

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MANEJO E CONSERVAÇÃO DE BACIAS
HIDROGRÁFICAS NO SEMIÁRIDO

DANIEL ROBERTO ARAÚJO

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM NEOSSOLO
FLÚVICO SUBMETIDO À DIFERENTES TIPOS DE USO E MANEJO DO SOLO**

FORTALEZA, CE

2012

DANIEL ROBERTO ARAÚJO

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM NEOSSOLO
FLÚVICO SUBMETIDO À DIFERENTES TIPOS DE USO E MANEJO DO SOLO

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. Dr. Renildo Luiz Mion – UFC

FORTALEZA – CE

2012

DANIEL ROBERTO ARAÚJO

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM NEOSSOLO
FLÚVICO SUBMETIDO À DIFERENTES TIPOS DE USO E MANEJO DO SOLO

Esta Dissertação foi submetida a julgamento como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre em Engenharia Agrícola – área de concentração Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido, outorgado pela Universidade Federal do Ceará, e encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca de Ciências e Tecnologia da referida Universidade.

APROVADA EM: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Renildo Luiz Mion (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Nilson Salvador
Universidade Federal de Lavras (UFLA)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pois Ele é quem me sustenta e me ajudou, incondicionalmente a chegar até aqui

Aos meus pais, responsáveis pela minha formação e pelo homem que sou hoje

À minha namorada por estar sempre ao meu lado, me ajudando nas horas mais difíceis deste mestrado, além de ter me ajudado incondicionalmente nas minhas coletas e práticas de laboratório

Ao Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal do Ceará, em especial à Francisco José da Silva (Franzé), por ter me ajudado nas análises físicas e em outros ensinamentos, no qual se apresenta como um excelente profissional sempre ajudando a todos no laboratório

Ao grupo de pessoas que compõe o Núcleo de Estudos de Máquinas Agrícolas do Semiárido (NEMASA) por ter me ajudado incessantemente nas coletas de solo

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap) pela concessão da bolsa

À Universidade Federal do Ceará (UFC), mais precisamente ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade deste mestrado e pela convivência com excelentes profissionais e amigos

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), em especial ao Francismar por ter disponibilizado o laboratório de física do solo

Ao professor Dr. Paulo César Moura da Silva por ter me ajudado na parte técnica deste trabalho, além de ter me passado um pouco da sua experiência com o tema do presente trabalho

Ao professor Dr. Renildo Mion, ao qual me ajudou incansavelmente no desenvolvimento do trabalho, dando suporte em material e conseguindo pessoas para ajudar nas coletas de solo

Ao professor Dr. Marcus Bezerra, por ter me ajudado no início do trabalho e com o material para coleta de solo

Aos professores desta instituição aos quais aprendi muita coisa e que vou levar para o resto da minha vida

Aos amigos do curso de mestrado e doutorado em Engenharia Agrícola que me ajudaram, mesmo direta e indiretamente no meu sucesso neste mestrado

"Nos dias de hoje, cada vez mais, acentua-se a necessidade de ser forte. Mas não há uma fórmula mágica que nos faça chegar à força sem que antes tenhamos provado a fraqueza."

Padre Fábio de Melo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	Região semiárida	14
2.2	Degradação das terras agrícolas	14
2.3	Manejo de solos em áreas irrigadas.....	16
2.4	Estudo dos atributos físicos do solo	17
2.4.1	<i>Densidade do solo (Ds).....</i>	18
2.4.2	<i>Resistência mecânica do solo à penetração.....</i>	19
2.4.3	<i>Porosidade do solo.....</i>	20
2.5	Variabilidade espacial de atributos físicos do solo.....	21
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1	Área de estudo	25
3.2	Caracterização da área selecionada.....	26
3.2.1	<i>Gradagem do solo.....</i>	26
3.2.2	<i>Roçadora Entrelinhas</i>	27
3.3	Amostragem do solo	28
3.3.1	<i>Densidade do solo.....</i>	28
3.3.2	<i>Micro e Macroporosidade</i>	29
3.3.3	<i>Resistência mecânica do solo à penetração.....</i>	30
3.3.4	<i>Umidade.....</i>	32
3.3.5	<i>Análise granulométrica.....</i>	33
3.4	Análise dos dados.....	35
3.4.1	<i>Estatística descritiva.....</i>	35
3.4.2	<i>Análise geoestatística.....</i>	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	Análise exploratória dos atributos físicos	38
4.2	Análise geoestatística dos atributos físicos.....	44
5	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	53

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Semivariograma experimental, modelo teórico e seus componentes.	23
Figura 2 - Localização da área de estudo.	25
Figura 3 - Sistematização da área de estudo.	26
Figura 4 - Preparo convencional do solo através da gradagem.	27
Figura 5 - Goiabeira (a) e Mangueira (b) submetida à prática de roçadora nas entrelinhas.	28
Figura 6 - Mesa de tensão de sucção de 60 cm de coluna d'água.	29
Figura 7 - Penetrômetro motorizado PNT-2000.	31
Figura 8 – Cones normalizados pela ASAE S313.3.	32
Figura 9 – Etapas para obtenção de terra fina seca ao ar: (a) amostra sendo destorroada; (b) sendo introduzida na peneira de 2mm; (c) restos grosseiros e (d) terra fina seca ao ar.	34
Figura 10 - Agitador elétrico "stirrer"	35
Figura 11 - Amostras em cilindros de sedimentação com a respectiva prova em branco.	35
Figura 12 - Triângulo de classificação textural de solos para a área com sistema de manejo com roçadora nas entrelinhas	38
Figura 13 – Histograma e gráfico Box-plot para a areia (a), argila (b) e silte (c) na área com sistema de preparo com roçadora nas entrelinhas.	41
Figura 14 – Histograma e gráfico do tipo Box-plot para os atributos micro (a), macro (b), densidade do solo (c), resistência à penetração (d) e umidade do solo (e) na área com sistema de preparo com roçadora nas entrelinhas.	41
Figura 15 – Histograma e gráfico Box-plot das texturas areia (a), argila (b) e silte (c) na área com sistema de preparo por gradagem.	43
Figura 16 – Histograma e gráfico Box-plot dos atributos micro (a), macro (b), densidade do solo (c), resistência à penetração (d) e umidade do solo (e) na área com sistema de preparo por gradagem.	43
Figura 17 - Semivariograma da areia, argila e silte do sistema de manejo de roçadora nas entrelinhas (esquerda) e gradagem (direita).	45
Figura 18 – Semivariograma da micro, macro, densidade do solo, resistência à penetração e umidade do solo do sistema de manejo de roçadora nas entrelinhas (esquerda) e gradagem (direita).	46

Figura 19 - Mapas de isolinhas para os atributos físicos na área com manejo de roçadora entrelinhas (lado esquerdo) e na área com manejo de gradagem (lado direito) em um Neossolo Flúvico na Fazenda de Pentecoste, 2011.....49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva dos atributos físicos em um NEOSSOLO FLÚVICO em Pentecoste, Ceará, 2011.....	40
Tabela 2 - Parâmetros de ajuste dos modelos de semivariogramas e respectivos graus de dependência espacial para as variáveis estudadas.....	48

RESUMO

ARAÚJO, Daniel Roberto. Universidade Federal do Ceará, Fevereiro de 2012. **Variabilidade espacial de atributos físicos de um neossolo flúvico submetido à diferentes tipos de uso e manejo do solo.** Orientador: Renildo Luiz Mion. Conselheiros: Francisco Marcus Lima Bezerra. Nilson Salvador.

O solo apresenta, naturalmente, heterogeneidade, ou seja, seus atributos variam no espaço e no tempo. No semiárido essa característica intrínseca do solo não recebe tal importância, muitas vezes por falta de conhecimento, trabalhando-se com o solo de forma homogênea. A caracterização da variabilidade dos atributos do solo é necessária para que se possam interpretar as possíveis causas de variações nas produtividades das culturas. A geoestatística está sendo utilizada com bastante frequência, principalmente nas ciências do solo, como forma de analisar o comportamento e distribuição dos atributos do solo no espaço. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi analisar a variabilidade espacial, através da ferramenta GS+, dos atributos físicos de um Neossolo Flúvico submetido a dois sistemas de uso e manejo de solo: gradagem e roçadora nas entrelinhas. A área manejada com gradagem possui 0,5 ha e a área roçada nas entrelinhas possui 2,5 ha. Estão localizadas no plano sistematizado da Fazenda Experimental do Vale do Curú em Pentecoste. Foram retiradas amostras de solo deformadas e indeformadas nas duas áreas obedecendo ao espaçamento de 15 x 15 m totalizando 99 pontos, 21 na área com gradagem e 78 na área com roçadora nas entrelinhas. A resistência mecânica do solo à penetração apresentou o maior coeficiente de variação. A densidade foi o único atributo que apresentou efeito pepita puro, não havendo estrutura de dependência espacial. Os demais atributos (areia, argila, silte, micro e macroporosidade, umidade gravimétrica do solo e resistência mecânica do solo à penetração) apresentaram dependência espacial de média a alta. Verificou-se através dos mapas, gerados pelo software Surfer 8.0 os locais de maiores e menores concentrações em cada área. Observou-se que a área onde foi feito o tratamento roçadora nas entrelinhas apresentou valores baixos de macroporosidade e altos de resistência à penetração, condição de restrição para o crescimento das raízes.

Palavras-Chave: Geoestatística. Dependência espacial. Física do solo.

ABSTRACT

ARAÚJO, Daniel Roberto. **Spatial variability of physical attributes of fluvial soil submitted to different use and soil management.** Orientador: Renildo Luiz Mion. Conselheiros: Francisco Marcus Lima Bezerra. Nilson Salvador.

The soil has, naturally, heterogeneity, ie, its attributes change in space and on time. In Semiarid this characteristic of the soil does not receive such importance, often for lack of knowledge, working with the soil unevenly. The characterization of the variability of soil attributes is necessary so that we can interpret the possible causes of variations in crop yields. The geostatistic has been used often, specially in soil science as a way to analyze the behavior and distribution of soil properties in space. Thus, the objective of this study was to analyze the spatial variability, through the tool GS+, the physical attributes of a typical fluvial soil under two systems of use and management of soil: disking and mowing lines. The area managed by disking has 0.5 ha and the area with 2.5 ha mowing lines. They are located on the systematic plan of Experimental Farm in the Valley Curu Pentecoste. Soil samples were taken in both disturbed and undisturbed areas obeying the spacing of 15 x 15 m totaling 99 points, 21 in the area with harrowing and 78 in the area by mowing between the rows. The mechanical resistance to penetration had the highest coefficient of variation. The density was the only attribute which there wasn't spatial dependence structure. The other attributes (sand, clay, silt, micro and macroporosity and gravimetric soil moisture and the mechanical resistance to penetration) showed spatial dependence of medium until high. It was found through the maps generated by the software Surfer 8.0 sites of higher and lower concentrations in each area. It was observed that the mowing area is made between the lines showed lower values macroporosity and high penetration resistance, the constraint condition for the growth of roots.

Keywords: Geoestatistic. Spatial dependence. Soil physics.

1 INTRODUÇÃO

Para uma exploração agrícola sustentável é fundamental o conhecimento dos solos, pois, somente desta forma poderão ser adotados manejos adequados que proporcionem produtividades continuamente satisfatórias e evitem a degradação dos solos. Os solos, quando usados para fins agrícolas, sofrem degradação física, cuja magnitude depende do manejo, tipo de solo e do clima. A degradação das propriedades físicas do solo é um dos principais processos responsáveis pela perda da qualidade estrutural e aumento da erosão hídrica.

O conhecimento das propriedades físicas se constitui uma excelente ferramenta em sistemas de conservação do solo. Naturalmente os solos apresentam certa heterogeneidade, onde isso pode ser acelerado pelos sistemas de manejos e usos do solo. Muitas vezes essa heterogeneidade não é respeitada e os produtores acabam por tratar o solo de forma homogênea, contribuindo com perdas da produção e produtividade.

Os atributos físicos do solo variam entre pontos relativamente próximos em área de mesma unidade taxonômica, muitas vezes de forma significativa. Em consequência dessas variações, o uso do valor médio é, às vezes, de pouca utilidade, podendo conduzir a decisões de manejo equivocadas, principalmente no sistema solo-água-plantas. Neste sentido, a variabilidade espacial das propriedades do solo deve ser bem conhecida, visando minimizar os erros na amostragem e no manejo do solo quanto a fertilização, irrigação, calagem entre outros.

Para o estudo destas variáveis são usados diversos procedimentos geoestatísticos de estimação e simulação, a partir de um conjunto de amostras localizadas no domínio espacial, onde essa variabilidade se manifesta. O emprego da geoestatística com o objetivo de identificar e avaliar a estrutura espacial de variáveis do solo introduz uma nova e importante dimensão para a análise da interação entre os atributos físicos do solo.

Essa variabilidade é representada através de semivariogramas, gráficos que relacionam a semivariância de uma variável qualquer com uma distância, onde é composta por três parâmetros: efeito pepita (C_0) onde representa o componente da variação ao acaso; o patamar ($C + C_0$) representando o valor da semivariância onde a curva se estabiliza e o alcance (a), distância máxima de dependência espacial entre os pontos amostrais.

A geoestatística também é responsável por possibilitar a estimativa em pontos não amostrados, através da “krigagem”, viabilizando o mapeamento e o zoneamento da variável. As informações representadas nestes mapas facilitam o entendimento da variabilidade

identificando as áreas com maior ou menor concentração de determinados atributos do solo, ajudando na adoção de sistemas de manejos diferenciados do solo.

Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo na camada de 0-15 cm, através de métodos geoestatísticos em dois diferentes sistemas de manejo do solo com diferentes usos.

Como objetivos específicos tem-se:

- Determinar os atributos físicos do solo nas duas áreas;
- Aplicar a análise exploratória dos dados;
- Verificar o comportamento desses atributos entre os sistemas de uso e manejo do solo;
- Aplicar diferentes modelos de semivariogramas nos atributos e verificar qual melhor representa a variabilidade dos mesmos;
- Verificar o comportamento espacial dos atributos físicos do solo através de mapas de variabilidade espacial do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Região semiárida

O semiárido brasileiro se caracteriza por apresentar elevada taxa de evapotranspiração, baixo índice pluviométrico e solos pouco intemperizados, além de apresentar pequena produção de fitomassa (MAIA et al., 2006; SOUZA et al., 2000).

Apresenta alta variabilidade temporal das precipitações e das características geológicas dominantes, onde há predominância de solos rasos originados de rochas cristalinas, havendo pouca troca de água entre o rio e o solo (CIRILO, 2008).

O manejo inadequado dos recursos naturais nessa região desorganiza a estrutura social, comprometendo a produção de alimentos para as comunidades rurais, principalmente aquelas de menor poder econômico (ANDRADE et al., 2010). Segundo os mesmos autores, a degradação das terras nesta região é comum, onde a recuperação da capacidade produtiva pode ser demorada ou mesmo impossível.

Alguns fatores podem estar associados a este cenário que marca a atividade agrícola nordestina. A agricultura é desenvolvida à custa de um desmatamento indiscriminado, queimadas e períodos de pousio inadequados (MAIA et al., 2006). Estas práticas, comum nesta região, são responsáveis por prejudicar a manutenção da fauna silvestre, a qualidade da água, e o equilíbrio do clima e do solo (SANTOS, 2010).

Por se tratar de uma região bastante frágil do ponto de vista climático e sócio-econômico, há a necessidade de se entender a mesma através de uma visão holística onde se interlace, o território, o homem e os recursos naturais presentes nesse território (ANDRADE et al., 2010).

2.2 Degradação das terras agrícolas

Nas últimas décadas, as atividades agrícolas vêm modificando a cobertura vegetal original de parte do território brasileiro (FARIA et al., 2010). Essa mudança tem contribuído para a degradação das terras agrícolas, sendo a principal razão para a redução de sua fertilidade e a capacidade de produção (SANTIN, 2006). O autor explica que, cerca de 23% do total de terras agricultáveis no mundo já foram afetadas em um grau suficiente para ameaçar sua produtividade, sendo consequência do:

uso indevido das terras agrícolas; práticas inadequadas de manejo do solo; desmatamento; remoção da vegetação natural; uso frequente de máquinas pesadas; abertura excessiva de novas áreas de pastagens, que eleva a intensidade do desmatamento; rotação incorreta de cultivos e práticas de irrigação inapropriadas.

Para Silva et al. (2005), os sistemas de preparo do solo podem influenciar o armazenamento de água disponível para as plantas, devido às modificações na estrutura, porosidade e teor de carbono orgânico, alterando as forças de retenção e disponibilidade de água do solo para as plantas.

O preparo convencional é responsável por promover um intenso revolvimento do solo na camada superficial, o que pode favorecer a decomposição da matéria orgânica, ocasionando considerável efeito prejudicial na qualidade estrutural do solo (BERTOL et al., 2001). Segundo os autores, em solos intensamente cultivados por este sistema, o surgimento de camadas compactadas, com redução do volume de macroporos e aumento de microporos, determina uma diminuição do volume de poros ocupados pelo ar e um aumento na retenção de água.

Silva et al. (2004) observou que na superfície até a profundidade de 12 cm, o solo sofre os maiores efeitos do tráfego de máquinas, da atividade biológica e de ciclos de umedecimentos e secagem que provocam grande variabilidade e dispersão dos valores de resistência mecânica do solo à penetração.

Em épocas de chuva, o sistema de preparo convencional afeta mais o solo, pois, de acordo com Siqueira (2006), a energia cinética provocada pelas gotas de chuva na superfície do solo sem a cobertura vegetal contribui para o aumento do impacto, exercendo forças de pressão e cisalhamento no ponto de impacto, proporcionando a desagregação das partículas.

Outra forma de manejo que afeta a qualidade do solo é o uso de máquinas. Seu uso atrelado à outros equipamentos na agricultura vem contribuindo para o aumento da produtividade. Porém, a passagem sucessiva desses elementos na mesma área, aumenta a densidade do solo e a resistência à penetração das raízes, prejudicando o desenvolvimento das culturas neste solo (RUIZ, 2003).

De acordo com Silva et al. (2000), um trator agrícola proporciona uma pressão de 92 a 600 kPa, dependendo do porte, carga da máquina e tração de implemento. No entanto, é possível reduzir o grau de compactação, estabelecendo-se critérios com níveis de teores de água no solo em que possa trafegar com as máquinas (RUIZ, 2003).

O revolvimento contínuo do solo e a movimentação intensa de máquinas e implementos na superfície têm sido as causas primárias na formação de camadas compactadas

em subsuperfície (ANDRADE et al., 2010). Richart et al. (2005) consideram a compactação do solo como fator limitante da qualidade física do solo, prejudicando a produtividade e influenciando na desagregação do solo.

2.3 Manejo de solos em áreas irrigadas

Os diferentes sistemas de manejo de solos têm a finalidade de criar condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas (TAVARES FILHO et al., 2001). Segundo Fontenele (2006), a escolha de um sistema de manejo adequado do solo e culturas é fundamental para agregação do solo, proporcionando o aporte de material orgânico, beneficiando as raízes das plantas e protegendo a superfície do solo.

Nos últimos anos, tem havido uma preocupação com o manejo deste recurso natural, uma vez que, seu uso e mobilização intensiva podem redundar na diminuição de sua capacidade em manter uma produção biológica sustentável (CARVALHO et al., 2004). Para Casalinho et al. (2007), os limites sociais, econômicos e ambientais do modelo de modernização conservadora da agricultura e a preocupação com o futuro das próximas gerações, foram determinantes para o desenvolvimento de uma produção ecologicamente equilibrada, socialmente justa e economicamente viável.

Em áreas irrigadas, o manejo do solo é caracterizado por revolver mais intensamente a superfície, refletindo-se nas suas propriedades originais, podendo torná-los mais susceptíveis ou não aos processos de degradação (ANDRADE et al., 2010).

Para Romero (2007) a compreensão e a quantificação do impacto do uso e manejo do solo na sua qualidade física, como a prevenção da compactação, são fundamentais no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis.

Diante disso, torna-se importante a adoção de práticas conservacionistas do solo que contribuam para uma melhor qualidade do mesmo. Segundo Silva et al. (2000), a adoção de sistemas de manejo que mantenham a proteção do solo através do contínuo aporte de resíduos orgânicos contribui para a manutenção de uma boa estrutura do solo.

Em sistemas conservacionistas do solo, segundo Bertol et al. (2004), a porosidade é mais contínua, favorecida pela maior estabilidade estrutural do solo, facilitando a infiltração de água e dificultando o escoamento superficial em relação ao preparo convencional e, muitas vezes, em relação a ambientes naturais.

Em sistemas de cultivo mínimo há um menor revolvimento do solo e a redução máxima da movimentação de máquinas e implementos na superfície (ANDRADE et al., 2010). Segundo os mesmos autores, essa condição favorece a preservação da estrutura e os aportes de matéria orgânica e, conseqüentemente, contribui para a manutenção de um solo bem estruturado.

Em contrapartida, observa-se nesses sistemas, um aumento da densidade do solo e diminuição da macroporosidade em relação ao preparo convencional, sendo causa do adensamento natural da estrutura do solo, decorrente da ausência total ou parcial do revolvimento do solo (DALBIANCO, 2009). Como não há revolvimento do solo, pode ocorrer a formação de camadas compactadas pelas pressões exercidas pelas máquinas além de ocorrer o selamento natural do solo.

O manejo do solo nas entrelinhas de culturas perenes é um pré-requisito importante para promover o arejamento da camada explorada pelas raízes, facilitar a absorção de água e nutrientes (EMBRAPA, 2012). Quando realizado de forma inadequada, pode intensificar a erosão e promover compactação subsuperficial. O mesmo autor alerta que o melhor manejo é aquele que se utiliza o mínimo possível de operações mecanizadas.

Destaca-se, pois, a importância da adoção de sistemas de manejo sustentáveis, com reduzido revolvimento do solo e, manutenção dos resíduos vegetais na superfície, favorecendo uma boa estruturação do solo, sendo um diagnóstico qualitativo e quantitativo do solo, fundamental para verificar a qualidade do manejo utilizado (TAVARES FILHO et al., 2001).

2.4 Estudo dos atributos físicos do solo

Os atributos físicos são fundamentais para quantificar a degradação do solo (Reynolds et al., 2008), fornecendo informações para a estimativa da susceptibilidade do solo à erosão, modelagem hidrológica, projetos de irrigação e também para o estabelecimento de sistemas de manejo do solo e da água (DALBIANCO, 2009). De acordo com Campos et al. (2007), o conhecimento do comportamento destes atributos configura-se como uma ferramenta básica no estabelecimento de práticas de manejo adequadas do solo e de culturas.

Para Grego e Vieira (2005), estes atributos variam de um local para outro no solo, apresentando continuidade espacial, sendo, de acordo com Bertol et al. (2000), fundamental o monitoramento dos mesmos, pois o uso intensivo do solo pode provocar mudanças indesejáveis no seu comportamento físico-hídrico.

O uso destes atributos, para tais fins, apresenta vantagens relacionadas ao baixo custo, metodologias simples e rápidas e relação direta com os demais atributos químicos e biológicos do solo (MENDES et al., 2006). Segundo Junqueira Júnior (2006), algumas práticas de manejo do solo provocam alterações nestes atributos, sobretudo na estrutura, sendo que estas alterações podem ser permanentes ou temporárias. De acordo com Siqueira (2006), a estrutura do solo é considerada como uma das mais importantes sob o ponto de vista agrícola, uma vez que são atribuídas propriedades fundamentais da relação solo-planta.

De acordo com Camargo e Alleoni (1997), as principais alterações na estrutura do solo é causada pelo aumento da densidade do solo (Ds), redução do teor de matéria orgânica (MO), diminuição da porosidade (VTP), tamanho dos agregados, taxa de infiltração de água e resistência à penetração das raízes.

Santos (2007) explica que, o uso intensivo do solo, geralmente, provoca a deterioração de suas propriedades físicas, apresentando modificações na densidade, permeabilidade, estrutura, porosidade e estado de agregação.

De acordo com Fontenele (2006), solos desestruturados e compactados geralmente apresentam valores altos de densidade do solo e baixos de porosidade em função do uso e manejo incorreto, dificultando a penetração das raízes e a difusão de oxigênio, impedindo o desenvolvimento das plantas.

Neste sentido, o conhecimento das propriedades físicas de solos irrigados sob diferentes usos em ambiente semiárido fornecerá subsídios para a compreensão dos processos de degradação verificados nessas áreas, contribuindo para ajustes nas técnicas de manejo do solo, evitando a degradação deste recurso natural no Nordeste do Brasil (CORRÊA et al., 2010).

2.4.1 Densidade do solo (Ds)

O impacto das práticas de manejo e das culturas sobre a estrutura do solo pode ser quantificado por meio de diversos parâmetros, dentre os quais se destaca a densidade do solo devido à facilidade para sua obtenção (CORRECHEL et al., 1999). A densidade do solo é um dos principais parâmetros físicos utilizados em estudos do solo, uma vez que “fornece indicações a respeito do estado de sua conservação, sendo uma das primeiras propriedades a ser alterada pelos diferentes usos” (SILVA, et al., 2003). Entre os vários atributos do solo que interferem no manejo de irrigação e crescimento vegetal, a densidade do solo pode ser

considerada a principal, sendo muito importante sua medição em projetos de irrigação e drenagem (ANDRADE et al., 2005).

Fisicamente, a densidade representa a razão entre a massa seca de uma amostra de solo e o volume ocupado pela mesma, na forma natural que é retirada do solo (DALMAGO, 2004). Além de ser um indicador da qualidade do solo, é utilizado para determinar a quantidade de água que existe no perfil do solo com base no volume (MENDES et al., 2006). É um importante atributo no estudo de fluxos hidráulicos, fornecendo informações indiretas sobre a estrutura, porosidade, armazenamento e condução de água (JUNQUEIRA JUNIOR, 2006).

Relaciona-se com a estrutura, uma vez que é função do arranjo e orientação das partículas do solo, assim como a quantidade e geometria dos espaços porosos (HICKMANN, 2009). Segundo Reichardt e Timm (2004), este atributo varia de acordo com o volume total de poros, representando, um índice do grau de compactação do solo. Para Souza et al. (1997), a maioria das culturas é afetada quando a densidade do solo ultrapassa $1,5 \text{ g cm}^{-3}$, devido à falta de oxigênio para a respiração e impedimento mecânico para o crescimento das raízes, limitando-se a zona de absorção de água e nutrientes. Segundo Klein et al (2004), a densidade do solo máxima para solos argilosos é de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$, enquanto que para solos arenosos é de $1,77 \text{ g cm}^{-3}$.

2.4.2 Resistência mecânica do solo à penetração

As plantas podem ser afetadas, diretamente pela resistência mecânica dos solos, devido ao impedimento mecânico que o solo oferece às raízes, sendo um dos fatores físicos mais citados que afetam o crescimento das raízes (SILVA et al., 2008).

De acordo com Letey (1985), a resistência do solo à penetração é uma propriedade física diretamente relacionada com o crescimento das plantas e serve como característica indicativa de compactação/adensamento. Além disso, está, intimamente, relacionada com a densidade do solo e com o crescimento das plantas (HOAD et al., 2001; SILVA, 2003). É considerado um parâmetro que auxilia na escolha do método mais adequado para quebrar a camada compactada, facilitando o desenvolvimento radicular das plantas (BARROS et al., 2010).

Os solos agrícolas podem ser compactados por animais em pastejo, bem como pelas raízes de árvores, porém mais significativos são os efeitos da mecanização, ocasionados pelo tráfego de máquinas usadas no manejo das culturas (CUNHA, 2002). De acordo com

Prado et al. (2002), a compactação do solo leva ao aumento de sua resistência, redução da porosidade, da continuidade de poros, da permeabilidade e da disponibilidade de nutrientes e água.

Segundo Silva et al. (2004), a resistência à penetração é muito influenciada pelas condições do manejo dado ao solo e à intensidade de tráfego das máquinas agrícolas. De acordo com Balastreire (1987), este parâmetro aumenta com a compactação e o principal fator que afeta a resistência do solo é o teor de água e a resistência será maior quanto menor o teor de água existente nele. O autor ressalta que para solos de textura grosseira (arenosos) o coeficiente de atrito interno aumenta com a compactação para qualquer teor de água no solo.

Em geral, valores de resistência do solo à penetração, considerados críticos ao crescimento radicular, variam de 1,5 a 4,0 MPa (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; IMHOFF et al., 2001). Já Unger e Kaspar (1994) relatam que na faixa de 0,7 a 1,4 MPa já acarreta redução no crescimento radicular em 50 e 80% respectivamente, sendo que valores acima de 2 MPa diminui em 100% o crescimento da raiz, considerado o ponto mais crítico.

2.4.3 Porosidade do solo

O solo possui poros de formas e dimensões variadas, que determinam um comportamento peculiar a cada solo (SANTOS, 2005). Esta porosidade do solo está relacionada com sua textura, estrutura e teor de matéria orgânica (JUNQUEIRA JÚNIOR, 2006).

Um solo bem agregado (ou estruturado) apresenta boa quantidade de poros de tamanhos relativamente grandes ($>0,05$ mm), qualidade que afeta a penetração das raízes, circulação de ar (aeração) e a infiltração de água (SANTOS, 2005). Por outro lado, solos de textura fina possuem maior volume total de poros (VTP) e seu alto volume de microporos ($<0,05$ mm) confere boa retenção de água e menor drenagem (JUNQUEIRA JÚNIOR, 2006).

Valores de macroporos, ou poros de aeração, inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, são considerados limites para o crescimento das raízes (SUSUKI et al., 2007). Segundo Amaro Filho et al. (2008), a maioria das plantas requer um espaço de aeração de, no mínimo, 10% do volume total de solo para expressarem o mínimo de seu potencial de produção. Segundo os mesmos autores, apenas o arroz consegue sobreviver em um ambiente com zero de aeração, uma vez que realiza suas trocas gasosas, via estômatos, diretamente com a atmosfera.

2.5 Variabilidade espacial de atributos físicos do solo

A maioria das propriedades do solo varia continuamente no espaço e no tempo (Juan et al., 2011), sendo mais homogêneas em algumas partes que em outras do solo (Siqueira, 2006), causada por fatores de formação do solo, bem como pelos diferentes tipos de uso e manejo do solo (GUIMARÃES, 2000).

Numa paisagem natural, a variabilidade dos seus atributos do solo é resultante da interação dos processos e fatores de sua formação. Por outro lado, um solo cultivado revela fontes adicionais de heterogeneidade, originadas do manejo do solo (CARVALHO et al., 2003).

Segundo Warrick e Nielsen (1980), os atributos físicos do solo desempenham importante papel, senão o principal dentre as propriedades do solo. Estes atributos variam entre pontos próximos em áreas de mesma unidade taxinômica, muitas vezes de forma significativa (LIMA et al., 2006).

Em áreas irrigadas, é importante conhecer a variabilidade de toda a área agrícola cultivada, identificando-se aquelas manchas de solo que podem ser trabalhadas e terem sua qualidade melhorada, homogeneizando mais o seu comportamento (ANDRADE et al., 2010).

Estudar a variabilidade espacial do solo torna-se importante, particularmente em áreas sob diferentes manejos (Souza et al., 2001) sendo uma ferramenta essencial para o manejo do solo quanto a fertirrigação, irrigação, calagem entre outros (ANDRADE et al., 2005; LIMA et al., 2006).

O conhecimento da variabilidade de um solo, além de caracterizar uma região, pode indicar o número e a distribuição de amostras a serem retiradas, possibilitando ainda melhor detalhamento da área e dos resultados (ORTIZ, 2002).

Segundo Siqueira (2006), a análise da variabilidade espacial do solo pode indicar alternativas de manejo que levem a diminuição dos efeitos da variabilidade espacial dos atributos físicos na produção das culturas. Segundo o autor, o conhecimento da variabilidade espacial dos seus atributos contribui para a redução de custos no sistema de produção.

A maioria dos produtores agrícolas desconsidera essa variabilidade do solo, podendo, assim, ter consideráveis variações em seus atributos (JOHANN et al., 2004). Sendo assim, o manejo do solo em áreas aparentemente homogêneas pode causar equívocos, se não forem analisadas corretamente e considerada a sua variabilidade espacial (SÁNCHEZ, 2010).

Segundo Andrade et al. (2005):

Essa variabilidade do solo e conseqüentemente das propriedades físico-hídricas do solo já despertava preocupação desde o início do século passado, por proporcionar diferenças no desenvolvimento, na produtividade e no manejo da irrigação, alterando resultados de pesquisas, mesmo com o solo considerado homogêneo em parcelas experimentais.

A estatística clássica tem sido usada com bastante frequência em estudos agrícolas para planejamento e avaliação dos resultados (SIQUEIRA et al., 2008). No entanto, caracteriza-se por ignorar as conseqüências da heterogeneidade espacial (Souza et al., 2006), baseando-se na independência entre as amostras, observações de normalidade exata e aproximada e o grande número de amostras e repetições (XIE et al., 2011). Em outras palavras, parte do pressuposto de que todas as amostras são aleatórias e sua aplicação não envolve qualquer conhecimento da posição atual das mesmas ou do relacionamento entre essas posições (JUNQUEIRA JUNIOR, 2008).

Por outro lado, os métodos geoestatísticos estão sendo utilizados com mais frequência, tanto para as análises da dependência espacial como para a interpolação, uma vez que fornece informações precisas (VIEIRA, 2000).

O emprego desta ferramenta, segundo Junqueira Júnior (2006), introduz uma nova e importante dimensão para a análise da interação entre os atributos físicos do solo, importantes, de acordo com Kramer et al. (2004), no desenvolvimento das culturas agrícolas, sendo desejável sua caracterização, modelagem e mapeamento. A geoestatística permite determinar se um atributo apresenta ou não estrutura espacial, onde conhecido o modelo de dependência espacial é possível mapear toda a área estudada.

Siqueira (2006) explica, em outras palavras, que esta ferramenta:

Permite estabelecer um modelo de semivariogramas que melhor descreva a variabilidade espacial dos dados, o qual será utilizado no processo de interpolação pelo método da krigagem, possibilitando a geração de uma superfície contínua para a área de estudo, expressa através de mapas de isolinhas.

O semivariograma é um medidor do grau de semelhança entre os pontos amostrais, mostrando se há ou não autocorrelação espacial. Com ele pode-se utilizar a autocorrelação para interpolar valores para os locais não medidos e, assim, construir mapas de isolinhas, ou tridimensionais, com boa precisão no estudo da variabilidade de um parâmetro (RUIZ, 2003).

É através do conhecimento do semivariograma que se pode definir a intensidade de amostragem ideal. No entanto, quando não conhecido, recomenda-se uma amostragem

sistemática em malha regular, com igual intervalo entre as amostras e determinado pelo número de observações que o interessado tenha condições de executar (RUIZ, 2003).

Os valores de semivariogramas são obtidos pela equação 1:

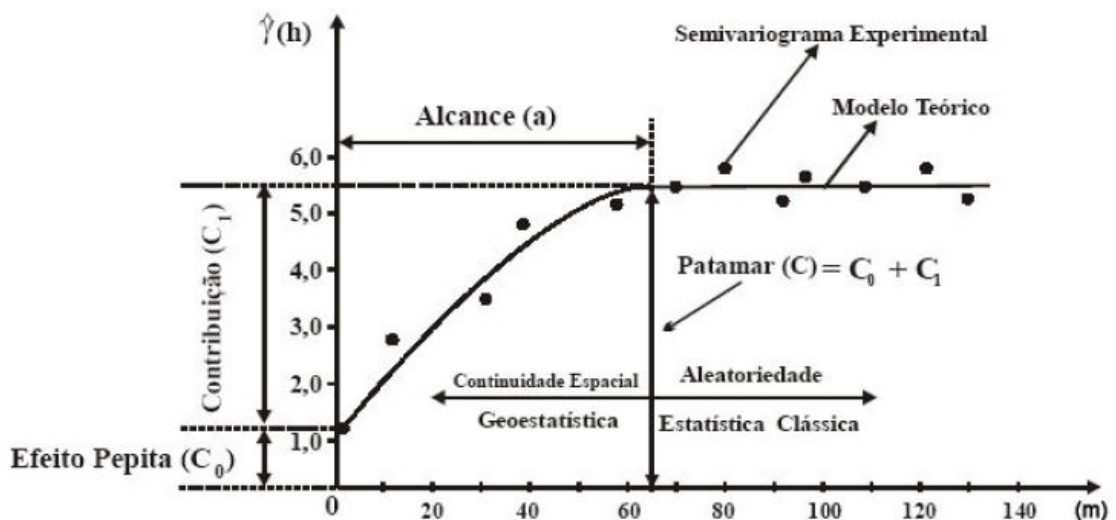
$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

em que: $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$, separados por um vetor h .

O gráfico de $\gamma^*(h)$ versus os valores correspondentes de h , chamado semivariograma, é uma função do vetor h e, portanto, depende de ambos, da magnitude e da direção h .

O semivariograma também pode ser representado como um gráfico da função de dependência espacial em relação à distância (Figura 1).

Figura 1 - Semivariograma experimental, modelo teórico e seus componentes.



Fonte: Camargo (1997)

O efeito pepita (C_0) revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras, sendo causado por variabilidade em pequena escala, por erros de amostragem, de determinação ou do limite do equipamento. O patamar ($C_0 + C_1$) é aproximadamente igual à variância dos dados. Através dele mede-se a variabilidade do fenômeno. O alcance refere-se à distância no qual $\gamma(h)$ atinge o patamar e representa a distância limite de dependência espacial, ou seja, dentro dos limites do alcance,

as medições são correlacionadas umas às outras, o que permite fazer interpolações para espaçamentos menores do que os amostrados. Por isso, o alcance é utilizado para avaliar o grau de continuidade espacial dos dados.

A análise do grau de dependência espacial (GD) é feita através da razão entre a variância estrutural (C) e o patamar ($[C/(C_0+C)]$), conforme critérios estabelecidos por Zimback (2001), que classifica o $GD \leq 0,25$, de fraco; $0,25 < GD < 0,75$, de moderado e $GD > 0,75$, de forte.

Conhecido o semivariograma da variável, e havendo dependência espacial entre as amostras, é possível fazer interpolações nos intervalos entre as amostragens e criar mapas de isolinhas ou de superfície através da krigagem. Esta técnica é utilizada para determinar os valores locais não amostrados, buscando uma estimativa linear, sem tendência e com variância mínima, considerando os valores da análise espacial determinada por meio do semivariograma experimental.

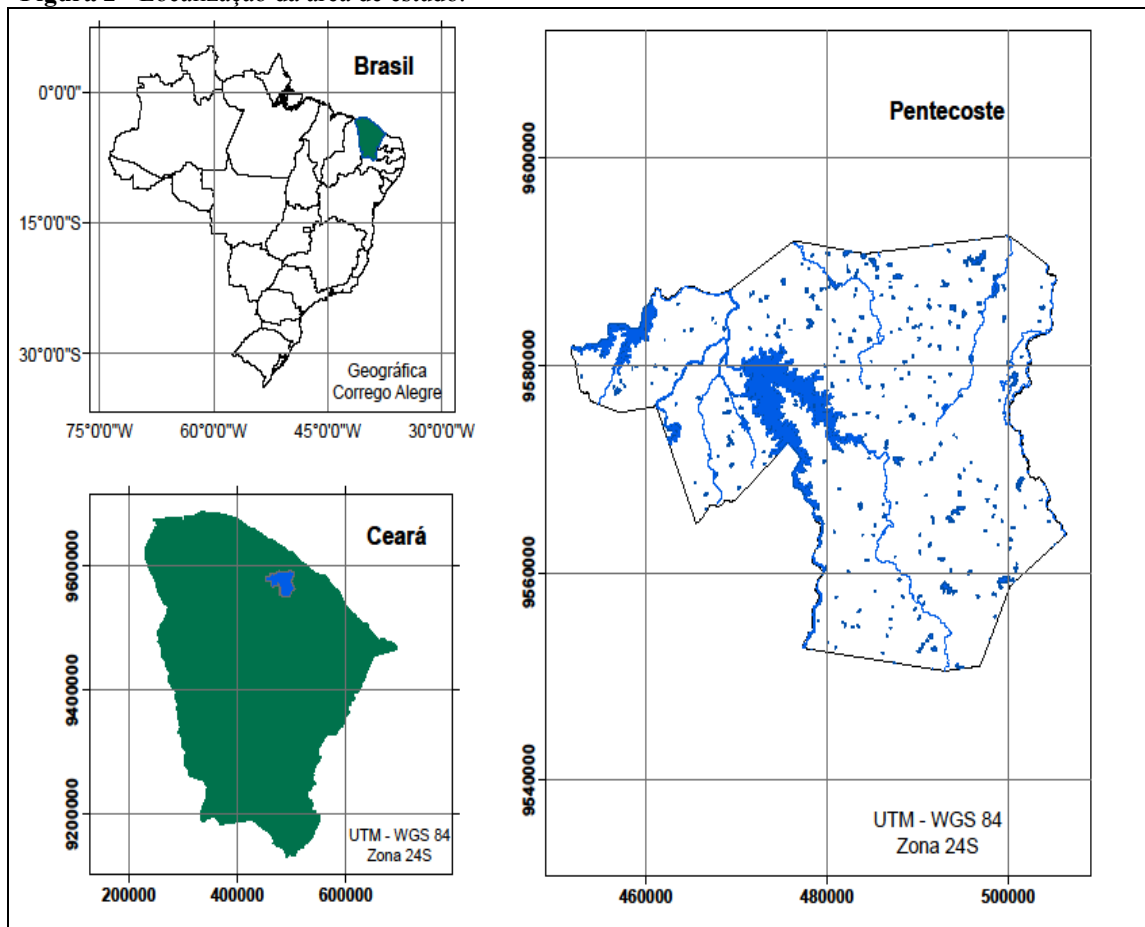
Neste sentido, a geoestatística surge como uma ferramenta fundamental para a detecção da variabilidade espacial das mais diferentes variáveis, buscando a otimização dos processos de produção agrícola (SIQUEIRA, 2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido na Fazenda Experimental do Vale do Curu (FEVC) da Universidade Federal do Ceará - UFC, no Município de Pentecoste-CE, distante 98 km de Fortaleza (Figura 2).

Figura 2 - Localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2011.

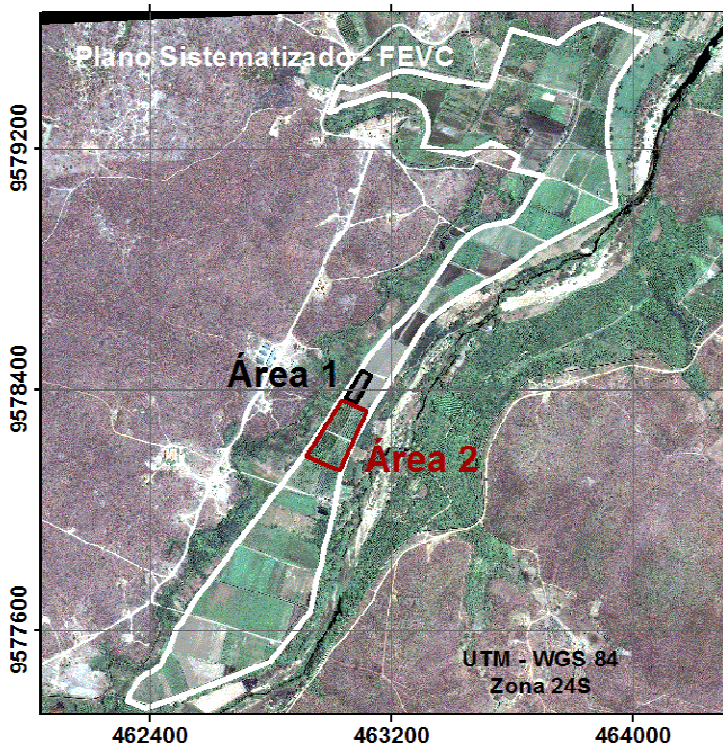
O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é BSw'h', clima quente e semiárido com chuvas irregulares distribuídas entre os meses de fevereiro a maio. A precipitação média anual é de 801 mm e a temperatura média anual em torno de 27,1 °C, seguida de uma umidade relativa média do ar de 73,7%.

O solo das áreas é caracterizado por textura franca, classificado como NEOSSOLO FLÚVICO, que segundo Andrade et al. (2010) tem sua origem associada à deposição de sedimentos aluviais.

3.2 Caracterização da área selecionada

Foram selecionadas duas áreas, uma conduzida por sistema convencional com uma gradagem (Área 1), onde está sendo implantada um consórcio de milho e feijão e, onde esse manejo é feito há mais de 10 anos e outra com o uso de roçadora nas entrelinhas (Área 2) numa área composta por um pomar de mangueiras e goiabeiras, implantado há 13 anos. As mesmas foram selecionadas por estarem próximas e por possuir manejos e usos diferentes numa mesma unidade de classe taxonômica do solo. Abaixo segue o esquema da área de estudo envolvendo as duas áreas (Figura 3).

Figura 3 - Sistematização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2011)

3.2.1 Gradagem do solo

A área destinada à prática de gradagem do solo, correspondente à área CT₅, representa, aproximadamente, 0,5 ha e, está sendo preparada para o cultivo do milho e feijão em consórcio (Figura 4) O solo foi amostrado após a preparação para o cultivo das culturas.

Figura 4 - Preparo convencional do solo através da gradagem.



Fonte: Autor 2011

3.2.2 *Roçadora nas Entrelinhas*

A área com a prática de roçadora nas entrelinhas ocupa aproximadamente 2,3 ha e é usada para fruticultura, com as culturas de manga e goiaba (Figura 5), representando as áreas: CT₄, DT₄, AT₅ e BT₅ do plano sistematizado da Fazenda Experimental do Vale do Curu. Nesta área, o manejo do solo é feito com uma roçadora acoplada ao trator, não havendo, portanto, revolvimento do solo.

Figura 5 - Goiabeira (a) e Mangueira (b) submetida à prática de roçadora nas entrelinhas.



Fonte: Autor (2011)

3.3 Amostragem do solo

A realização das coletas de solo ocorreu no mês de outubro de 2011, após o período chuvoso da região. Foram retiradas amostras de solo deformadas e indeformadas, numa malha regular de 15 x 15 m, na camada de 0-15 cm em 21 pontos na área 1 (gradagem) e 78 pontos na área 2 (roçadora nas entrelinhas). Esta malha é bastante utilizada em áreas com dimensões semelhantes à estudada. Cada ponto coletado teve suas coordenadas UTM registradas.

Após coletadas, as amostras foram acondicionadas em bandejas e transportadas para o Laboratório de Análises de Física do Solo da UFC, onde foram submetidas a estudos físicos através dos seguintes parâmetros: densidade do solo, micro e macroporosidade, resistência do solo à penetração, umidade gravimétrica do solo e análise granulométrica. Para a determinação de todos os parâmetros foi utilizada a metodologia proposta pela EMBRAPA (1997).

3.3.1 Densidade do solo

A densidade do solo foi determinada através do método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997), mediante equação 2. Foram coletadas amostras indeformadas através de um coletor do tipo uhland na camada de 0-15 cm.

$$D_s = \frac{m_s}{V} \quad (2)$$

em que,

D_s - densidade do solo (g cm^{-3})

m_s - massa do solo seco em estufa (g)

V - volume do solo (cm^3)

3.3.2 *Micro e Macroporosidade*

A macroporosidade foi determinada com os anéis volumétricos submetidos à tensão de 6kPa (60 cm ca) conforme CAMARGO et al. (1986) através da mesa de tensão (Figura 6).

Figura 6 - Mesa de tensão de 60 cm de coluna d'água.



Fonte: Autor 2011.

Antes de serem submetidas à tensão, as amostras de solos foram saturadas em bandeja com água até a altura de dois terços das mesmas. Após saturadas, as amostras foram pesadas, caracterizando assim, o peso da amostra saturada (m_1). Em seguida, as mesmas foram submetidas à tensão e, logo após pesadas, resultando no peso da amostra após a tensão

(m2). Após esta fase, as amostras foram levadas a estufa por um período de 24 horas para obtenção da umidade retida nos microporos.

Para o cálculo da macro e da microporosidade foi utilizada as equações 3 e 4:

$$Mi (\%) = \frac{Vr}{V_{amostra}} \times 100, \text{ em que } Vr = \frac{m2-m3}{\rho a} \quad (3)$$

$$Ma (\%) = \frac{Vd}{V_{amostra}} \times 100, \text{ onde } Vd = \frac{m1-m2}{\rho a} \quad (4)$$

em que,

Mi - Microporosidade (%);

Ma - Macroporosidade (%);

Vd - Volume drenado dos macroporos (cm³)

Vr - volume retido nos microporos (cm³);

V_{amostra} - volume total da amostra (50 cm³);

m1 - massa da amostra saturada (g);

m2 - massa da amostra após drenagem na mesa (g);

m3 - massa da amostra após seca em estufa (g) e

ρa - massa específica da água (1 g cm⁻³)

3.3.3 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência mecânica do solo à penetração foi determinada através do penetrômetro motorizado PNT-2000 (Figura 7).

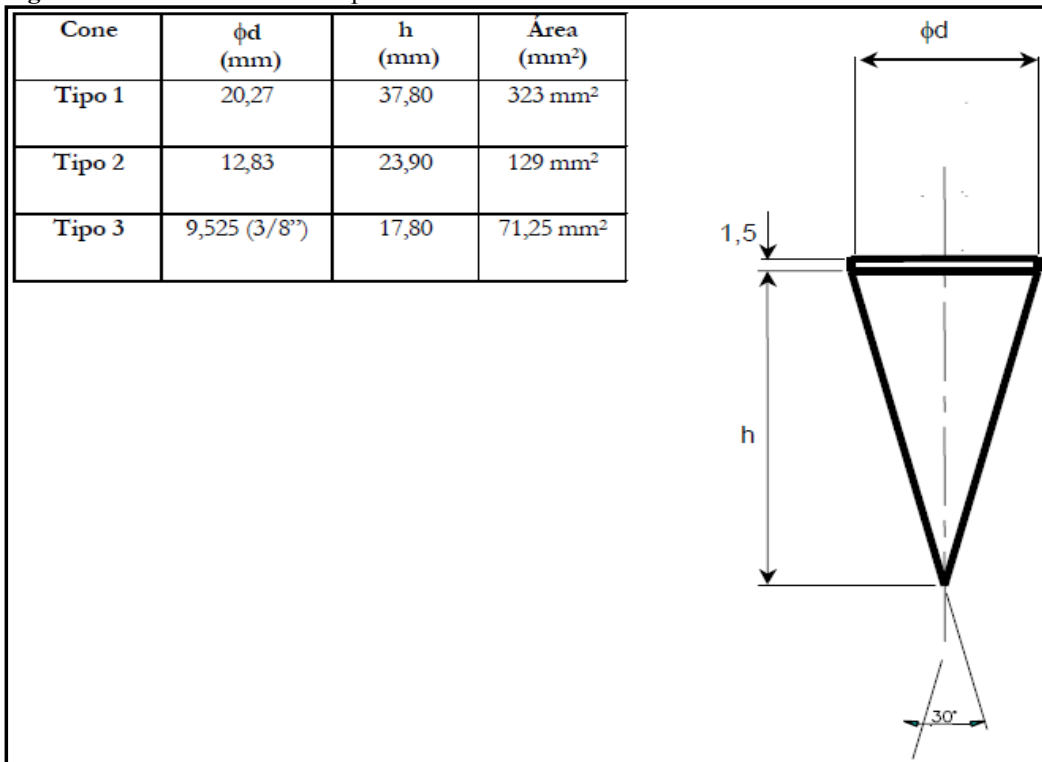
Figura 7 - Penetrômetro motorizado PNT-2000.



Fonte: Autor (2011)

O penetrômetro constitui-se de uma haste com cone tipo 2, sólido na ponta, conforme observado na Figura 8, a qual obedeceu as características estruturais e operacionais definidas pela norma ASAE S313.3 (1997). Os pontos amostrais foram georreferenciados com um navegador GPS acoplado ao mesmo.

Figura 8 – Cones normalizados pela ASAE S313.3.



Fonte: DLG Automação

Desta forma, a resistência à penetração (RP) foi calculada da seguinte forma, descrita na equação 5:

$$RP = \frac{F}{A} \quad (5)$$

em que,

RP - Resistência à penetração (Índice de cone), em Pa;

F - Força exercida no cone, em N;

A - Área da seção transversal do cone, em m².

3.3.4 Umidade

A umidade do solo foi determinada pelo método gravimétrico (equação 6), que consiste na pesagem anterior e posterior à secagem em estufa a 105 °C por 24h (EMBRAPA, 1997).

$$U = \left(\left[\frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \right] \times 100 \right) \quad (6)$$

em que,

U - umidade gravimétrica (% ou kg. Kg⁻¹);

M_{su} - Massa de solo úmida (kg);

M_{ss} - Massa de solo seca em estufa a 105-110 °C (kg).

3.3.5 *Análise granulométrica*

As frações granulométricas do solo (areia, argila e silte) foram determinadas no laboratório, de acordo com metodologia da EMBRAPA (1997). A presente metodologia utiliza 20 g de terra fina seca ao ar (TFSA) (Figura 9), 100 mL de água destilada e 10 mL de NaOH 1 mol L⁻¹ (dispersante), com agitação rápida (12.000 rpm) por 10 minutos.

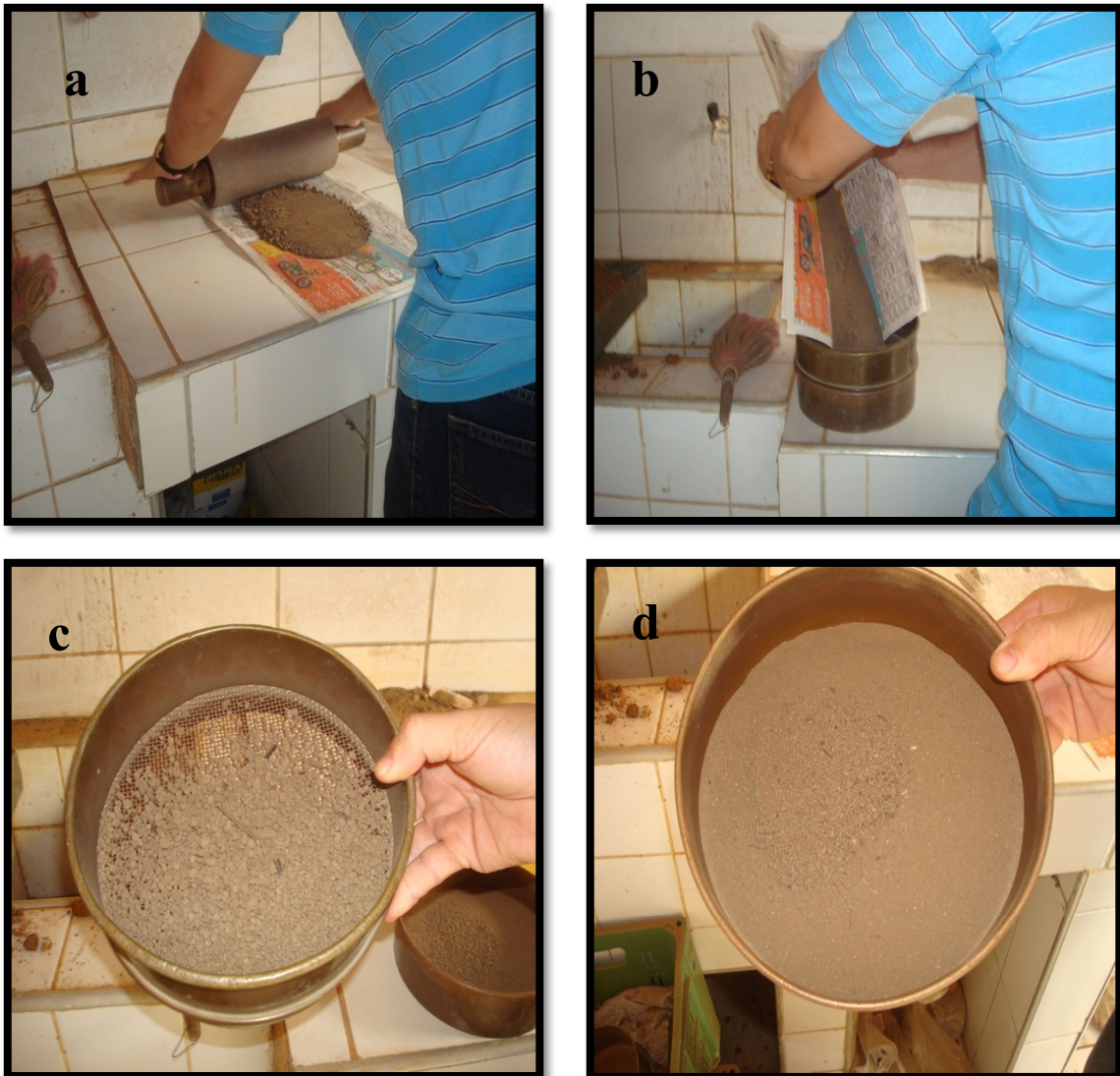
As frações de areia total (AT) foram separadas, com uso de peneiras de malha 0,053 mm e determinadas através da equação 7. As frações argila total (AT) e silte (<0,053 mm), foram separadas por sedimentação, segundo a Lei de Stokes, determinadas pelas equações 8 e 9 respectivamente. Para a determinação de cada fração foi utilizado um fator “f”, determinado através da relação entre o peso úmido e o peso seco (EMBRAPA, 1997).

$$\text{Areia Total (\%)} = M_{AT} \times 5 \times \text{Fator “f”}; \quad (7)$$

$$\text{Argila Total (\%)} = [(M_A + \text{dispersante}) - (\text{dispersante})] \times 200 \times \text{Fator “f”}; \quad (8)$$

$$\text{Silte (\%)} = 1000 - (\text{AT} + \text{A}) \quad (9)$$

Figura 9 – Etapas para obtenção de terra fina seca ao ar: (a) amostra sendo destorroada; (b) sendo introduzida na peneira de 2mm; (c) restos grosseiros e (d) terra fina seca ao ar.



Fonte: Elaborada pelo autor 2011.

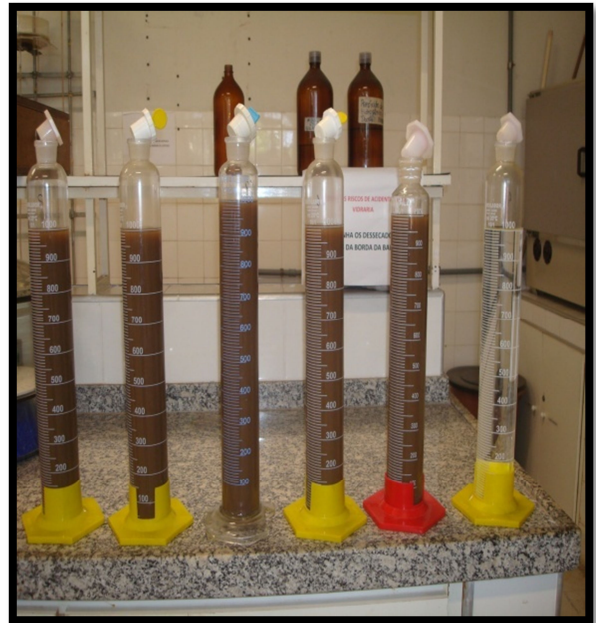
As Figuras 10 e 11 ilustram os equipamentos utilizados para a determinação granulométrica dos solos.

Figura 10 - Agitador elétrico "stirrer"



Fonte: Autor 2011.

Figura 11 - Amostras em cilindros de sedimentação com a respectiva prova em branco.



Fonte: Autor 2011.

3.4 Análise dos dados

3.4.1 Estatística descritiva

O procedimento inicial de análise dos dados deu-se pela estatística descritiva, através dos momentos: média, desvio padrão, coeficiente de variância, valores máximos e mínimos, curtose e assimetria, submetidos a um teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de significância.

Após esta fase, foi feita a análise exploratória das variáveis com a visualização dos dados através de gráficos para verificação de tendência e “boxplot” para identificação de possíveis valores atípicos (*outliers*). Segundo Hernandez et al. (2003), é comum aparecerem entre os dados coletados observações atípicas, alterando as médias e variabilidade dos grupos a que pertencem, podendo distorcer as conclusões. Nesse caso, estas observações atípicas foram excluídas da população, de forma a evitar possíveis falhas nos resultados.

3.4.2 Análise geoestatística

Para caracterizar a variabilidade e a dependência espacial dos atributos do solo foi utilizada a geoestatística através de semivariogramas, mediante uso do programa GS+ Gamma Design Software (ROBERTSON, 1998). Após a etapa de construção dos semivariogramas, foram escolhidos os modelos que melhor se ajustassem aos dados que apresentaram dependência espacial. Os modelos de dependência espacial utilizados foram: modelo esférico (Eq. 10), modelo exponencial (Eq. 11) e modelo linear (Eq. 12).

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ para } 0 \leq h \leq a; \quad (10)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \text{ para } h > a;$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(\frac{-3h}{a}\right) \right] \text{ para } h \geq 0; \quad (11)$$

$$\gamma(h) = C_0 + \frac{C_1}{a} \text{ para } 0 \leq h \leq a \text{ e } \gamma(h) = C_0 + C_1 \text{ para } h > a \quad (12)$$

A escolha do modelo de semivariograma que melhor descrevesse a variabilidade dos dados baseou-se na minimização da soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e no coeficiente de determinação múltipla (R^2) do ajuste dos modelos teóricos aos semivariogramas experimentais.

Após selecionados os modelos, as características destes semivariogramas foram utilizadas para determinar e classificar a dependência espacial de cada atributo. Para a análise do índice de dependência espacial (IDE) destes atributos, foi utilizada a relação entre a variância estrutural e o patamar ($[C/(C_0+C)]$), conforme critérios estabelecidos por Zimback (2001), que considera a dependência espacial fraca ($IDE \leq 25\%$); de moderado ($25\% < IDE < 75\%$) e forte ($IDE > 75\%$).

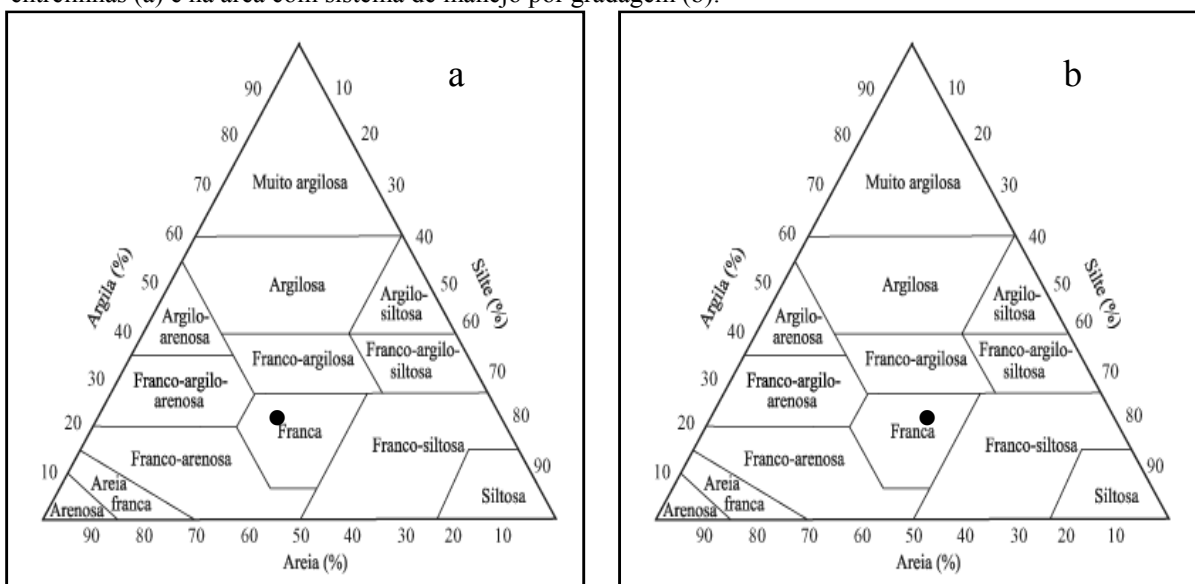
Após verificada a dependência espacial e escolhido o melhor modelo de semivariograma, foram confeccionados mapas de isolinhas no software SURFER 8.0 (GOLDEN SOFTWARE, 2008), através da interpolação dos dados, pelo método da krigagem. De acordo com Grego e Vieira (2005), a construção de mapas, através da krigagem, é importante para a verificação e a interpretação da variabilidade espacial, pois as

informações visuais fornecidas pelos mapas servem de auxílio na tomada de decisões, em função das propriedades analisadas. Através desta ferramenta, pode-se visualizar o comportamento de cada atributo no espaço.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a análise das frações granulométrica (areia, argila e silte) e baseado no modelo de identificação de classes texturais de amostras de solo (triângulo textural), apresentado por Lemos e Santos (1984), o solo das áreas selecionadas se caracteriza por textura franca (Figura 12).

Figura 12 - Triângulo de classificação textural de solos para a área com sistema de manejo com roçadora nas entrelinhas (a) e na área com sistema de manejo por gradagem (b).



Fonte: Lemos e Santos (1984)

4.1 Análise exploratória dos atributos físicos

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados referentes à estatística clássica para cada atributo físico estudado. Todos os atributos físicos na área 1 (gradagem) apresentaram uma tendência à normalidade, através do teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de significância. Na área 2 (roçadora nas entrelinhas) apenas os atributos microporosidade, areia e silte apresentaram normalidade. Essa condição de normalidade pode ser comprovada pela aproximação da média e mediana, além dos coeficientes de assimetria e curtose.

A resistência mecânica do solo à penetração na área 2 apresentou o maior coeficiente de variância (56,04), conferindo-o uma moderada variação, de acordo com critérios propostos por Warrick e Nielsen (1980). Na área 1 o mesmo atributo apresentou o maior coeficiente de variação em relação aos demais atributos da presente área (29,90%),

porém menor em relação ao mesmo atributo na área 2. Os valores altos de CV para este atributo pode estar associado à grande pontualidade que o mesmo representa (GUEDES FILHO, 2009).

A macroporosidade e a umidade do solo na área 2 também apresentaram um CV moderado ($12\% < CV < 60\%$), concordando apenas para a macroporosidade com dados obtidos por Souza et al. (2001). Na área 1 os atributos macroporosidade, areia e silte também apresentaram CV moderado.

A microporosidade e a densidade do solo apresentaram CV baixo para as duas áreas. Valores semelhantes de média e CV de microporosidade foram encontrados por Siqueira et al. (2009). Verificou-se no trabalho de Nagumo (2009) CV baixo para densidade do solo.

A macroporosidade apresentou uma média baixa nas duas áreas, ficando abaixo de valores estabelecidos por Susuki et al. (2007) e Amaro Filho et al. (2008) como limitantes para o desenvolvimento radicular das culturas. A densidade do solo apresentou uma média abaixo de $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ para as duas áreas selecionadas, considerado valor limitante para a maioria das culturas (Souza et al., 1997). A resistência à penetração (RP) apresentou uma média relativamente alta na área 2, concordando com valores encontrados por Grego e Vieira (2005) e Abreu et al. (2003). Valores próximos de RP para a mesma profundidade foram encontrados por Souza et al. (2006) para o mesmo teor de água no solo. Na área 1 o mesmo atributo apresentou média baixa, o que pode ser explicada pelo maior conteúdo de água no solo e pela grade que descompactou a camada mais superficial.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos atributos físicos em um NEOSSOLO FLÚVICO em Pentecoste, Ceará, 2011.

Variável	Média	Med	Máx	Mín.	DP	CV (%)	Assimetria	Curtose	p< 0,05
Roçadora nas entrelinhas									
Micro (%)	40,83	40,68	51,64	31,50	4,04	9,91	-0,016	-0,246	0,8519*
Macro (%)	5,39	5,08	11,43	2,68	1,89	35,08	1,015	0,736	0,0004
D _s (g cm ⁻³)	1,42	1,44	1,72	1,01	0,15	10,69	-0,743	0,325	0,0072
RP (MPa)	2,42	1,90	5,60	0,77	1,35	56,04	0,845	-0,521	2E10-6
Areia	42,7	42,8	53,8	31	4,65	10,90	-0,119	-0,285	0,4308*
Argila	22,0	21,8	26,5	16,9	2,04	9,27	0,094	-0,207	0,0345
Silte	34,9	35	45,4	27,4	3,84	10,99	0,220	-0,228	0,6351*
Umidade do solo (%)	17,8	16,8	36,2	6,3	6,43	36,08	0,596	-0,021	0,0309
Gradagem									
Micro (%)	45,4	44,5	53,5	39,2	4,10	9,03	0,753	-0,209	0,0935*
Macro (%)	6,4	6,2	9,4	3,3	1,85	28,8	-0,025	-1,375	0,2415*
D _s (g cm ⁻³)	1,44	1,44	1,60	1,31	0,07	5,02	-0,062	0,743	0,1297*
RP (MPa)	0,68	0,68	1,13	0,40	0,20	29,90	0,762	0,348	0,3104*
Areia	35	36	46	23	7,06	20,34	-0,252	-1,136	0,1933*
Argila	25	25	29	20	2,23	8,99	-0,369	0,308	0,7722*
Silte	40	39	51	31	5,55	13,70	0,389	-0,803	0,3657*
Umidade do solo (%)	21,8	21,3	25,9	19,2	1,75	8,04	0,807	0,183	0,2120*

* possui distribuição normal, pelo teste de Shapiro-Wilk, a 5% de significância. Med. = mediana, Máx. = número máximo, Mín. = número mínimo, DP = desvio padrão, CV (%) = coeficiente de variância.

A análise exploratória dos dados está ilustrada na Figuras 13. Nessa fase é possível verificar a distribuição e a consistência das medidas estatísticas dos atributos físicos, condição fundamental para aplicação da geoestatística.

Através dos gráficos “boxplot” foi possível identificar candidatos a *outliers*, o que, poderia prejudicar a análise dos dados, caso não fossem removidos. Verificou-se a presença de *outliers* para alguns atributos físicos, onde, quando detectados, estes valores foram comparados com seus vizinhos mais próximos, seguindo as recomendações de Libardi e Melo Filho (2006), sendo excluídos quando apresentaram diferenças acentuadas.

A macroporosidade na área 2 apresentou o maior número de *outliers*, oito no total. Verificou-se que mesmo após a remoção dos *outliers*, este atributo apresentou uma distorção em seu gráfico “boxplot” bem como uma tendência à não normalidade dos dados. A resistência mecânica do solo à penetração na área 2 não apresentou *outliers*, porém apresentou uma grande distorção em seu gráfico “boxplot” e distribuição não normal.

Figura 13 – Histograma e gráfico Box-plot para a areia (a), argila (b) e silte (c) na área com sistema de preparo com roçadora nas entrelinhas.

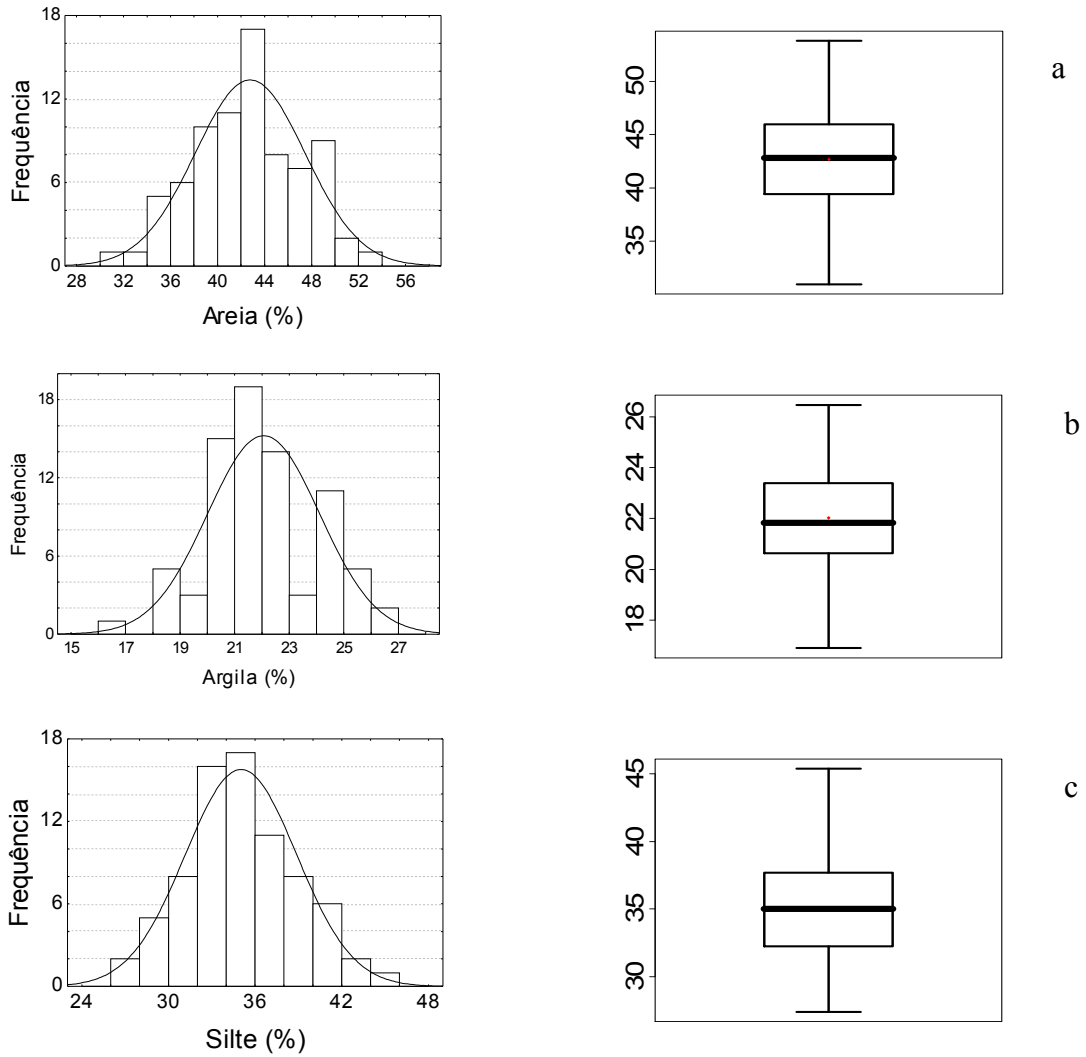
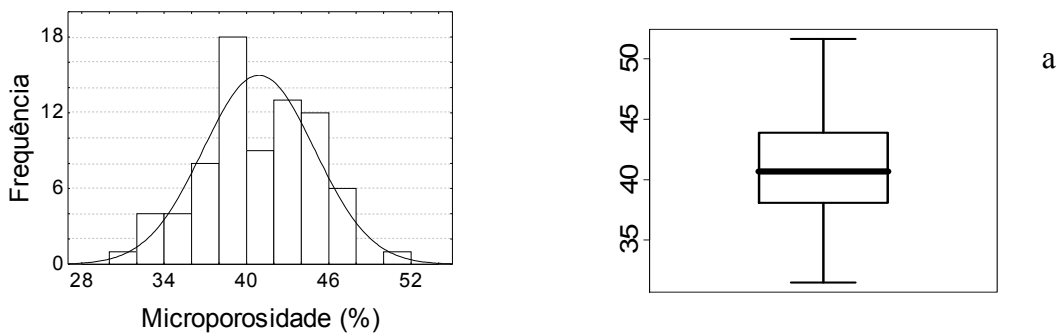


Figura 14 – Histograma e gráfico do tipo Box-plot para os atributos micro (a), macro (b), densidade do solo (c), resistência à penetração (d) e umidade do solo (e) na área com sistema de preparo com roçadora nas entrelinhas.



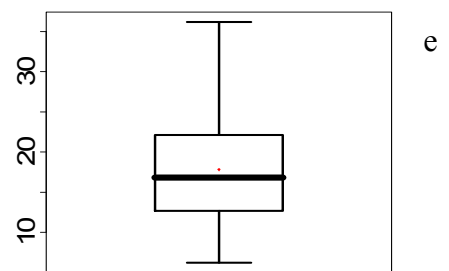
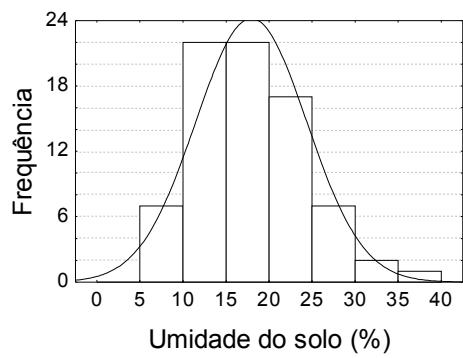
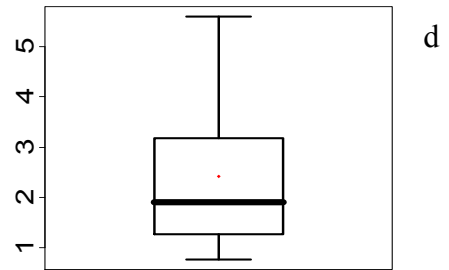
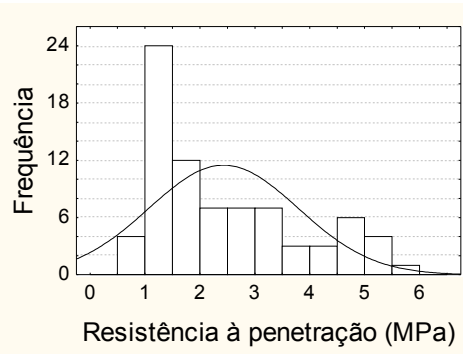
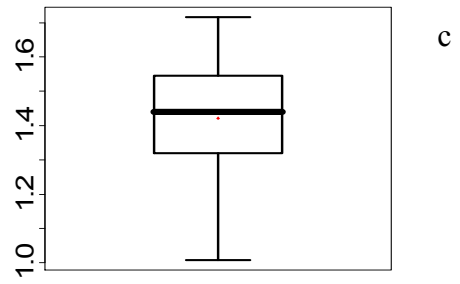
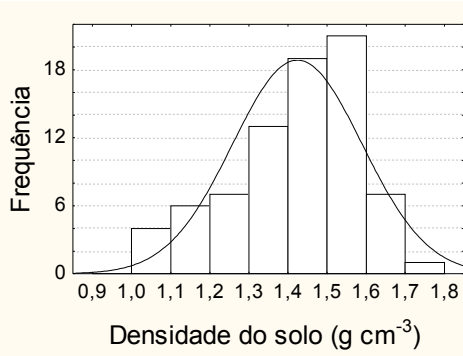
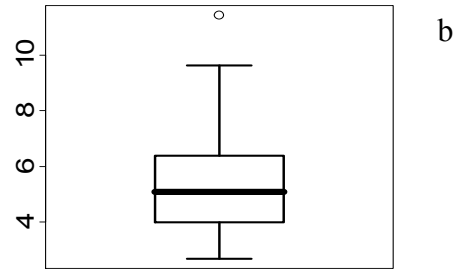
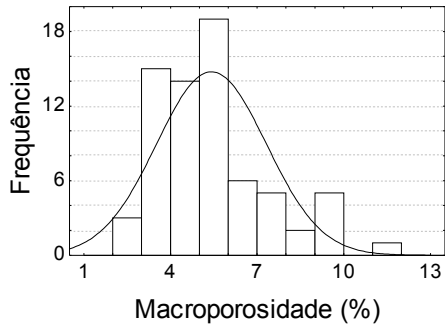


Figura 15 – Histograma e gráfico Box-plot das texturas areia (a), argila (b) e silte (c) na área com sistema de preparo por gradagem.

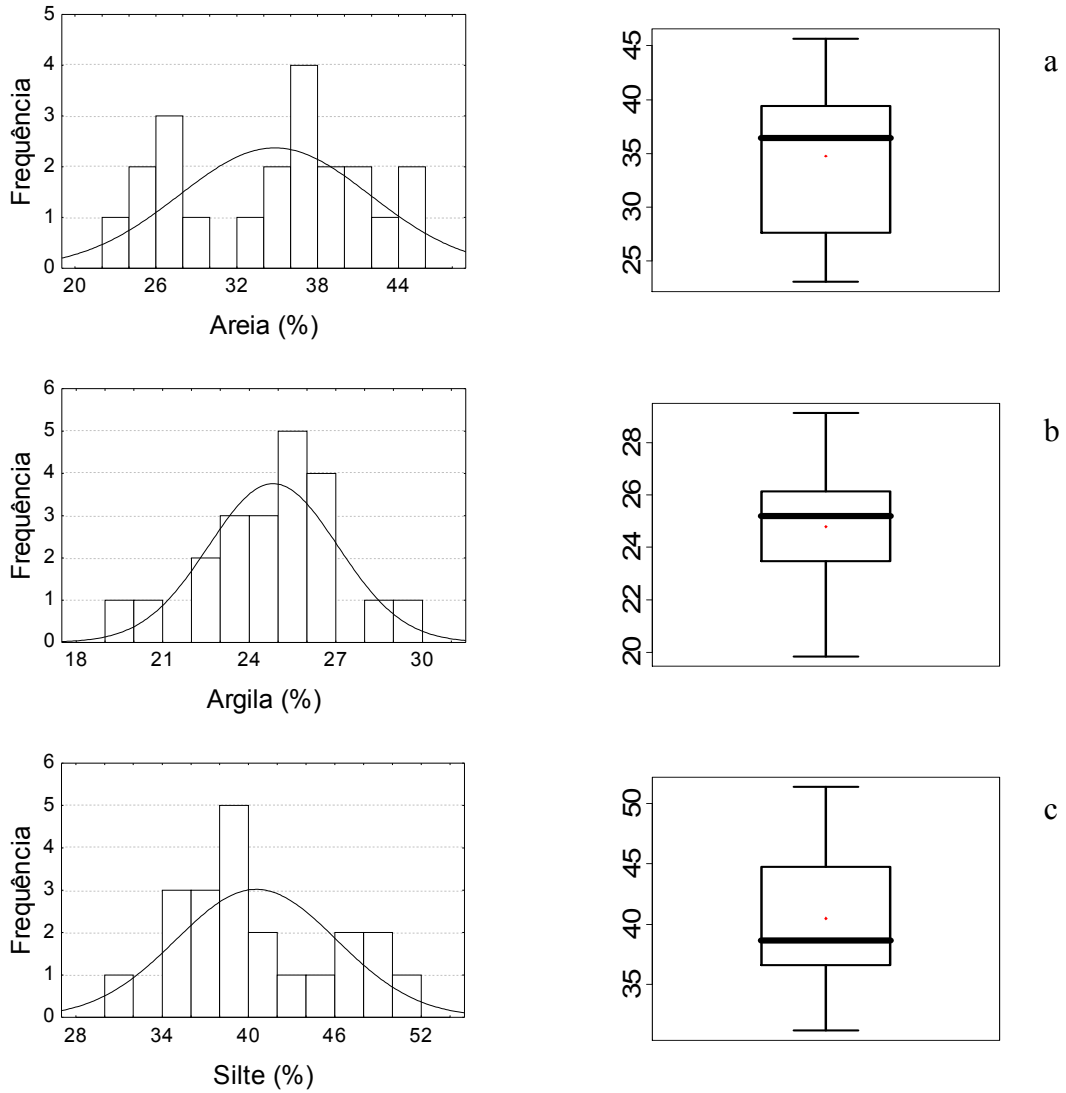
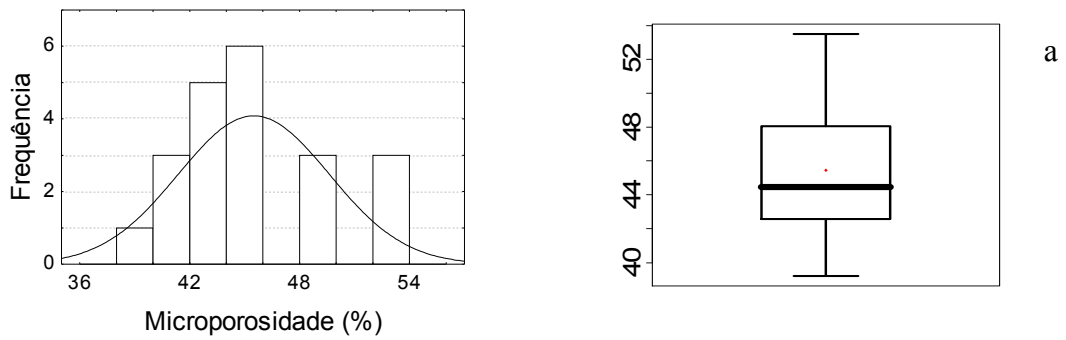
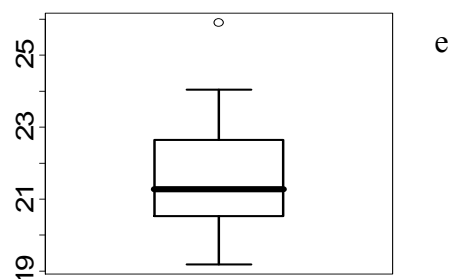
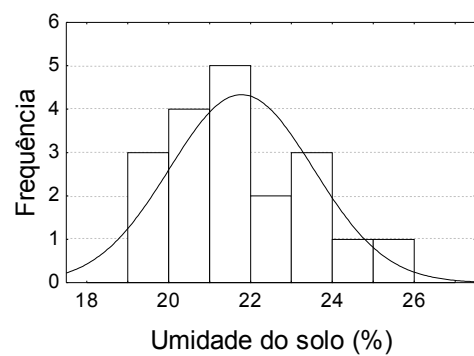
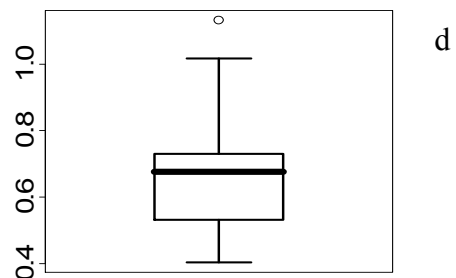
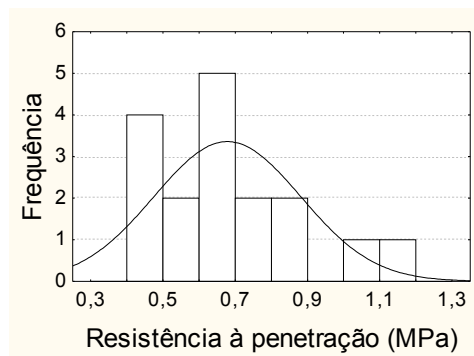
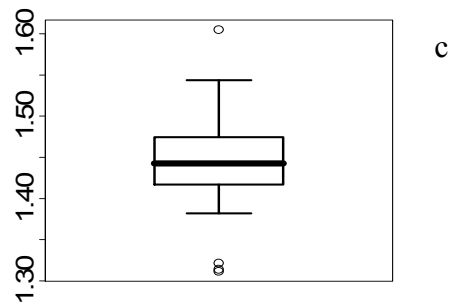
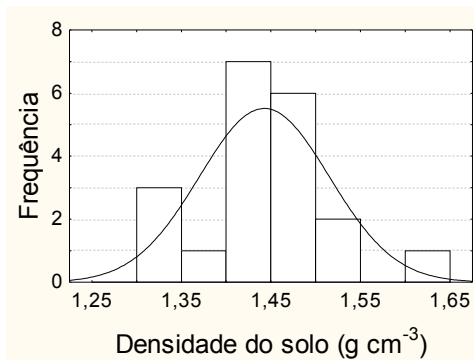
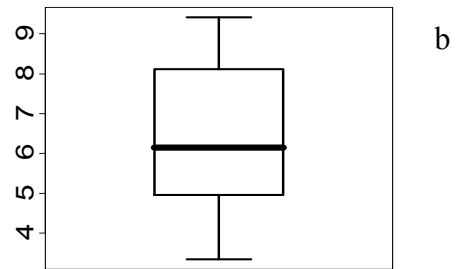
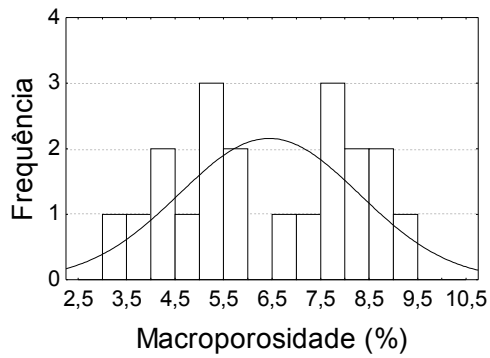


Figura 16 – Histograma e gráfico Box-plot dos atributos micro (a), macro (b), densidade do solo (c), resistência à penetração (d) e umidade do solo (e) na área com sistema de preparo por gradagem.





4.2 Análise geoestatística dos atributos físicos

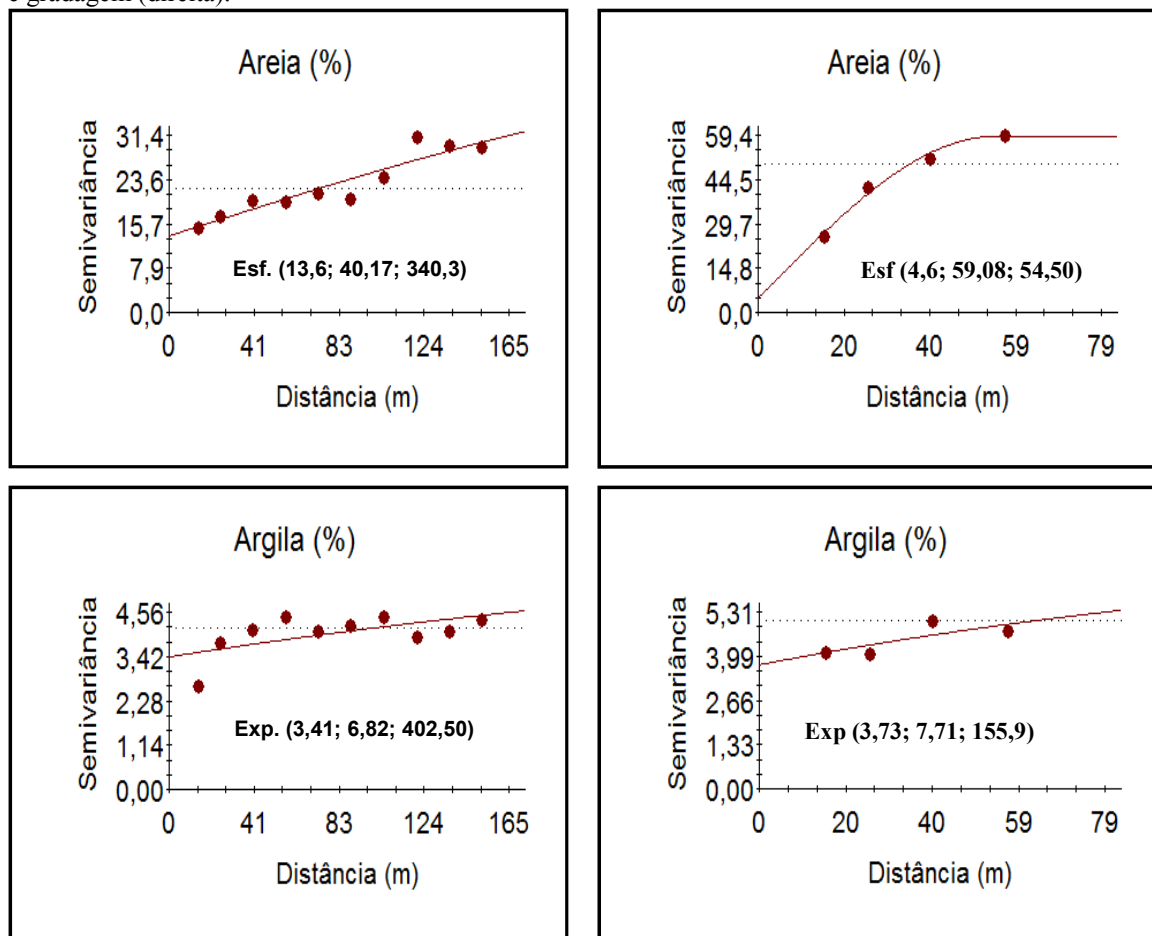
O uso de semivariogramas para análise geoestatística permitiu verificar a presença ou ausência de dependência espacial nos atributos físicos do solo. Na Figura 17 são apresentados os semivariogramas experimentais e respectivos modelos ajustados para as

frações granulométricas areia, argila e silte e os demais atributos físicos do solo na área estudada.

Todos os atributos apresentaram dependência espacial, exceto a densidade do solo na área 1. Essa ausência de estrutura de dependência espacial na densidade do solo nesta área pode ser explicada pelo reduzido número de pontos coletados. A densidade do solo também apresentou efeito pepita conforme Siqueira et al. (2009) e Guimarães (2000), onde os mesmos concluíram que a baixa malha de amostragem foi uma possível causa da aleatoriedade deste atributo no solo.

O modelo de semivariograma que melhor se ajustou à maioria dos atributos estudados foi o esférico. O modelo matemático esférico é o que predomina nos trabalhos em ciência do solo, sendo encontrado também o exponencial (SIQUEIRA et al., 2009; SOUZA et al., 1997; JUNQUEIRA JÚNIOR, 2008; GREGO e VIEIRA, 2005).

Figura 17 - Semivariograma da areia, argila e silte do sistema de manejo de roçadora nas entrelinhas (esquerda) e gradagem (direita).



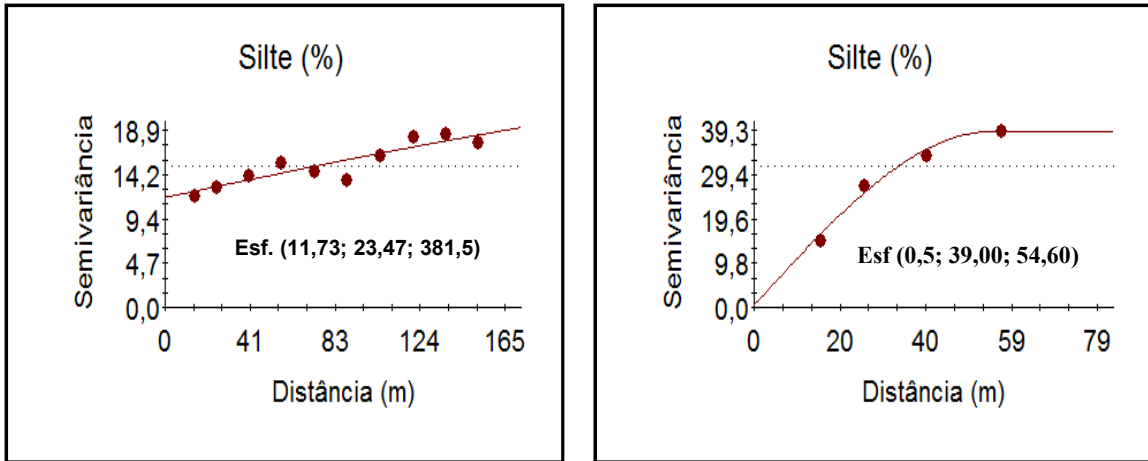
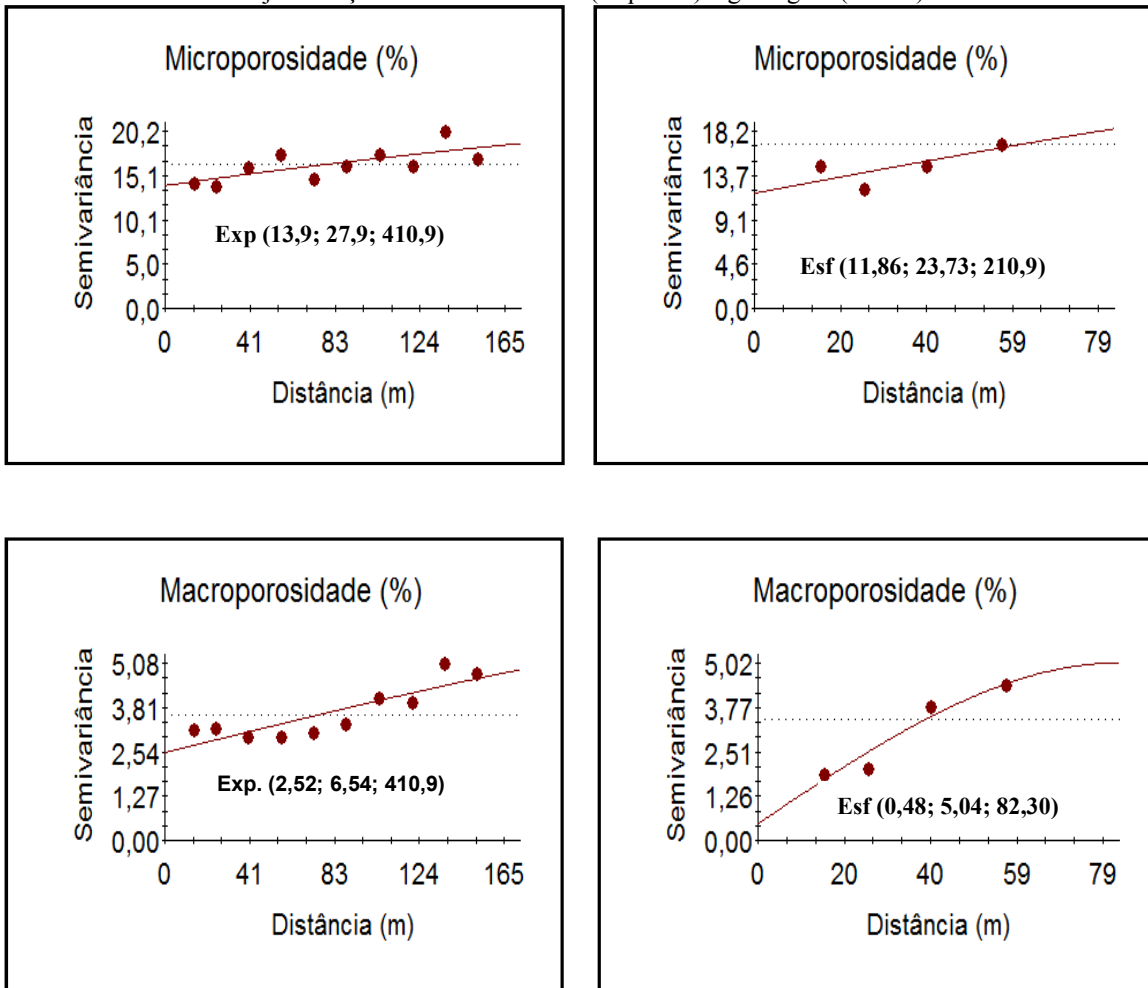
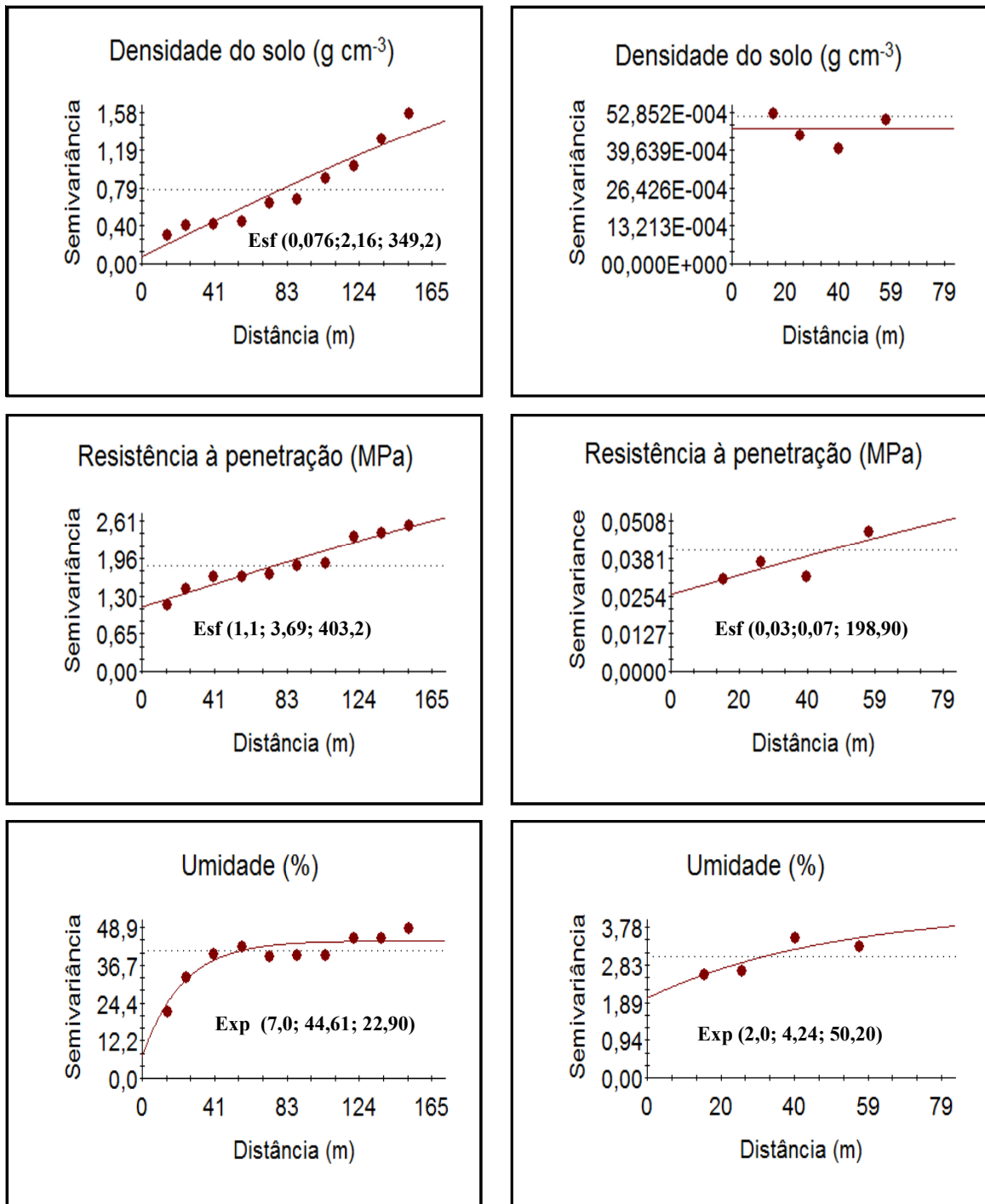


Figura 18 – Semivariograma da micro, macro, densidade do solo, resistência à penetração e umidade do solo do sistema de manejo de roçadora nas entrelinhas (esquerda) e gradagem (direita).





Na Tabela 2 encontram-se os parâmetros dos semivariogramas ajustados e os respectivos modelos. Os atributos densidade do solo e umidade do solo na área 2 e macroporosidade, areia e silte na área 1 apresentaram forte dependência espacial de acordo com critérios estabelecidos por Zimback (2001). Os demais atributos apresentaram moderada dependência, exceto a densidade do solo na área 1 que apresentou efeito pepita puro.

Os atributos, em geral, apresentaram valores relativamente baixos de efeito pepita. Segundo Carvalho et al. (2001), valores elevados de efeito pepita (C_0) indicam maior descontinuidade entre as amostras.

Os valores de alcance demonstram a distância máxima de dependência espacial entre os pontos amostrais (VIEIRA, 2000). Os valores de alcance variaram de 22,9 a 410,9 m para os atributos umidade gravimétrica e micro e macroporosidade na área 2 respectivamente. O conhecimento do alcance permite o delineamento de futuras amostragens assumindo as mesmas condições do estudo presente (CARVALHO et al., 2003). Neste sentido, conforme visto anteriormente, o atributo densidade do solo não apresentou estrutura de dependência espacial, indicando que a distância de variabilidade do alcance é inferior a esta distância.

Tabela 2 - Parâmetros de ajuste dos modelos de semivariogramas e respectivos graus de dependência espacial para as variáveis estudadas.

Variável	C_0	$C_0 + C$	Alcance	GD (%)	Modelo
Roçadora nas entrelinhas					
Micro	13,9	27,99	410,9	50,0	Exponencial
Macro	2,52	6,54	410,9	61,5	Esférico
D_s	0,076	2,16	349,2	96,5	Esférico
RP	1,11	3,69	403,2	69,9	Esférico
Areia	13,6	40,17	340,3	66,2	Esférico
Argila	3,41	6,82	402,5	50,0	Exponencial
Silte	11,73	23,47	381,5	50,0	Esférico
U. no solo	7,0	44,61	22,90	84,3	Exponencial
Gradagem					
Micro	11,86	23,73	210,90	50,0	Esférico
Macro	0,48	5,04	82,30	90,5	Esférico
D_s	-	-	-	-	EPP
RP	0,03	0,07	198,90	63,0	Esférico
Areia	4,6	59,08	54,50	92,2	Esférico
Argila	3,73	7,71	155,9	51,7	Exponencial
Silte	0,50	39,00	54,60	98,7	Esférico
U. no solo	2,00	4,24	50,20	52,80	Exponencial

EPP = Efeito pepita puro; D_s = densidade do solo; RP = Resistência mecânica do solo à penetração; C_0 = efeito pepita; $C_0 + C$ = patamar; GD = grau de dependência espacial.

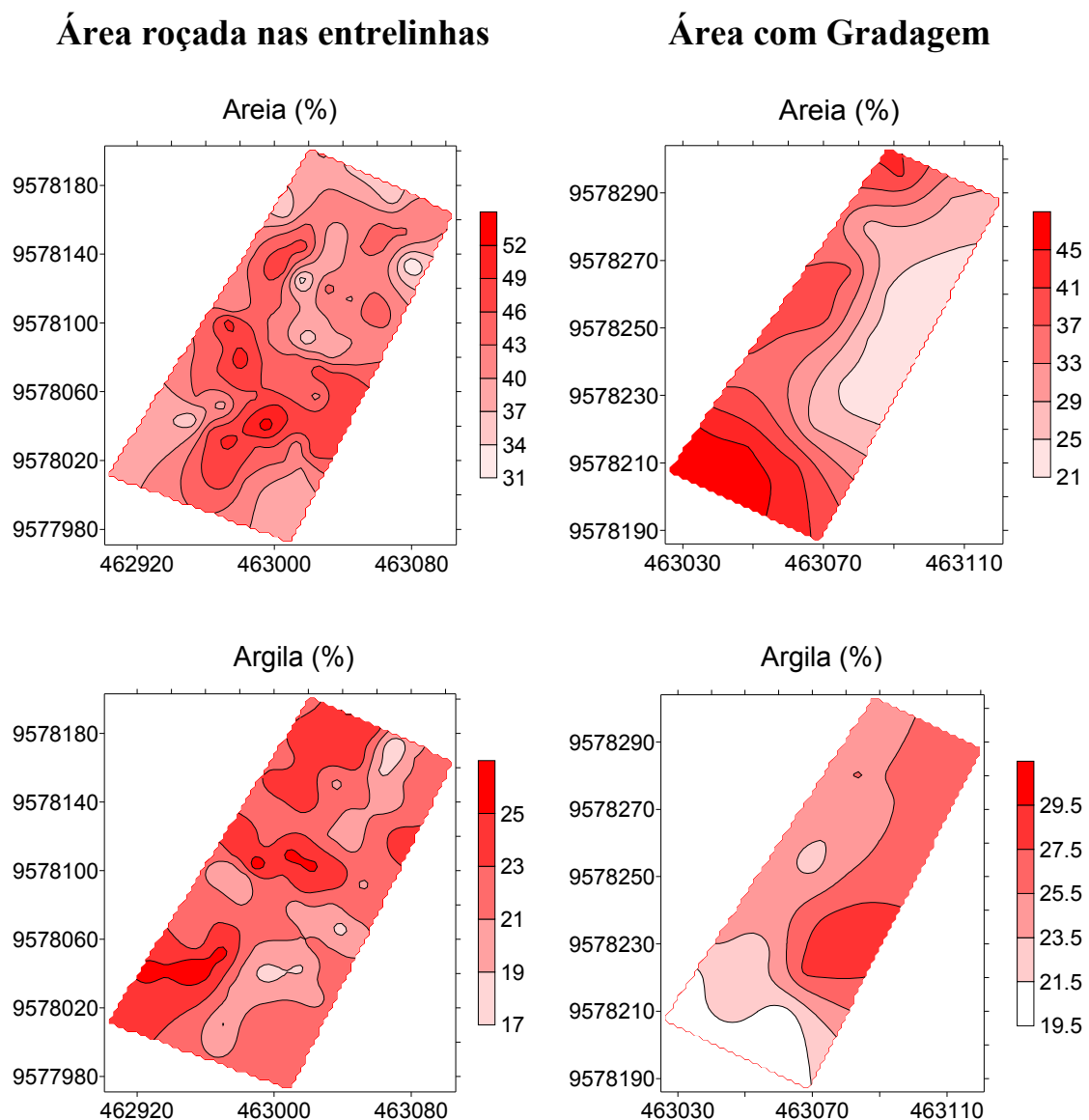
Após a interpolação dos dados, foi confeccionado os mapas de isolinhas, conforme ilustrado na Figura 19. Observa-se valores altos de resistência à penetração na parte superior da área 2, local onde se concentra o menor teor de água no solo. Enquanto que para a

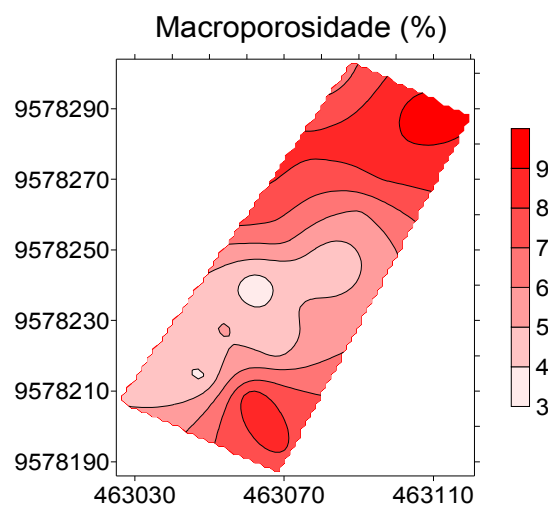
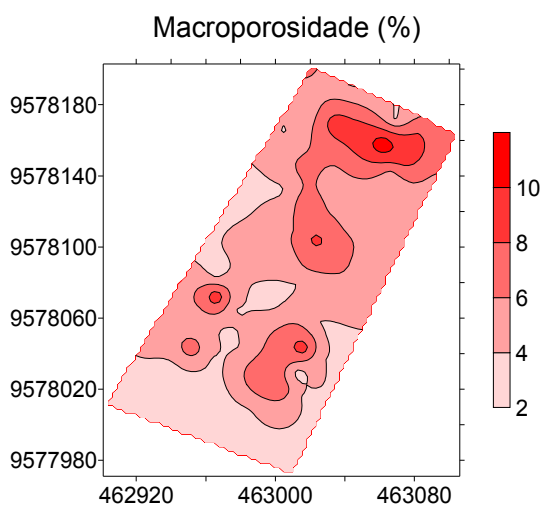
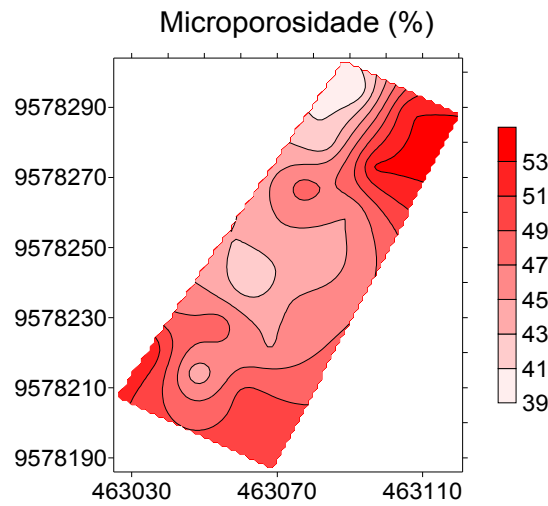
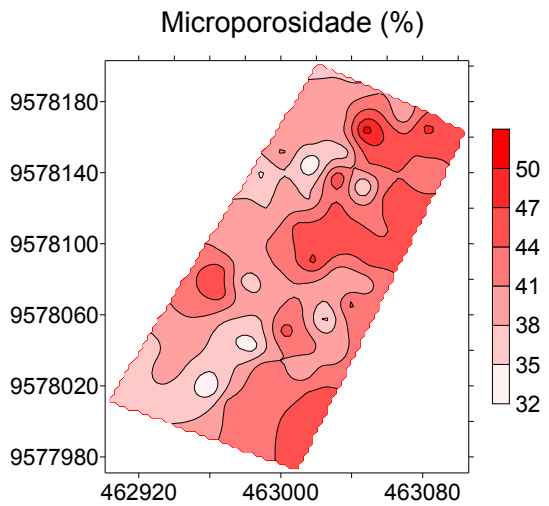
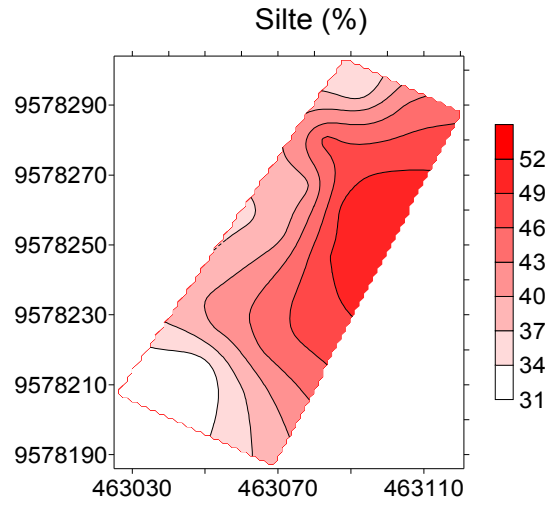
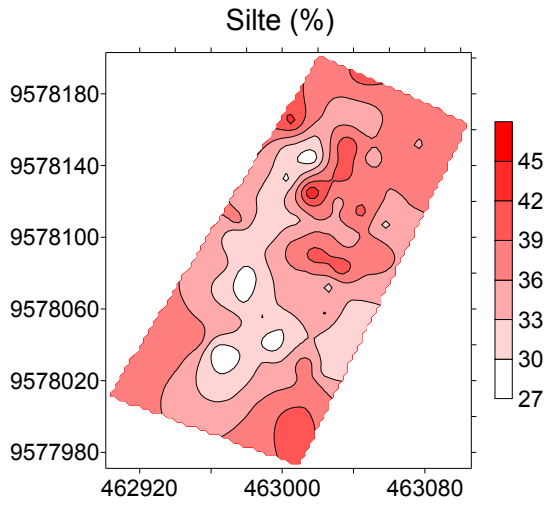
área 1, os valores altos de resistência à penetração se encontram na parte inferior, coincidindo com a o local de menor concentração de água no solo.

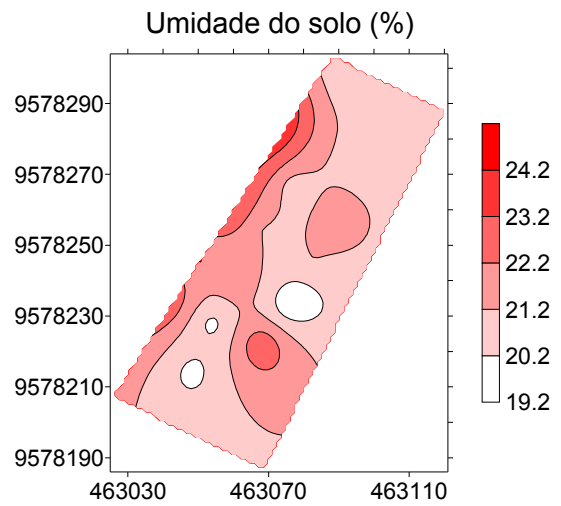
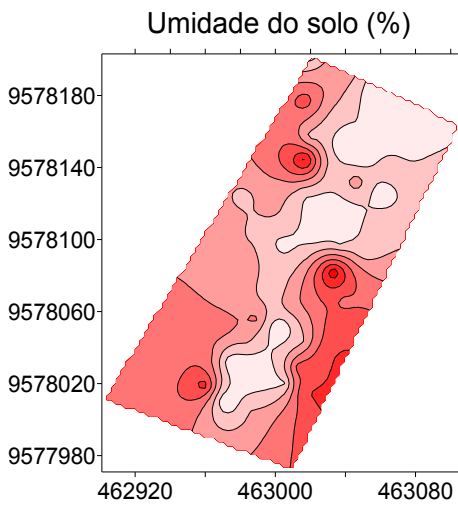
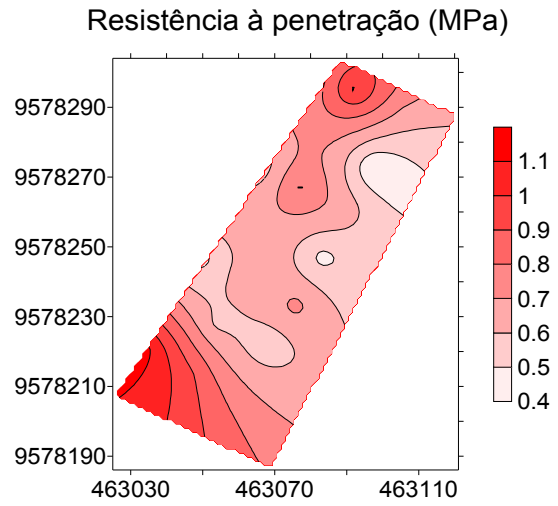
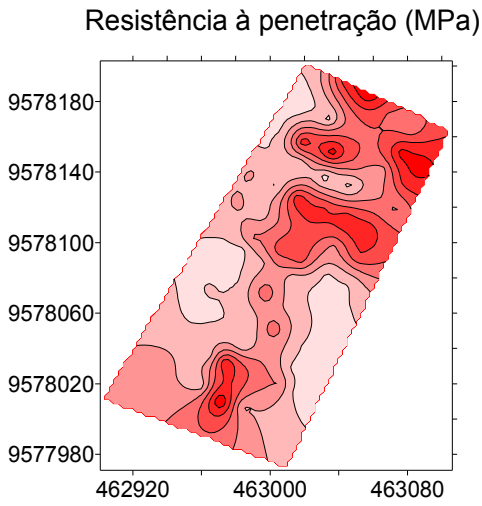
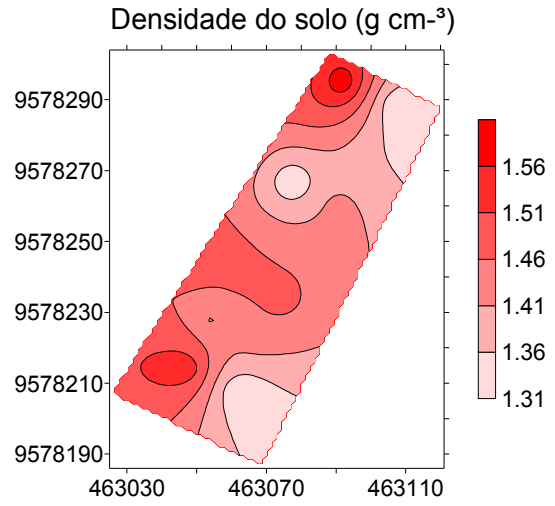
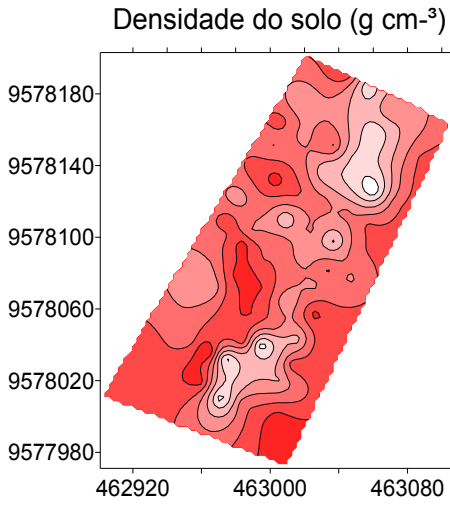
Verifica-se certa relação entre esses dois atributos. De acordo com Guedes Filho (2009), a resistência a penetração é mais afetada pela variação nos teores de água do solo no momento da amostragem, do que pela densidade do solo.

Na parte superior da área 2 verifica-se maior concentração de macroporos e menores valores de densidade do solo, semelhante com a relação encontrada na área 1. Nos locais com baixos valores de densidade verificou-se altos valores de macroporos, uma vez que possuem estreita relação (Guimarães 2000).

Figura 19 - Mapas de isolinhas para os atributos físicos na área com manejo de roçadora entrelinhas (lado esquerdo) e na área com manejo de gradagem (lado direito) em um Neossolo Flúvico na Fazenda de Pentecoste, 2011.







5 CONCLUSÃO

Através das informações obtidas neste trabalho foi possível verificar:

- O solo apresenta heterogeneidade, sendo necessário o conhecimento da variabilidade para estabelecer melhores sistemas de manejo do solo e das culturas;
- A geoestatística foi capaz de identificar a variabilidade e a dependência espacial dos atributos físicos do solo estudado;
- Com excessão da densidade do solo na área 1, os demais atributos apresentaram estrutura de dependência espacial;
- O solo da área 2 apresentou uma resistência mecânica do solo à penetração elevada e macroporosidade baixa, restringindo o crescimento das raízes, apesar de o solo apresentar-se em condições favoráveis de umidade;
- Apesar de o solo das duas áreas ter apresentado valores de macroporosidade e densidade semelhantes, a condição de umidade melhor na área com gradagem conferiu menores valores de resistência mecânica do solo à penetração das raízes, indicando relação direta deste atributo com a umidade.
- É necessário uma malha amostral maior para observar de forma melhor a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. L. de et al. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. **Ciência Natural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 275-282, 2003.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. **Física do solo: conceitos e aplicações**. Fortaleza: UFC, 2008. 485 p.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE Standart 1997**. 1 ed. St. Joseph: ASAE, 1997.
- ANDRADE, A. R. S. de et al. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 2, p. 322-329, 2005.
- ANDRADE, E. M.; PEREIRA, O. J.; DANTAS, F. E. R. **Semiárido e o manejo dos recursos naturais: uma proposta de uso adequado do capital natural**. Fortaleza: UFC, 2010. 408 p.
- BALASTREIRE, L.A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 310p.
- BARROS, P. A. de et al. **Análise espacial da resistência mecânica do solo à penetração sob cultivo de cana-de açúcar**. In: X JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 2010 – UFRPE. Recife, 2010. p.1-3.
- BERTOL, I. et al. Propriedades físicas de um cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, Viçosa, v. 58, n. 3, p. 555-560, 2001.
- BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem de capim-Elefante-Anão C.V. Mott. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 1047-1054, 2000.
- BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 155-163, 2004.
- CAMARGO, O. A. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solo do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas, IAC, 1986. 94 p. (Boletim Técnico nº 106).
- CAMARGO, O. T. de.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, 1997. 132 p.
- CAMPOS, M. C. C. et al. Dependência espacial de atributos físicos e hídricos de um espodossolo da zona da mata de Pernambuco. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, v. 7, n. 1, p. 84-91, 2007.
- CARVALHO, J.R.P.; VIEIRA, S.R.; MARINHO, P.R.; DECHEN, S.C.F.; MARIA, I.C.; POTT, C.A.; DUFRANC, G. **Avaliação da variabilidade espacial de parâmetros físicos do solo sob semeadura direta em São Paulo – Brasil**. Campinas: EMBRAPA, 2001. p.1-4. (Comunicado Técnico)

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 695-703, 2003.

CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J.; ARMANDO, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1153-1155, 2004.

CASALINHO, H. D. et al. Qualidade do solo como indicador de sustentabilidade de agroecossistemas. **Revista Brasileira de Agrociências**, v. 12, n. 2, p. 195-203, 2007.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 61-82, 2008.

CORRÊA, R. M. et al. Atributos físicos de solos sob diferentes usos com irrigação no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 358-365, 2010.

CORRECHEL, V.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Influência da posição relativa à linha de cultivo sobre a densidade do solo em dois sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 23, p. 165-173, 1999.

CUNHA, J. P. A. R.; VIEIRA, L. B.; MAGALHÃES, A. C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Revista Engenharia na Agricultura**, v.10, n. 1. 2002.

DALBIANCO, L. **Variabilidade espacial e estimativa da condutividade hidráulica e caracterização físico-hídrica de uma microbacia hidrográfica rural**. 2009. 116f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DALMAGO, G. A. **Dinâmica da água no solo em cultivos de milho sob plantio direto e preparo convencional**. 2004. 245f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **A cultura do coqueiro**. Disponível em:
<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Coco/ACulturadoCoqueiro/solos.htm>. Acesso em: jan. 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

FARIA, A. F. G. de et al. Influência do manejo do solo nas propriedades químicas e físicas em topossequência na bacia do Rio Araguaia, estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 517-524, 2010.

FONTENELE, W. **Indicadores físicos e hídricos da qualidade de um latossolo amarelo distrófico sob diferentes sistemas de manejo no cerrado do Piauí.** 2006. 52f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2006.

GUEDES FILHO, O. **Variabilidade espacial e temporal de mapas de colheita e atributos do solo em um sistema de semeadura direta.** 2009. 114f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 169-177, 2005.

GUIMARÃES, E. D. **Variabilidade espacial de atributos de um latossolo vermelho escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional.** 2000. 112f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

HERNANDES, A. et al. Variabilidad espacial edáfica em el sistema tradicional de conucos en el Amazonas de Venezuela. **Investigación Agrária – Sistema y Recursos Forestales**, v. 12, n. 2, p. 43-54, 2003.

HICKMANN, C. **Efeitos do manejo em propriedades físicas e no carbono orgânico total de um argissolo vermelho-amarelo localizado na zona da mata mineira.** 2009. 87f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2009.

HOAD, S.P. et al. The management of wheat, barley, and oat root systems. **Advances in Agronomy**, New York, v.74, p.195-254, 2001.

IMHOFF, S. et al. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 11-18, 2001.

JOHANN, J. A. et al. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um latossolo bruno distrófico da região de cascavel, PR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 2/3, p. 212-219, 2004.

JUAN, P. *et al.* Geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil salinity. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 108, n. 1, p. 62-72, 2011.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. **Ciência Agrotécnica**, v. 32, n. 3, p. 914-922, 2008.

JUNQUEIRA JUNIOR, J. A. **Escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e usos do solo em uma bacia hidrográfica de Cabeceira do Rio Grande – MG.** 2006. 96f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

KLEIN, V. A. et al. Densidade máxima e relativa de solos sob plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Resumos expandidos.** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2004. CD-ROM.

KRAMER, V. R. et al. Variabilidade espacial de alguns parâmetros físico-hídricos de solos de uma pastagem do sistema integrado de produção agroecológica (Fazendinha KM-47). **Revista Universidade Rural**, v. 24, n. 1, p. 31-36, 2004.

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2 ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Embrapa-SNLCS, 1984. 46p.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v. 1, p. 277-294, 1985.

LIBARDI, P. L.; MELO FILHO, J. F. Análise exploratória e variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica, em um experimento de perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 30, n. 2, p. 197-206, 2006.

LIMA, J. A. G. et al. Variabilidade espacial de características físico-hídricas de um cambissolo cultivado com mamão no semi-árido do RN. **Revista Caatinga**, v.19, n.2, p.192-199, 2006.

MAIA, S. M. F. Impactos de sistemas agroflorestais e convencional sobre a qualidade do solo no semi-árido cearense. **Revista Árvore**, v. 30, n.5, p. 837-848, 2006.

MENDES, F. G.; MELLONI, E. G. P.; MELLONI, R. Aplicação de atributos físicos do solo no estudo da qualidade de áreas impactadas, em Itajubá-MG. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 211-220, 2006.

NAGUMO, C. H. **Variabilidade especial e temporal de parâmetros hídricos do solo em culturas de soja e aveia-preta sob sistema semeadura direta**. 2009. 127f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico, Campinas, 2009.

ORTIZ, G. C. **Aplicação de métodos geoestatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo**. 2002. 91f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

PRADO, R. M.; ROQUE, C. G.; SOUZA, Z. M. Sistemas de preparo e resistência à penetração e densidade de um latossolo vermelho eutrófico em cultivo intensivo e pousio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 12, p. 1795-1801, 2002.

REICHARDT, K. TIMM, L. C. Solo planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri, SP: Manole, 2004.

REYNOLDS, W. *et al.* Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**, v. 146, n. 3-4, p. 466-474, 2008.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. Revisão, **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

ROBERTSON, G. P. **GS+ geostatistics for the environmental sciences**. Version 5.1. [S.l.]: Gamma Design Software, 1998. 152 p.

ROMERO, E. M. **Condutividade hidráulica, porosidade e resistência à penetração em latossolos artificialmente compactados**. 2007. 67f. Dissertação (Mestrado em solos e nutrição de plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2007.

RUIZ, E. R. S. **Mapas de isocompactação e isofertilidade do solo em diferentes sistemas de manejo**. 2003. 176f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2003.

SÁNCHEZ, G. A. R. **Variabilidade espacial do carbono e outros atributos do solo em uma área destinada ao reflorestamento do Rio Grande do Norte**. 2010. 121f. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

SANTIN, M. F. C. L. Vulnerabilidades ambientais e implicações para o desenvolvimento sustentável. **Análise**, v. 17, n. 1, p. 91-104, 2006.

SANTOS, J. D. **Alteração das propriedades físicas e químicas do solo em função de diferentes sistemas agrícolas - São José da Lapa/MG**. 2007. 88f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SANTOS, P. R. **Atributos do solo em função dos diferentes usos em perímetro irrigado do sertão de Pernambuco**. 2010. 113f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural do Pernambuco, Recife, 2010.

SANTOS, R. A. dos. **Propriedades de retenção de água por espaços porosos não homogêneos: experimentos de laboratório e simulação computacional**. 2005. 124f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2005.

SILVA, A. P. da et al. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 1-10, 2008.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America**, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, E. M. B. et al. Utilização de cera de abelhas na determinação da densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 955-959, 2003.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, A.; ALBUQUERQUE, J.A. et al. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, v.35, n.3, p.544-552, 2005.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira Ciência Solo**, n.24, p.191-199, 2000.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 399-406, 2004.

SIQUEIRA, G. M. **Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos**. 2006. 182f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Agronômico, Campinas, 2006.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, v. 67, p. 203-211, 2008.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F. Variabilidade espacial da densidade e da porosidade de um latossolo vermelho eutroférico sob semeadura direta por vinte anos. **Bragantia**, v. 68, n. 3, p. 751-759, 2009.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P.; VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, n.1, p.367-372, 1997.

SOUZA, L. C.; QUEIROZ, J. E.; GHEYI, H. R. Variabilidade espacial da salinidade de um solo aluvial no semi-árido paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 35-40, 2000.

SOUZA, Z. M. et al. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 128-134, 2006.

SOUZA, Z.M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta, em Selvíria, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.699-707, 2001.

SUSUKI, L. E. A. S. et al. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em latossolo e argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1159-1167, 2007.

TAVARES FILHO, J. et al. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um latossolo roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 725-730, 2001.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARD, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 573-581, 1998.

UNGER, P. W.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: A review. **Agronomy Journal**, v. 86, p. 759-766, 1994.

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

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties the soil. In: HILL, D. (Ed.) **Applications of soil Physics**. New York: Academic Press, 1980. cap.13, p. 319-344.

XIE, Y. *et al.* Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis. **Chemosphere**, v. 82, n. 3, p. 468-476, 2011.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114f. Tese (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.