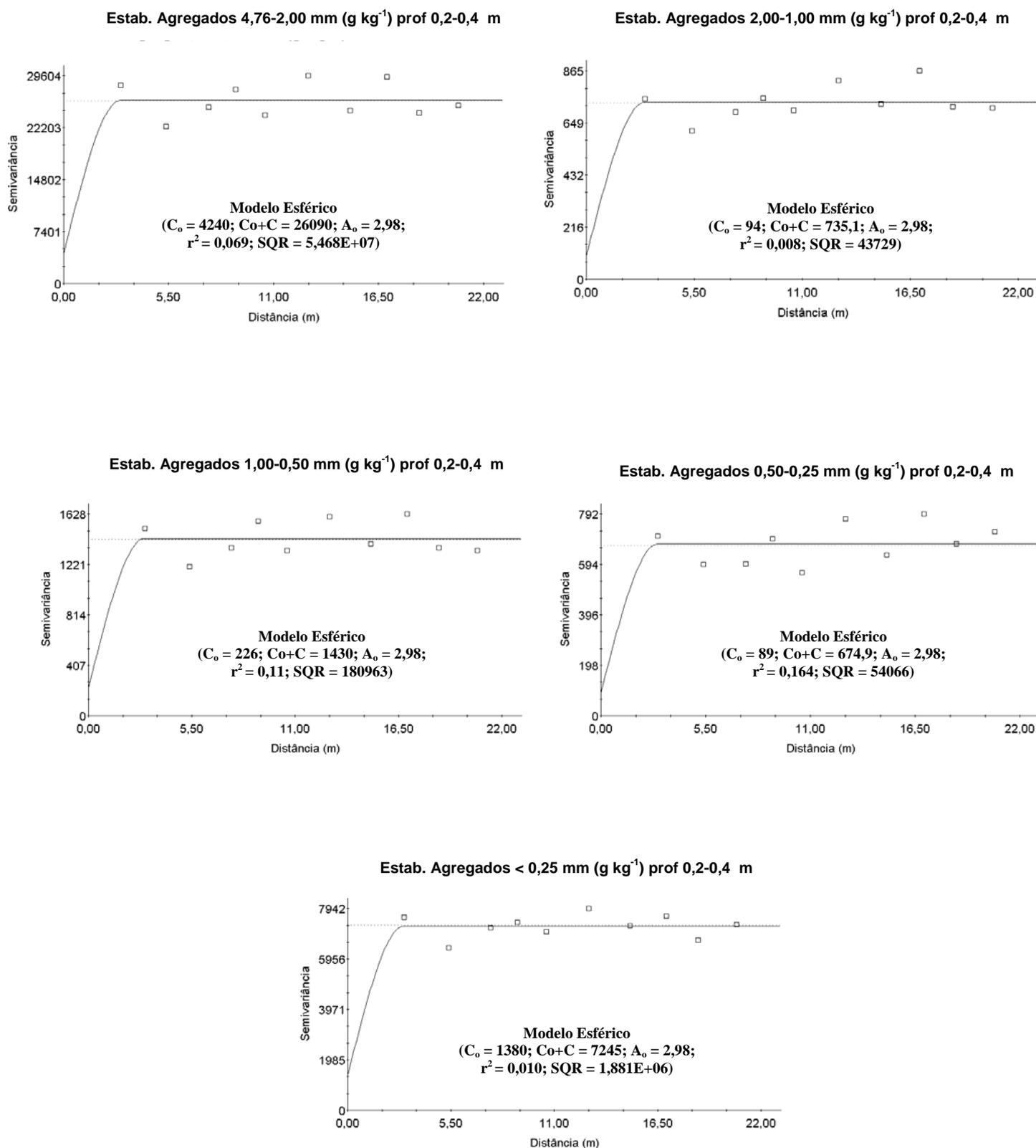


Figura 18. Semivariogramas isotrópicos correspondentes à estabilidade dos agregados com diâmetro 4,76-2,00 mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,50 mm, 0,50-0,25 mm e $< 0,25$ mm na profundidade de 0,2-0,4 m.

4.3. Geoestatística (mapas de superfície)

Nesta fase da pesquisa, o semivariograma teve um papel primordial, pois além de mostrar a dependência espacial, serviu como ferramenta básica para a interpolação dos dados e confecção dos mapas de superfície que foram modelados a partir do programa computacional Surfer 8.0.

Foi a partir dos mapas que se pôde observar o comportamento das variáveis dentro da área de estudo. Os mapas de distribuição espacial das partículas sólidas do solo estão apresentados na Figura 19 e Figura 20.

Nota-se que os mapas das variáveis areia (19a), silte (19b) e argila total (19c) na profundidade de 0-0,2 m, apresentaram valores entre 720 e 850 g kg⁻¹, 40 e 100 g kg⁻¹ e 70 e 210 g kg⁻¹, respectivamente (Figura 19). Na profundidade de 0,2-0,4 m, para as mesmas variáveis (20a, 20b e 20c), os valores variaram entre 560 e 820 g kg⁻¹, 40 e 230 g kg⁻¹ e 130 e 350 g kg⁻¹, respectivamente. A variável areia (0,2-0,4 m) apresentou a maior amplitude, sendo de 260 g kg⁻¹.

A variável areia teve uma diminuição com o incremento da profundidade tendo seu pico passando de 860 para 800 g kg⁻¹, no entanto, obteve os maiores valores em ambas profundidades quando comparado com as outras duas variáveis granulométricas que seguiram tendência contrária, aumentando de 80 para 200 g kg⁻¹ no caso do silte e de 200 para 300 g kg⁻¹, no caso da argila. Percebe-se que na porção Sudeste e Nordeste, coordenadas 4 m x 2 m e 19 m x 2 m, respectivamente, os teores de areia foram mais elevados na profundidade de 0-0,2 m e na porção Noroeste para profundidade 0,2-0,4 m. As variáveis areia e argila total, para as duas profundidades, se comportaram de forma inversa, onde nos picos de argila pôde-se observar as maiores depressões nos teores de areia. Um fato é que onde os teores de argila foram mais elevados ocorreu maior resistência à penetração do anel volumétrico, devido à diminuição do espaço poroso do solo.

Para profundidade de 0,2-0,4 m, observa-se que o silte (20b), apresentou uma distribuição uniforme, exceto nas coordenadas 2 m x 4 m, bem onde se encontrou os menores valores de areia e argila total.

As variáveis argila dispersa em água (Figura 21a e 22a) e grau de floculação (Figura 21b e 22b) apresentaram uma relação espacial inversa. Na profundidade de 0-0,2 m, para argila naturalmente dispersa e grau de floculação os valores foram entre 0 e 40 g kg⁻¹ e 700 e 1000 g kg⁻¹, respectivamente. Na profundidade de 0,2-0,4 m, os

valores variaram entre 15 e 100 g kg⁻¹, 620 e 940 g kg⁻¹, respectivamente. Os picos nos teores de argila naturalmente dispersa encontram-se distribuídos por toda área. No entanto, seus maiores valores observados foram onde a argila não se encontrava floculada. Isto pôde ser verificado na porção central tendendo para o Norte, na profundidade de 0-0,2 m (Figura 21ab) e na porção Norte, na profundidade de 0,2-0,4 m (Figura 22 ab).

A densidade das partículas, na camada de 0-0,2 m (Figura 21c), foi a variável que mais uniformemente se distribuiu na área, tendo seus valores variando entre 2,49 Mg m⁻³ e 2,70 Mg m⁻³, para 0-0,2 m de profundidade e 2,50 Mg m⁻³ e 2,69 Mg m⁻³, para 0,2-0,4 m de profundidade. Provavelmente, o manejo da área, onde não se incorpora grande quantidade de matéria orgânica, pode estar contribuindo para essa uniformidade.

A densidade do solo (Figura 23a e 24a) apresentou uma relação inversamente proporcional para as variáveis porosidade total (Figura 23b e 24b) e macroporosidade (figura 23c e 24c) e diretamente proporcional para a variável microporosidade (Figura 25a e 26a). Evidentemente, com o aumento da densidade, suas partículas tendem a aproximar-se umas das outras, diminuindo assim o espaço poroso do solo. No espaço poroso que mais é afetado por esta aproximação são os poros de aeração, e isso foi observado neste estudo para relação entre densidade do solo e porosidade total, para ambas profundidades.

O mesmo que ocorreu entre a densidade e a porosidade total do solo pode ser aplicado para a macroporosidade, já que há também uma correlação negativa entre ambas. Percebe-se na Figura 23a e 23c, também na Figura 24a e 24c que os picos da densidade correspondem à depressão da macroporosidade. O aumento da densidade produz uma diminuição inicial dos poros maiores. Na área de estudo, isto está associado ao uso de implementos agrícolas, principalmente arado e grade e ao tráfego de maquinarias agrícolas na área.

O mapa de superfície da Figura 23a mostra ainda uma grande depressão nas coordenadas 18 m x 20 m para densidade do solo, na profundidade de 0-0,2 m. Comportamento inverso foi observado para porosidade total e macroporosidade (Figuras 23b e 23c); Isto se deu devido à ocorrência de um formigueiro exatamente nesta parte do terreno. O mapa da microporosidade se comportou de maneira idêntica ao da densidade do solo, já que ambos têm uma relação positiva (Figura 25a). Esta relação pode estar associada ao manejo do solo e aos implementos que nele são utilizados. Outro fator, citado anteriormente, é o fato da área não ter nenhum tipo de cobertura

vegetal, ficando desprotegido contra os impactos das gotas de chuva, vento, dentre outros fatores.

Na Figura 23a, observa-se que a cor rubra sobressai à cor negra, em ambas profundidades, sendo um possível indicador de compactação do solo, pois o mapa aponta valores relativamente altos, mostrando a necessidade de seu controle com um manejo mais adequado.

Quando se avalia os mapas de superfície relacionados com a umidade do solo obtida a uma tensão de 0,033 MPa (Figura 25b e Figura 26b) e 1,5 MPa (Figura 25c e 26c), percebe-se uma relação positiva com a microporosidade. Para camada superficial e subsuperficial, os maiores valores, para as referidas variáveis se encontraram na porção Norte da área.

A textura do solo possui uma relação com a disponibilidade de água para as plantas. Assim, o teor de argila é um fator determinante para esta disponibilidade, pela maior área superficial de suas partículas, podem reter maior volume de água. Como citado anteriormente, o argilomineral predominante seja a caulinita, que tem cargas neutras, porém pode ocorrer cargas negativas na superfície basal. Isso explica a interação entre o teor de argila (Figura 19c e 20c) e a umidade obtida nas tensões 0,033 MPa e 1,5 MPa (Figura 25b, Figura 26b e Figura 25c, 26c).

Verificou-se que a umidade obtida nas tensões 0,033 e 1,5 MPa se comportaram de forma parecida com o teor de argila para as duas profundidades. Apresentando os maiores valores no final da área, nas coordenadas 20 m x 12 m, para profundidade de 0,2-0,4 m.

Nota-se que os mapas das variáveis agregados 4,76-2,00 mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,50 mm, 0,50-0,25 mm e <0,25 mm, apresentaram valores entre 100 e 900, 0 e 130, 0 e 130, 0 e 120 e 100 e 650 g kg agregados⁻¹, respectivamente (Figuras 27abc e 29ab), para profundidade de 0-0,2 m. Na profundidade de 0,2-0,4 m, os valores variaram entre 250 e 850 g kg agregados⁻¹, 10 e 140 g kg agregados⁻¹, 10 e 180 g kg agregados⁻¹, 10 e 130 g kg agregados⁻¹ e 100 e 440 g kg agregados⁻¹, respectivamente.

Os agregados com diâmetro 4,76-2,00 mm predominaram em ambas profundidades. No entanto, houve um aumento com o incremento de profundidade, o que se constatou para os agregados com diâmetro 2,00-1,00 mm, 1,00-0,5 mm e 0,5-0,25 mm. Aqueles agregados com diâmetro menor que 0,25 mm diminuiu com o aumento da profundidade (Figura 27, 28, 29 e 30).

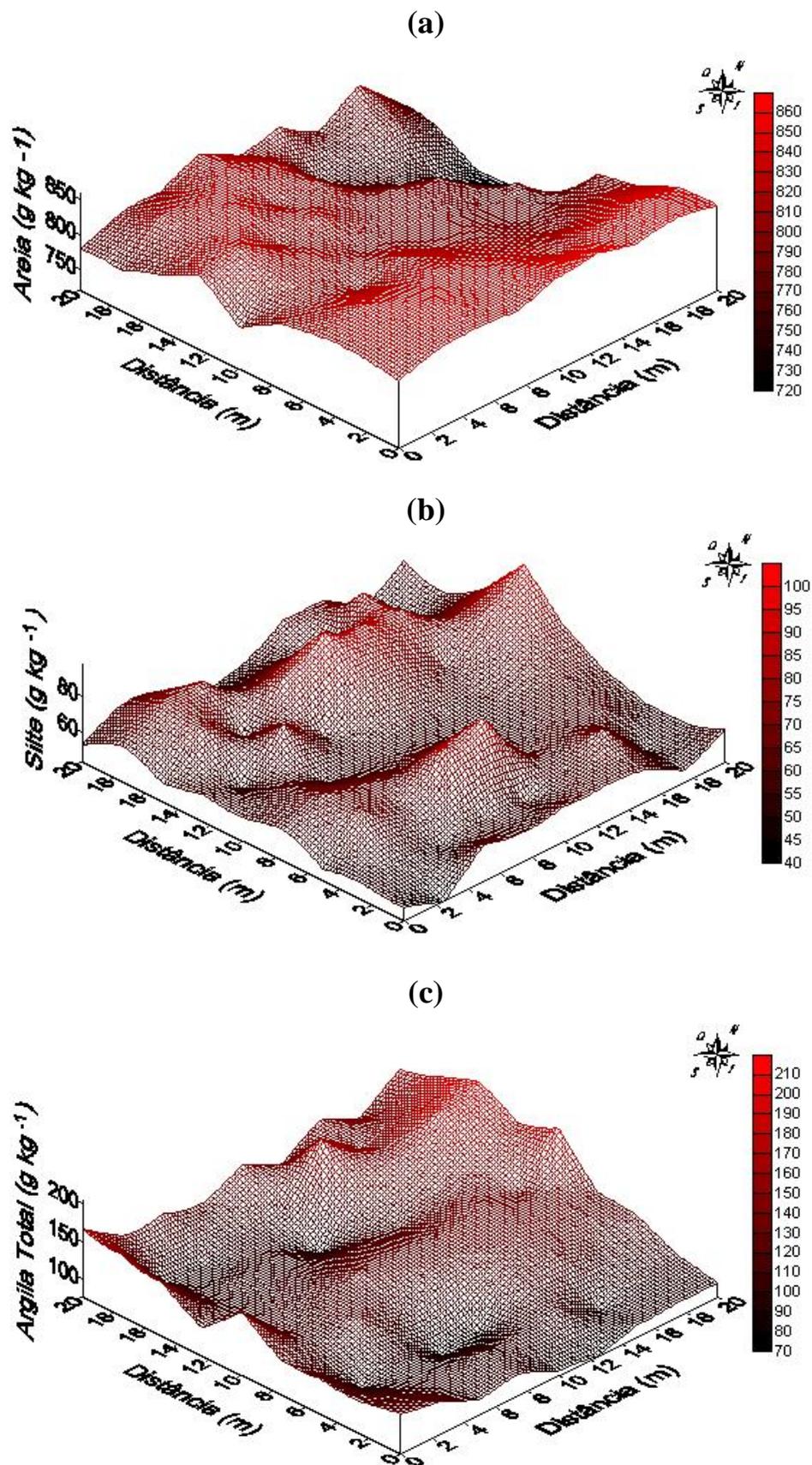


Figura 19 Distribuição espacial das variáveis areia, silte e argila total na profundidade de 0-0,2 m.

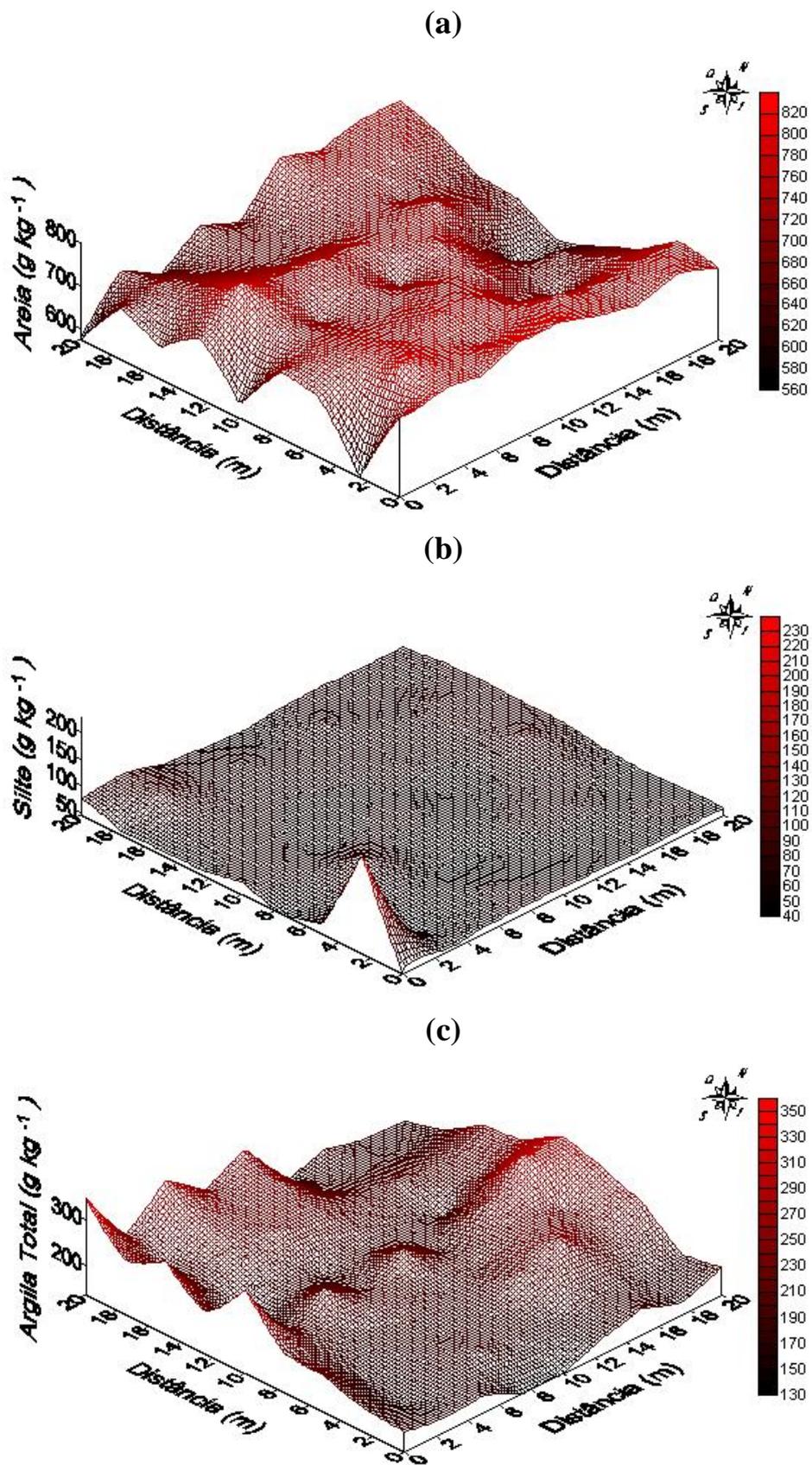


Figura 20. Distribuição espacial das variáveis areia, silte e argila total na profundidade de 0,2-0,4 m.

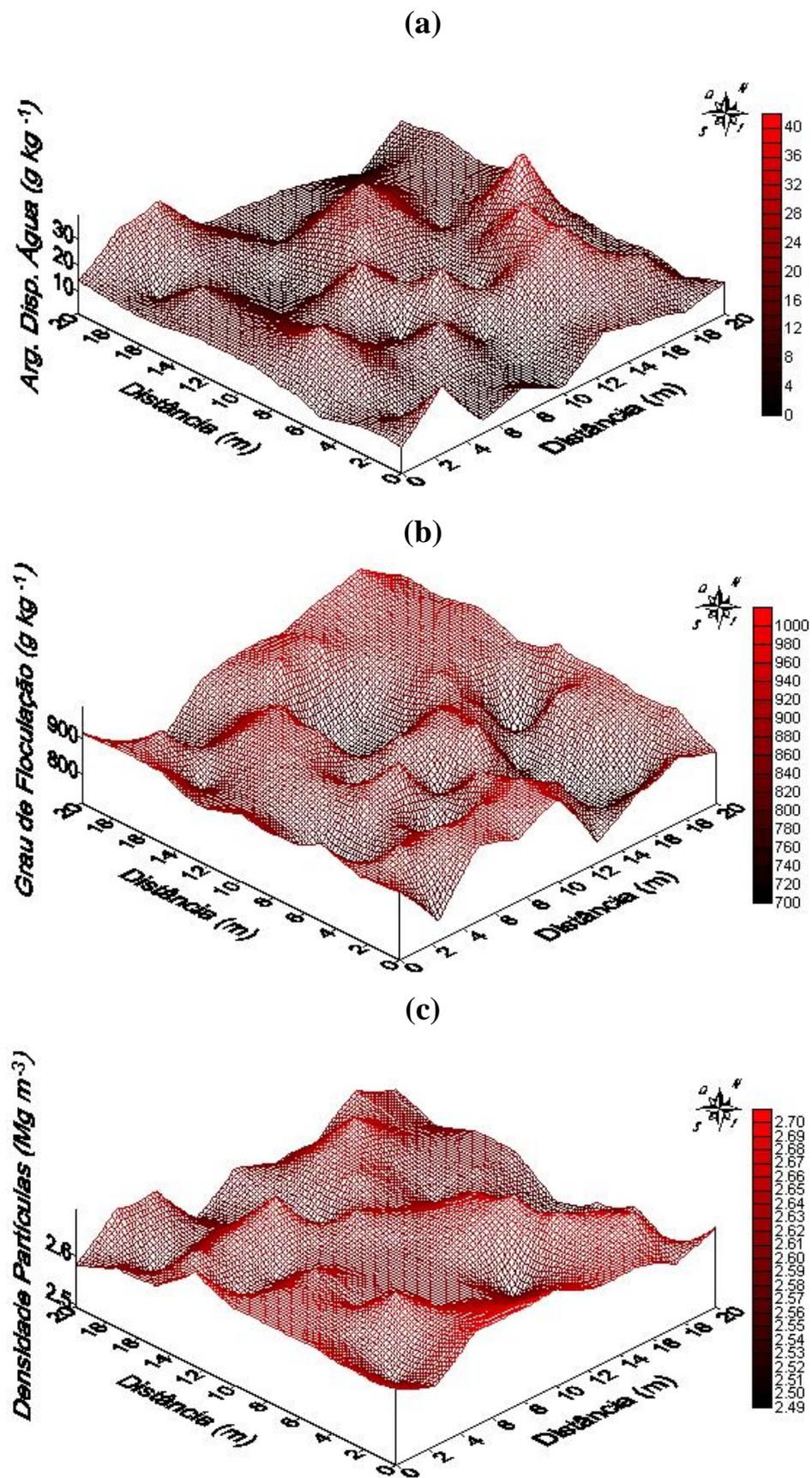


Figura 21. Distribuição espacial das variáveis argila dispersa em água, grau de floculação e densidade das partículas na profundidade de 0-0,2 m.

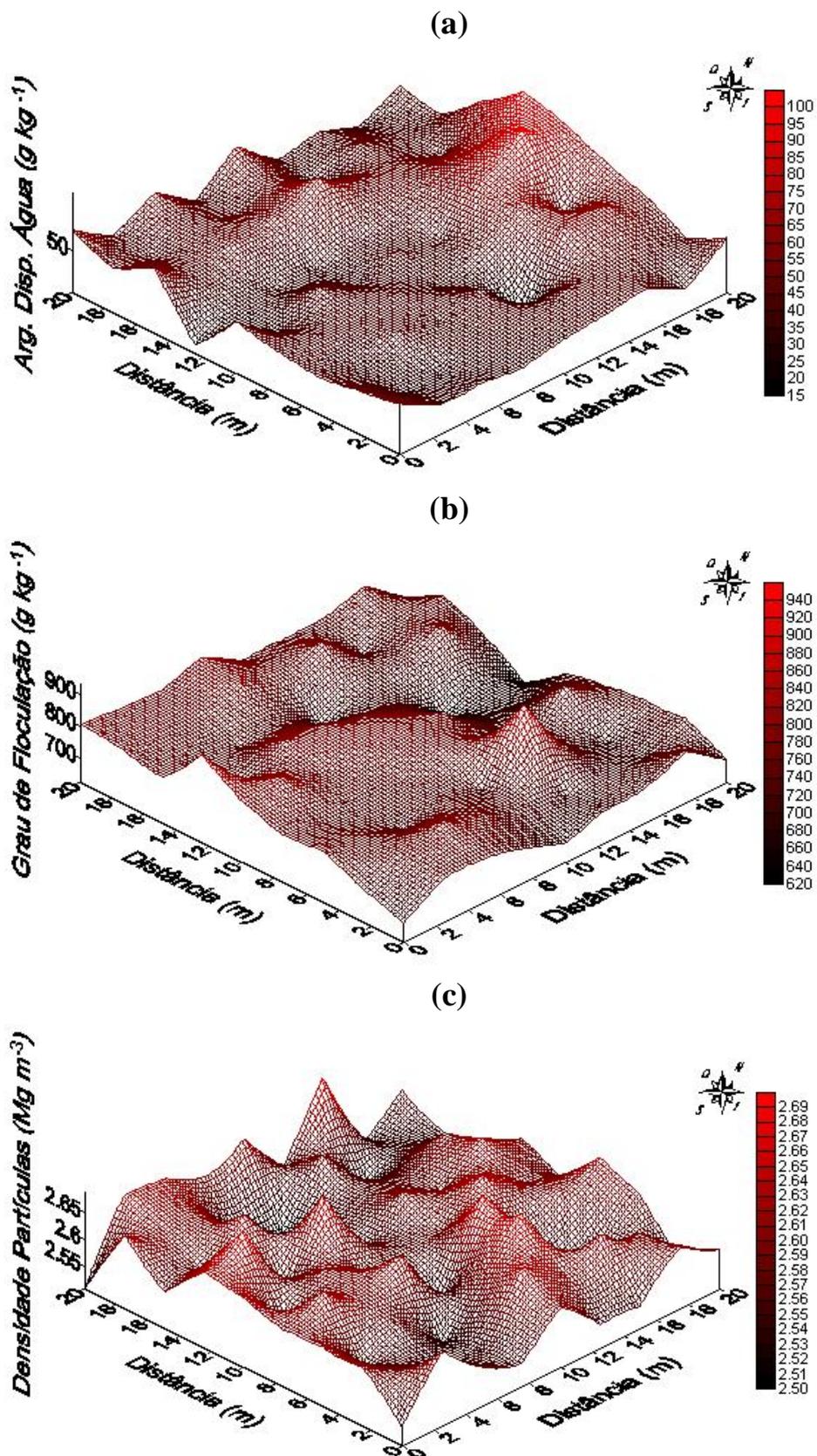


Figura 22. Distribuição espacial das variáveis argila dispersa em água, grau de floculação e densidade das partículas na profundidade de 0,2-0,4 m.

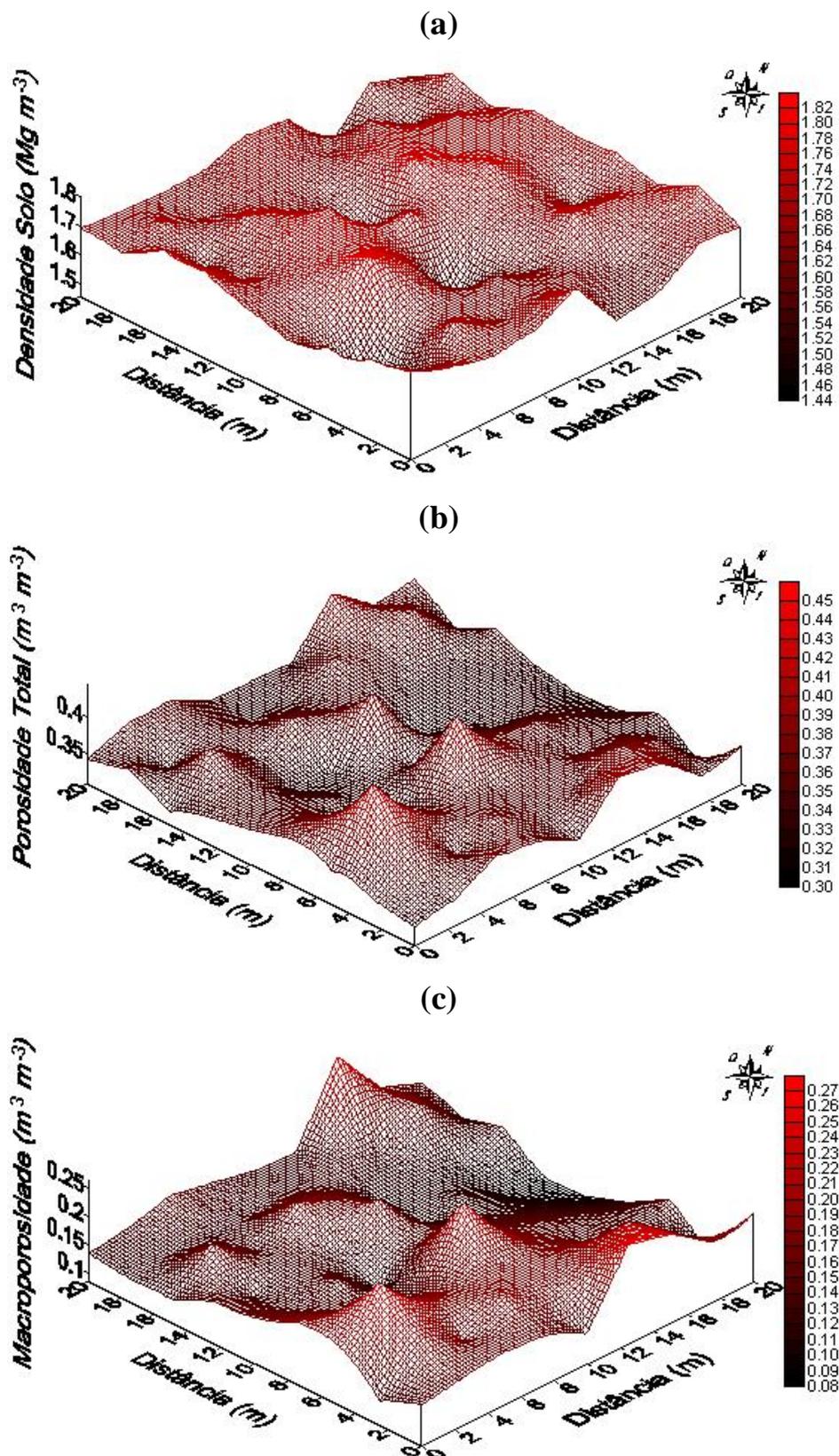


Figura 23. Distribuição espacial das variáveis densidade do solo, porosidade total e macroporosidade na profundidade de 0-0,2 m.

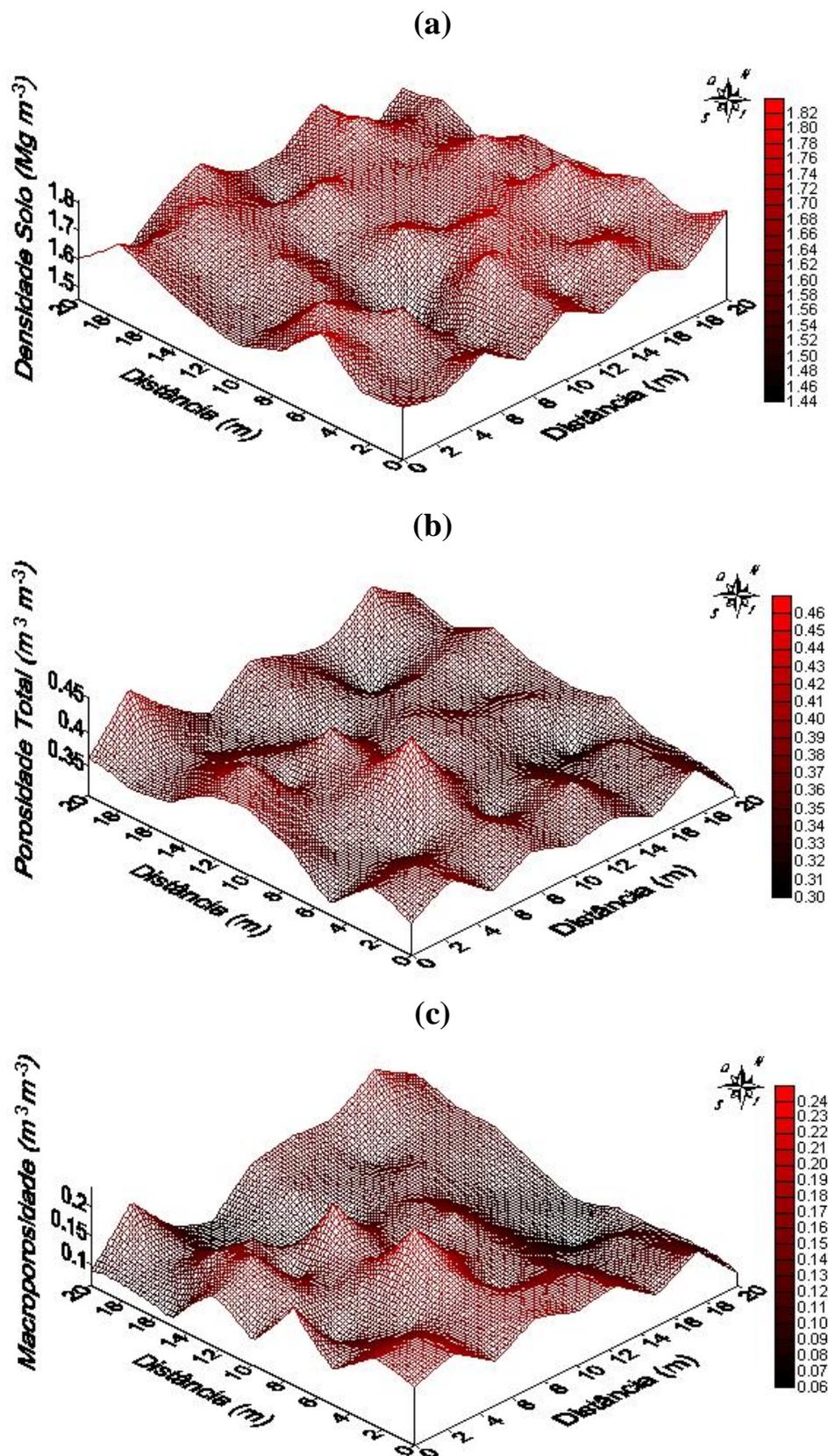


Figura 24. Distribuição espacial das variáveis densidade do solo, porosidade total e macroporosidade na profundidade de 0,2-0,4 m.

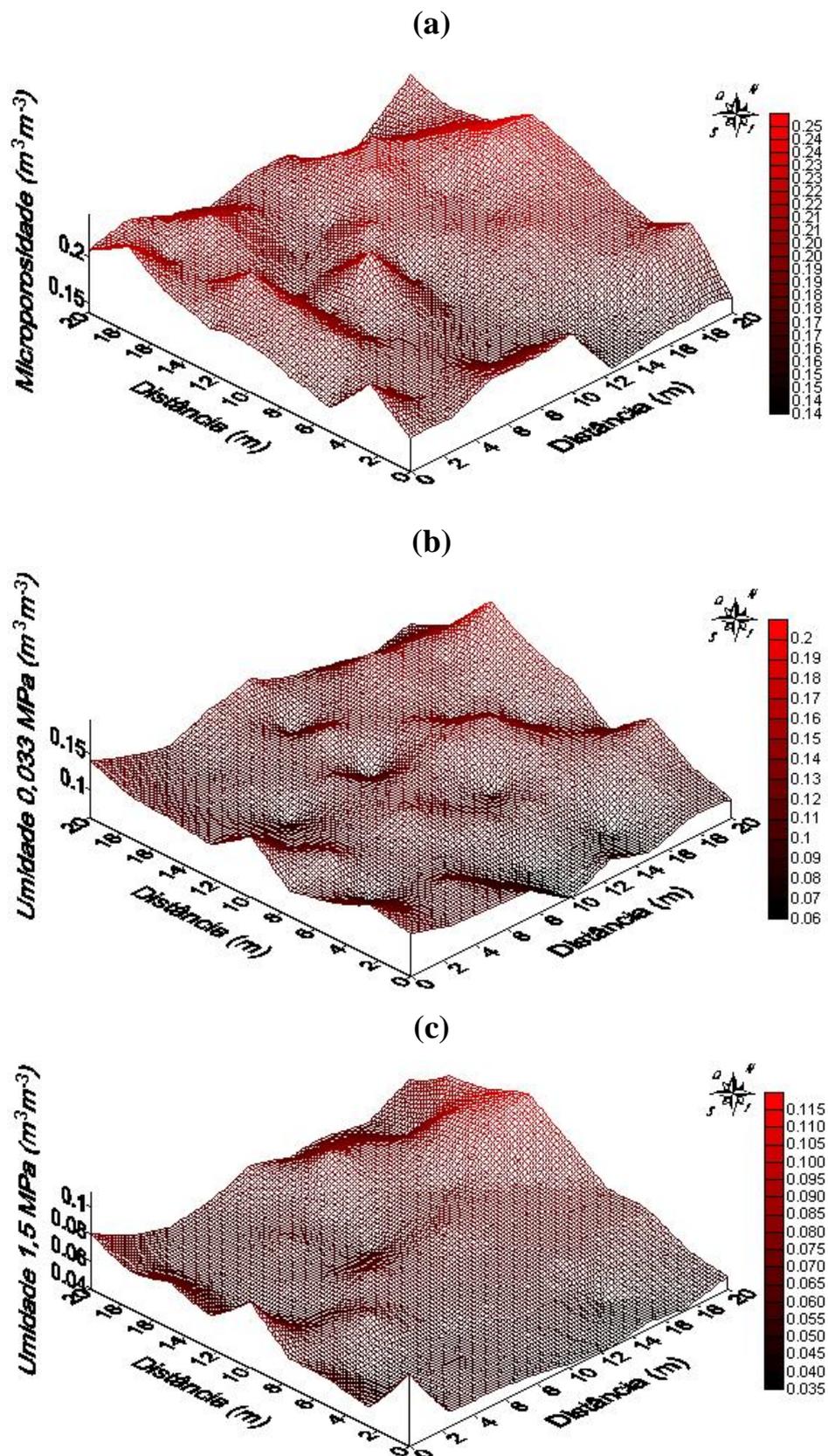


Figura 25. Distribuição espacial das variáveis microporosidade, umidade 0,033 MPa e umidade 1,5 MPa na profundidade de 0-0,2 m.

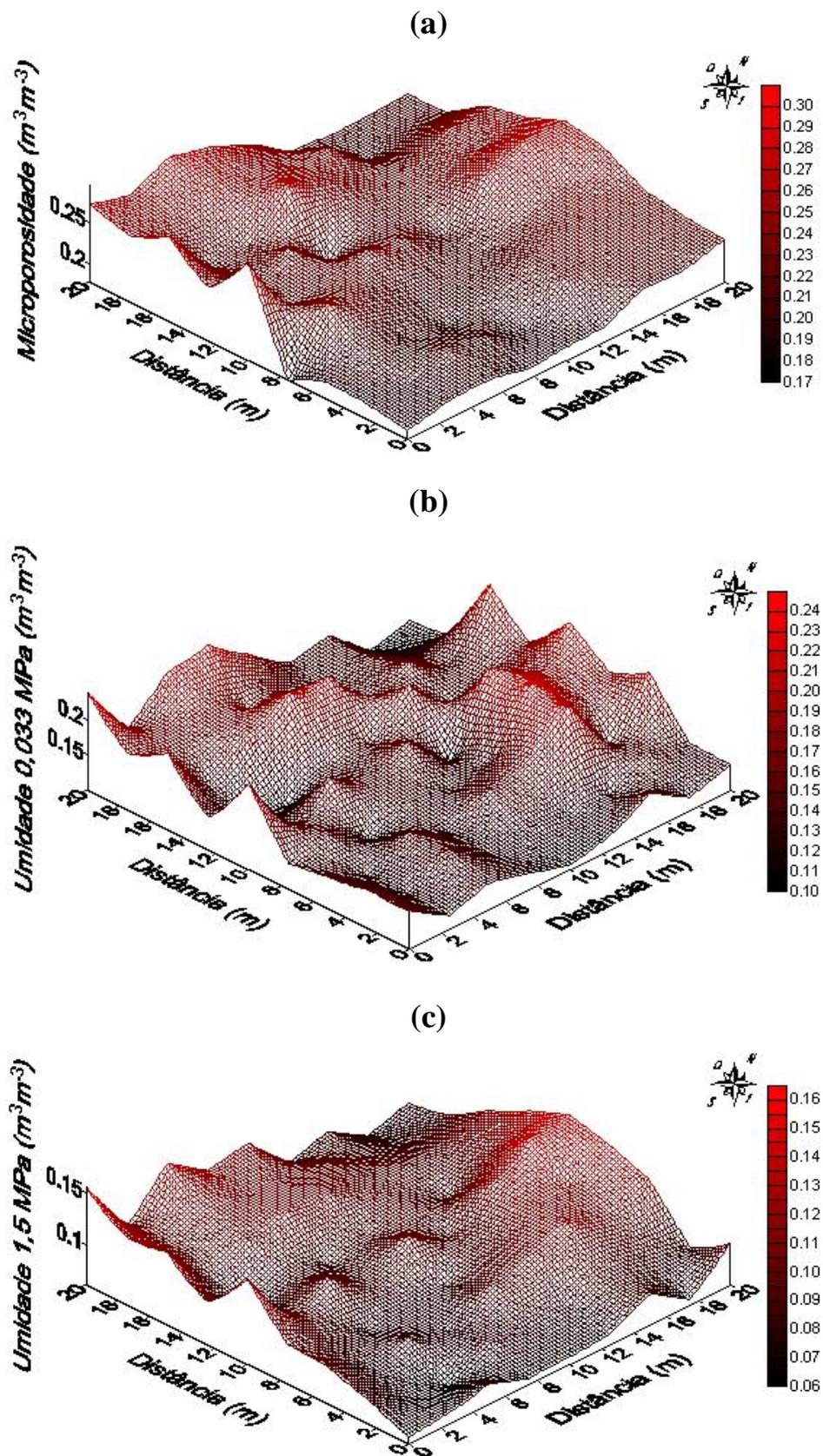


Figura 26. Distribuição espacial das variáveis microporosidade, umidade 0,033 MPa e umidade 1,5 MPa na profundidade de 0,2-0,4m.

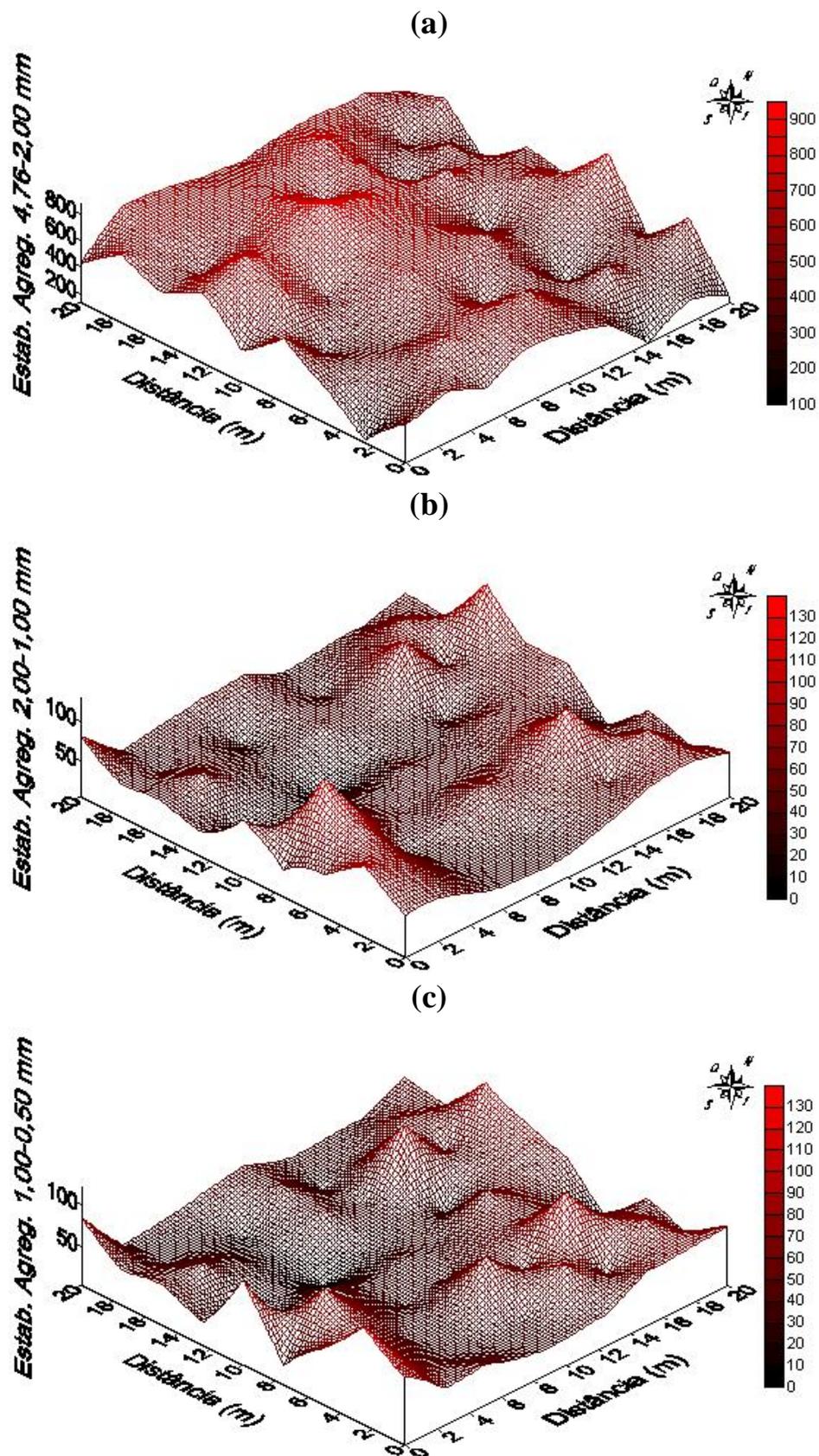


Figura 27. Distribuição espacial das variáveis estabilidade de agregados 4,76-2,00 mm, estabilidade de agregados 2,00-1,00 mm e estabilidade de agregados 1,00-0,50 mm na profundidade de 0-0,2 m.

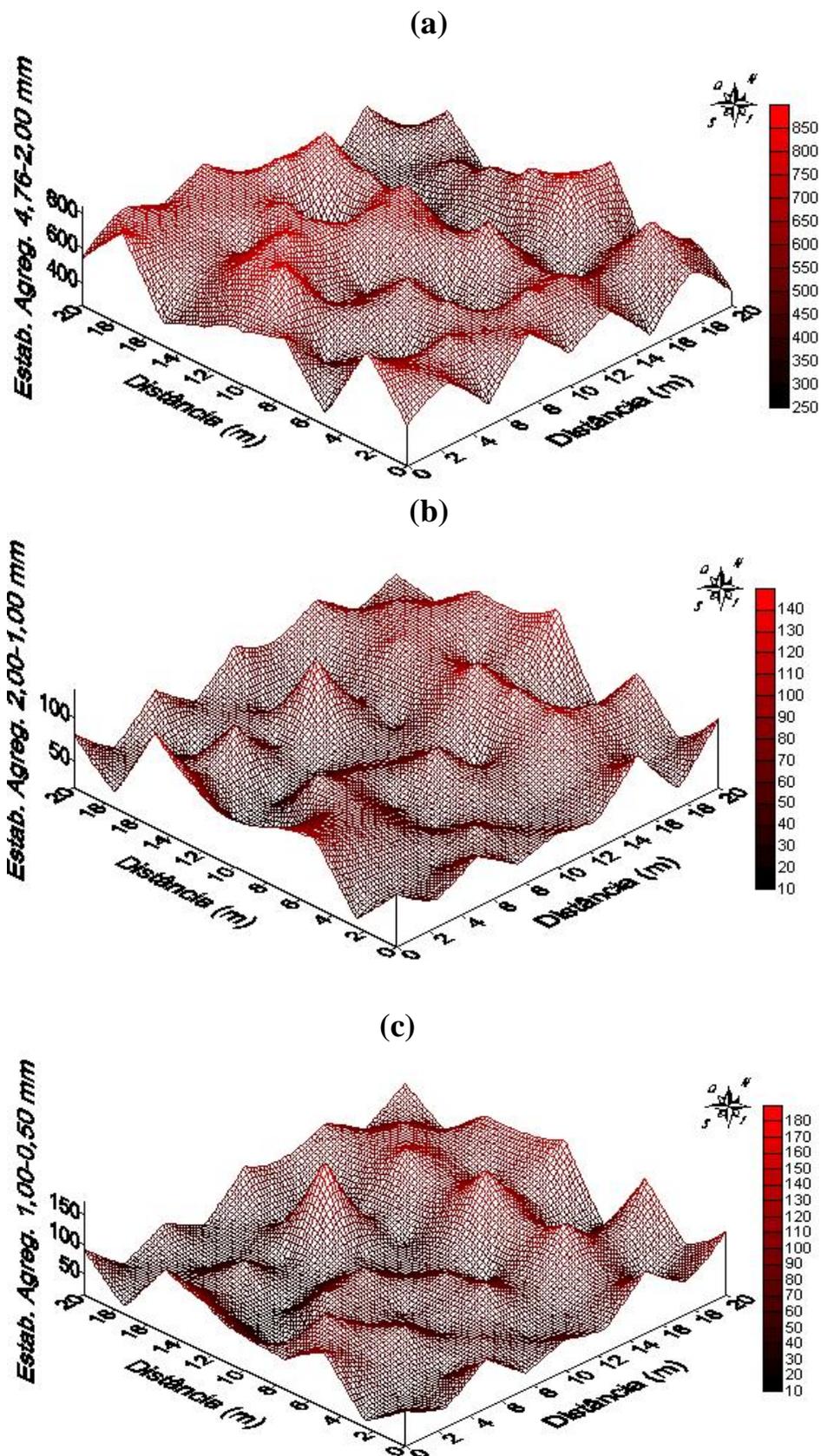


Figura 28. Distribuição espacial das variáveis estabilidade de agregados 4,76-2,00 mm, estabilidade de agregados 2,00-1,00 mm e estabilidade de agregados 1,00-0,50 mm na profundidade de 0,2-0,4 m.

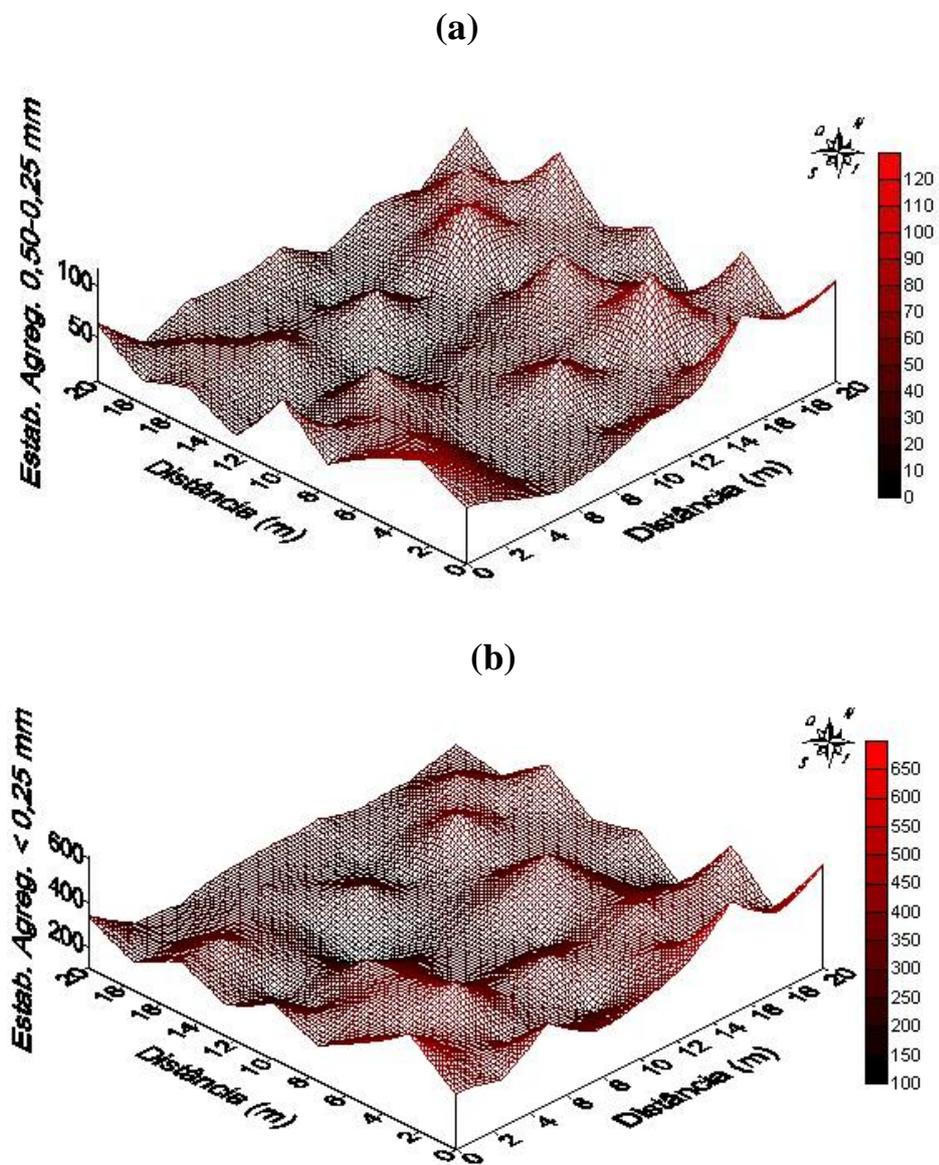


Figura 29. Distribuição espacial das variáveis estabilidade de agregados 0,50-0,25 mm e estabilidade de agregados menores que 0,25 mm na profundidade de 0-0,2 m.

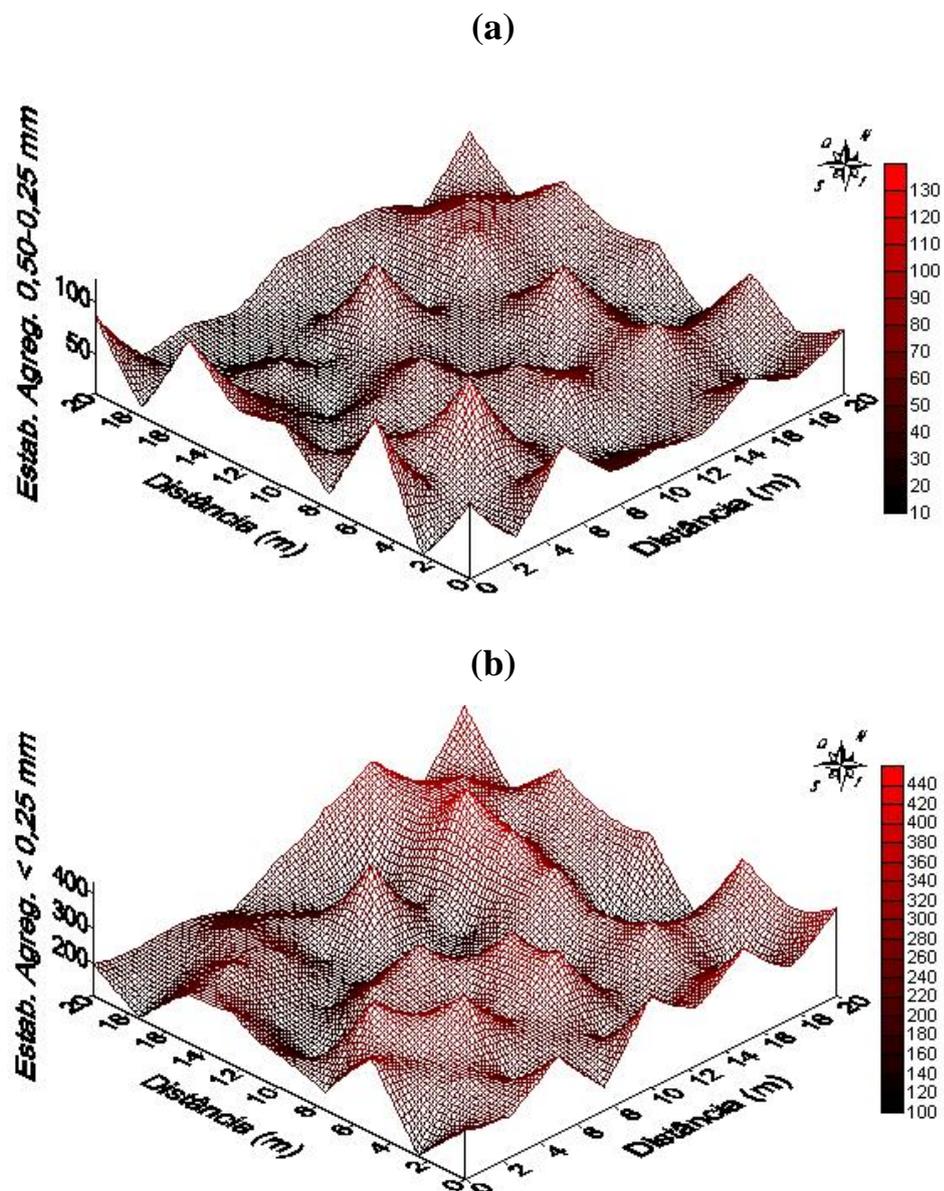


Figura 30. Distribuição espacial das variáveis estabilidade de agregados 0,50-0,25 mm e estabilidade de agregados menores que 0,25 mm na profundidade de 0,2-0,4 m.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que:

1. As variáveis grau de flocculação, densidade do solo, na camada de 0-0,2 m e densidade das partículas na camada de 0,2-0,4 m apresentaram um efeito pepita relativo de 100% (efeito pepita puro), havendo independência entre os pontos amostrados.
2. Houve predomínio do grau de dependência espacial forte para as variáveis analisadas, tanto para aqueles influenciados pelos fatores de formação do solo, como aqueles influenciados por fatores externos.
3. O manejo aplicado ao solo diminuiu a dependência espacial das características intrínsecas como areia, silte e argila, consideradas pouco influenciadas pelo manejo. Por outro lado, propriedades altamente influenciadas pelo manejo como estabilidade de agregados e umidade na capacidade de campo apresentaram uma dependência espacial significativamente aumentada.
4. O manejo interferiu de modos diferenciados nos atributos analisados. Conferiu maior homogeneidade nas propriedades estruturais, implicando em menor número de amostras para representar a área. Entretanto, em relação às características texturais, o manejo aumentou a anisotropia implicando na necessidade de coletar maior número de amostras para representar a área.

5. Os dados do alcance, para as variáveis analisadas, devem ser utilizados como base para delineamentos experimentais mais adequados e também como importante informação acerca do manejo específico local.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, K.C.; SCHULIN, R. & VAN GENUCHTEN, M.T.H. Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization. *Adv. Water Resour.* 24:827-841, 2001.
- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J. & FIORIN, J.E. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:151-157, 1996.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, C.A. Black, v.1, 1982.
- ARCHER, J.R. & SMITH, P.D. The relation between bulk density, available water, and air capacity of soils. *J. Soil Sci.* 23(4):475-480, 1972.
- BACCHI, O.O.S. & REICHARDT, K. Estimativa da condutividade hidráulica do solo através do escalonamento do potencial matricial. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:1-6, 1992.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In.: KLUTE, A. (ed.) *Methods of soil analysis*. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1986. pt. 1, p.363-375. (Agronomy Monography, 9).

- BREJDA, J.J. MOORMAN, T.B., SMITH, J.L., ALLAN, D.L. & DAO, T.H. Distribution and variability of surface soil properties at a regional scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:974-982, 2000.
- BUOL, S.W.; HOLE, F.D.; McCracken, R.J. & Southard, R.J. Soil genesis and classification. 4.ed. Iowa, Iowa State University Press, 1997. 527p.
- BURGESS, T.M. & WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging. *J. Soil Sci.* 31:315-331, 1980.
- BYRNES, W.R.; MCFEE, W.W. & STEINHARDT, G.C. Soil compaction related to agricultural and construction operations. West Lafayette IN, Purdue University, 1982. 164p. (Station Bulletin Nº 397).
- CADIMA, Z.; LIBARDI, P.L. & REICHARDT, K. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica em um Latossolo Vermelho-Amarelo textura média no campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 4:1-6, 1980.
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEM, D.L.; TURCO, R.F. & KONOPA, A.E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:1501-1511, 1994.
- CARPENEDO, V. & MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 14:99-105, 1990.
- CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y. & FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). *R. Bras. Ci. Solo*, 27:695-703, 2003.
- CHICHOTA, R.; JONG VAN LIER, Q. & ROJAS, C.A.L. Variabilidade espacial da taxa de infiltração em Argissolo Vermelho. *R. Bras. Ci. Solo*, v.27, n.5, 2003.

- CINTRA, F.L.D. Caracterização do impedimento mecânico em Latossolo do Rio Grande do Sul. 1980. 89 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1980.
- COELHO, M.A. & MOTA, F.O.B. Regimes hídricos e térmicos de solos do Estado do Ceará. I – Podzólico Vermelho-Amarelo equivalente eutrófico, do município de Fortaleza. *Ciência Agronômica*, 8:3-8, 1978.
- CRESTANA, S.; GUIMARÃES, M.F.; JORGE, L.A.C.; RALISCH, R.; TOZZI, C.L.; TORRE, A. & VAZ, C.M.P. Avaliação da distribuição de raízes no solo auxiliada por processo de imagens digitais. *R. Bras.Ci. Solo*, 18:365-371, 1994.
- CRUZ, J.S. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. 2005. 61 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2005.
- D'AGOSTINI, L.R. Recuperação física do solo por sistemas de cultivo. 1981. 76 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1981.
- DALLA ROSA, A. Práticas mecânicas e culturais na recuperação de características físicas de solos degradados pelo cultivo no solo Santo Ângelo (Latossolo Roxo distrófico). 1981. 138 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1981.
- DANIELSON, R.E. & SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. ed. *Methods of soil analysis*. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Sci. Soc. Am. J., 1986. p.443-461.
- DAY, P.R. Particle fractionation and particle size analysis. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*. American Society of Agronomy, 1965. p.545-567.

- DIRKSEN, C. Soil physical measurements. Reiskirchen, Catena Verlag, 1999.
- EDUCAR. Disponível em: <<http://educar.sc.usp.br/ciencias/recursos/solo.htm>>. Acesso em 02 Jan. 2005.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço de Produção de Informação – SPI. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- ERSAHIS, S. Spatial variability of some physical and chemical soil properties in na Alluvial field. S.U. J. Agric. Fac. 13:34-41. 2001.
- FAO (Roma, Itália). Mapa dos solos do mundo: legenda revista. Roma, 1997. 142p. (FAO. Relatório dos Recursos de Solos do Mundo, 60).
- FONTEH, M.F. & PODMORE, T. Application of geostatistics to characterize spatial variability of infiltration in furrow irrigation. Agr. Water Manage., 25:153-165, 1994.
- FLORES, C.A.. Recuperação da qualidade estrutural de um Argissolo Vermelho sob sistema plantio direto. Pelotas, 2005. 25p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 25).
- GLANVILLE, S.J. & SMITH, G.D. Aggregate breakdown in clay soils under simulated rain and effects on infiltration. Aust. J. Soil Sci., 26(1):111-120, 1988.
- GOLDEN SOFTWARE. SURFER for windows. Realese 8.0. Contouring and 3D surface mapping for scientis't engineers. User's Guide. New York: Golden software, Inc., 2006.
- GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V. & VIEIRA, S.R. Padrões de amostragem e intensidade de krigagem na caracterização do armazenamento de água no solo, em área irrigada por pivô central. R. Bras. Ci. Solo, 23:485-495, 1999.

- GREGO, C.R. & VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:169-177, 2005.
- GUIMARÃES, E.C. Geoestatística básica e aplicada. Uberlândia, 2001. 48p.
- HANSEN, J.W. Is agricultural a useful concept? *Agr. Syst.*, 50:117-143, 1996.
- HARRIS, R.F.; CHESTER, G. & ALLEN, O.N. Dynamics of soil aggregation. *Adv. Agro.*, 18:107-169, 1966.
- JORGE, J.A. & PRADO, H. Porosidade, consistência e propriedades hídricas de três Podzólicos Vermelho Amarelos e uma Terra Roxa Estruturada. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:1-6, 1988.
- KEENEY, D. Soil science in the last 100 years: introductory comments. *Soil Sci.*, 165:3-4, 2000.
- KEMPER, W.D. Aggregate stability. In.: BLACK, C.A. et al., ed. *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy, 1965. p.511-519.
- KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In.: BLACK, C.A. et al., ed. *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy, 1965. p.499-510.
- KEMPER, W.D. & ROSENAU, R.C.A. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 2. ed. American Society of Agronomy, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1986. p.425-422. (Agronomy Monography).
- KIEHL, E.J. Manual de edafologia. São Paulo: Ceres, 1979. 232p.
- KILIÇ, K.; ÖZGÖZ, E. & AKBAS, F. Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical of two fluvents in Turkey. *Soil & Tillage Research*, 76:1-11, 2004.

- KÖPPEN, W. *Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra*. Mexico: Fondo de Cultura Economica, 478p, 1918.
- KRIGE, D.G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. *Journal of Chemical Metall Mining Society South African*, 52:119-139, 1951.
- KUTILEK, M & NIELSEN, D.R. *Soil hydrology*. Cremlingen-Destres, Catena Verlag, 1994. 370p.
- LAL, R. The role of physical properties in maintaining productivity of soils in the tropics. In: LAL, R. & GREENLAND, D.J., ed. *Soil physical properties and crop production in the tropics*. 1. ed. New York, John Wiley, 1979. p.03-05.
- LEE, R.D., GRAHAM, R.C., LAURENT, T.E., AMRHEIN, C. & CREASY, R.M. Spatial distributions of soil chemical conditions in a serpentinitic wetland and surrounding landscape. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1183-1196. 2001.
- LIBARDI, P.L.; PREVEDELLO, C.L.; PAULETTO, E.A. & MORAES, S.O. Variabilidade espacial da umidade, textura e densidade de partículas ao longo de uma transeção. *R. Bras. Ci. Solo*, 10:85-90, 1986.
- LOGSDON, S.D. & JAYNES, D.B. Spatial variability of hydraulic conductivity in a cultivated field at different times. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:703-709, 1996.
- LUXMOORE, R.J; JARDINE, P.M.; WILSON, G.V.; JONES, J.R. & ZELAZNY, L.W. Physical and chemical controls of preferred path flow through a forested hillslope. *Geoderma*, 46:139-154, 1990.
- MCBRATNEY, A.B. & WEBSTER, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties? *Soil Sci.*, 135(3):177-183, 1983.
- MACHADO, T.A.; SOUZA, D.M.P. & BRUM, A.C.R. Efeito de anos de cultivo convencional em propriedades físicas do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 5:187-189, 1981.

- MACHADO, J.A. & BRUM, A.C.R. Efeito de sistemas de cultivo em algumas propriedades físicas do solo. R. Bras. Ci. Solo, 2:81-84, 1978.
- MARCOS, Z.Z. Estrutura, agregação e água do solo. 1968. 55 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1968.
- MATHERON, G. Principles of geostatistic. Econ. Geology, El Paso, 58:1246-1266, 1963.
- MATHERON, G. The theory of regionalized variables and its application. Les cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, Faz. 5, C.G. Fontainebleau, 1971. 211p.
- MONTGOMERY, E.G. Experiments in wheat breeding: experimental error in the nursery and variation in nitrogen and yield. Washington, U.S. Dept. Agric., 1913. 61p. (Bur. Plant Indust. Bul., 269).
- MORCILLO, A.M. Teste de Kolmogorov-Smirnov. Re. Bras. Saúde Materna e Infantil, Recife. 2004.
- MULLA, D.J.; BATÍ, A.U.; HAMMOND, M.W. & BENSON, J.A. A comparison of winter wheat yield and quality under uniform versus spatially variable fertilizer management. Agr. Environ., 38:301-311, 1992.
- NAIME, J.M. Um novo método para estudos dinâmicos, *In Situ*, da infiltração da água na região não saturada do solo. 2001. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Paulo (CRHEA), Universidade de São Paulo, São Carlos. 2001.
- NIELSEN, D.R. & ALEMI, M.H. Statistical opportunities for analyzing spatial and temporal heterogeneity of field soils. Plant Soil, 115:285-296, 1989.
- NIELSEN, D.R.; TILLOTSON, P.M. & VIEIRA, S.R. Analyzing field-measured soil water properties. Agr. Water Manage., 6:93-109, 1983.

- NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. & ERH, K.T. Spatial variability of field-measured soil-water properties. *Hilgardia*, 42:215-260, 1973.
- OLIVEIRA, M. de; CURI, N. & FREIRE, J.C. Influência do cultivo na agregação de um Podzólico Vermelho Amarelo textura média/argilosa da região de Lavras (MG). *R. Bras. Ci. Solo*, 7:317-322, 1983.
- ORLANDO FILHO, J. & RODELLA, A. A análise química do solo e recomendação de adubação. In: ORLANDO FILHO, J., ed. *Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil*. Piracicaba, 1983. p.155-178.
- ORTIZ, G.C. Aplicação de métodos geostatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo. 2002. 91 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2002.
- PAULETTO, E.A.; LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A. & MORAES, S.O. Determinação da condutividade hidráulica de solos a partir da curva de retenção de água. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:189-195, 1988.
- PERRET, J.; PRASHER, S.O.; KANTZAS, A. & LANGFORD, C. Three dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:1530-1543, 1999.
- REICHARDT, K. *Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*. 4.ed. Campinas: Fundação Cargill, 1984, 445p.
- REICHARDT, K.; VIEIRA, S.R. & LIBARDI, P.L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 10:1-6, 1986.
- REICHERT, J.M.; VEIGA, M. da & CABEDA, M.S.V. Índices de estabilidade de agregados e suas relações com características e parâmetros de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:283-290, 1993.

- REINERT, D.J.; MUTTI, L.S.M.; ZAGO, A.; AZOLIN, M.A.D. & HOFFMANN, C.L. Efeito de diferentes métodos de preparo do solo sobre a estabilidade de agregados em solo Podzólico Vermelho Amarelo. R. Cent. Ci. Rur., Santa Maria, 14:19-25, 1984.
- ROBERTSON, G.P. GP+ Geostatistics for the environmental sciences. GS+ User's Guide. Plainwell, Gamma. Design Software, 1998, 152p.
- ROMERO, R.E. & LIMA, V.L. Solos dos tabuleiros costeiros, compostos amorfos e parâmetros de ordem estrutural da caulinita em um horizonte coeso. In: OLIVEIRA, T.S., ed. Solo e água: aspectos de uso e manejo, 1.ed. Fortaleza, 2004. p. 218-241.
- ROS, C.O. da; SECCO, D.; FIORIN, J.E.; PETRERE, C.; CADORE, M.A. & PASSA, L. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. R. Bras. Ci. Solo, 21:241-247, 1997.
- ROSSI, R.E.; MULLA, D.J.; FRANZ, E. H. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. Ecol. Monogr. 62:277-314. 1992.
- SÁ, M.A.C.; LIMA, J.M.; SILVA, M.L.N. & DIAS JUNIOR, M.S. Comparação entre métodos para estudo da estabilidade de agregados em solos. Pesqui. Agropecu. Brás., 35:1825-1834, 2000.
- SALVIANO, A.A.C.; VIEIRA, S.R. & SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea*-L em área severamente erodida. R. Bras. Ci. Solo, 22:115-122, 1998.
- SANTOS, R.D. dos; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G. dos; KER, J.C. & ANJOS, L.H.C. dos. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 5.ed. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 92p.

- SILVA, A.P. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo. 1998. 98 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1998.
- 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. R. Bras. Ci. Solo, 13:1-5, 1989.
- SILVA, A.P. da; LIBARDI, P.L. & CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. R. Bras. Ci. Solo, 10:91-95, 1986.
- SILVA, I.F. da & MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de planta na formação e estabilização de agregados do solo. R. Bras. Ci. Solo, 21:113-117, 1997.
- SILVA, I.F. Efeito de sistemas de manejo e tempo de cultivo sobre as propriedades físicas de um Latossolo. 1980. 76 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1980.
- SILVA, V.R.; RUBIM, R.B.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & SOUTO, J. Compressibilidade de dois solos em função do estado inicial de compactação do solo. In.: XII REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA: agricultura e sustentabilidade no Semi-Árido. Fortaleza, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1998. p.236-237.
- SMITH, L.H. Plot arrangement for variety experimenr with corn. Proceedings of the American Society of Agronomy, 107(09):84-89, 1910.
- SOUSA, J R. Variabilidade espacial de características físico-hídricas e de água disponível em um solo aluvial no semi-árido paraibano. 1999. 65 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. 1999.
- SOUZA, L.S.; COGO, N.P. & VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. R. Bras. Ci. Solo, 21(3):367-372, 1997.

- SOUZA, L.S. Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo. 1992. 166 f. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1992.
- SOUZA, L.S. & COGO, N.P. Caracterização física de um solo da unidade de mapeamento São Jerônimo (PALEUDULT), sobre três sistemas de cultivo. R. Bras. Ci. Solo, 2:170-175, 1978.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J. & PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. R. Bras. Ci. Solo, 28:937-944, 2004a.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J. & PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. Pesq. agropec. bras, 28:491-499, 2004b.
- STATISTICA: Basic Statistics and Tables, 1999. ESAM. www.statsoft.com
- TEIXEIRA, M.A.; MAGALHÃES, P.S.G. & BRAUNBECK, O.A. Equipamento para extração de amostras indeformadas de solo. R. Bras. Ci. Solo, 24:693-699, 2000.
- TIMM, L.C. Efeito do manejo da palha da cana-de-açúcar nas propriedades físico-hídricas de um solo. 2002. 127 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.
- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward classification of climate. Geogr. Rev., New Jersey, 38:55-94, 1948.
- TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S. & UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. Adv. Agron., 38:45-94, 1985.

- VAN LIER, Q. & LIBARDI, P.L. Variabilidade dos parâmetros da equação que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade do solo no método do perfil instantâneo. R. Bras. Ci. Solo, 23:1005-1014, 1999.
- VENDRUSCULO, L.G. Desenvolvimento de um sistema computacional para análise geoestatística. 2001. 87 f. Dissertação (Mestrado), Universidade de Campinas, Campinas. 2001.
- VIEIRA, L.S. & VIEIRA, M.N.F. Manual de morfologia e classificação de solos. Belém, Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, 1981. 580p.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In.: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H. & SCHAEFER, C.E., ed. Tópicos em ciência do solo. 1.ed. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.02-54.
- VIEIRA, S.R. & DE MARIA, I.C. Delineamento experimental e análise estatística na pesquisa em conservação do solo. In: REUNIÓN SOBRE METODOLOGIA PARA INVESTIGACIÓN EN MANEJO DE SUELOS, Passo Fundo, 1990. Dialogo, editado por Puignam e outros. Montevideo, IICA, 1994. p. 3-11. (Dialogo, 39).
- VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. Hilgardia, 51(3):1-75, 1983.
- VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Spatial variability of field measured infiltration rate. Soil Sci. Soc. Am. J., 45:1040-1048, 1981.
- VOMOCIL, J.A. Porosity. In: BLACK, C.A., ed.. Methods of soil analysis. Madison: Wisc. American Society of Agronomy, 1965. p.299-314.
- WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. San Diego: Academic Press, 1980. p.319-345.

- WARRICK, A.W.; MYERS, D.E. & NIELSEN, D.R. Geostatistical methods applied to soil science. In: BLACH, C.A., ed. Methods of soil analysis: Academic Press, 1980. p.319-345. American Society of Agronomy; Soil Sci. Soc. Am. J., 1986. p.53-82.
- WEBSTER, R. & OLIVIER, M.A. Sample adequately to estimate variograms of soil properties. J. Soil Sci., 43:117-192, 1992.
- WEBSTER, R. & OLIVIER, M.A. Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford University Press. Oxford. 1990. 316p.
- YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. Journal of American Society of Agronomy, Washington, 28:391-399, 1936.