



**VARIABILIDADE ESPACIAL DA
DISPONIBILIDADE DE ÁGUA E DA
POROSIDADE DRENÁVEL EM UM
LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO**

WELSON LIMA SIMÕES

2004

57401
049070

WELSON LIMA SIMÕES

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA DISPONIBILIDADE DE ÁGUA
E DA POROSIDADE DRENÁVEL EM UM LATOSSOLO
VERMELHO DISTROFÉRRICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Irrigação e Drenagem, para a obtenção do título de "Mestre".

Orientador

Prof. Dr. Elio Lemos da Silva

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

2004

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Simões, Welson Lima

**Variabilidade espacial da disponibilidade de água e da porosidade
drenável em um Latossolo Vermelho distroférico / Welson Lima Simões. -
- Lavras : UFLA, 2004.**

85 p. : il.

Orientador: Elio Lemos da Silva.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia:

**1. Manejo do solo. 2. Variabilidade espacial. 3. Latossolo. I. Universidade
Federal de Lavras. II. Título.**

**CDD-631.45
-631.62**

WELSON LIMA SIMÕES

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA DISPONIBILIDADE DE ÁGUA E DA
POROSIDADE DRENÁVEL EM UM LATOSSOLO VERMELHO
DISTROFÉRICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Irrigação e Drenagem, para a obtenção do título de "Mestre".

APROVADA em 10 de fevereiro de 2004

Prof. Dr. Marcelo Silva de Oliveira

UFLA

Profa. Dra. Elizabeth Ferreira

UFLA

Elio Lemos da Silva

Prof. Dr. Elio Lemos da Silva

UFLA

(Orientador)

LAVRAS

MINAS GERAIS - BRASIL

A Deus,

pela saúde e força a mim concedidas,

OFEREÇO

Aos meus pais, José Cunha Simões e Maria Souza Lima Simões,

Aos meus irmãos, Luziane Lima Simões e Gabriel Lima Simões,

À companheira, Daniela Miranda de Lima,

A todos os meus familiares e amigos,

DEDICO

3.4.5 Porosidade drenável.....	32
3.5 Análise dos dados.....	33
3.5.1 Análise descritiva (estatística clássica).....	33
3.5.2 Análise geostatística (espacial).....	36
3.5.3 Mapeamento através da krigagem	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Análise descritiva clássica e análise da variabilidade espacial.....	38
4.1.1 Argila.....	38
4.1.2 Areia	42
4.1.3 Silte.....	46
4.1.4 Densidade de partículas.....	50
4.1.5 Densidade global	54
4.1.6 Água disponível.....	59
4.1.7 Porosidade drenável.....	63
4.2 Análise geral das estatísticas	67
4.3 Krigagem e correlações	68
5 CONCLUSÕES.....	76
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar meus caminhos.

Aos meus pais, pela força e incentivo ao longo de cada jornada.

Aos meus irmãos, Luziane e Gabriel, pelo carinho e amizade.

À minha companheira, Daniela, pela presença incondicional e apoio.

Ao Professor Dr. Elio Lemos da Silva, pela convivência, orientação e amizade.

Ao Professor Dr. Marcelo Silva de Oliveira, pela co-orientação e apoio.

A todo o corpo docente do curso de pós-graduação em Engenharia Agrícola, pelo conhecimento transmitido.

À professora Dr. Elizabeth Ferreira, membro da banca examinadora, pelas valiosas sugestões e observações.

Aos funcionários do Dptº de Engenharia: Daniela, Zé Luiz, Neném e Seu Berg, pela ajuda e amizade.

Ao professor José Marcio, pela ajuda no manuseio dos softwares.

Aos funcionários do Laboratório de Física do Solo, Delanne e Dulce, e ao colega Jorge, pela ajuda nas análises texturais.

À minha tia Idália, a quem eu e minha família devemos profundos agradecimentos pelo acolhimento e incentivo inicial à busca dos nossos objetivos.

Aos amigos de república, Nelson, Alisson, Bruno e Paulo, pela agradável convivência.

Aos amigos e colegas de curso, Vladimir, Débora, Marcio Willian, Nelson, Evonaldo, Cíntia, Tadeu, Hudson, Kelte, Julianni, Guilherme, Antônio Carlos, Fabio Sato, Marcio Coelho, Marcio Santana, Gilberto, Marcio Koetz e demais contemporâneos, pela convivência.

À Universidade Federal de Lavras, pela oportunidade de realização deste trabalho.

À CAPES, pela bolsa de estudos.

A todos aqueles que colaboraram de alguma forma para o cumprimento desta etapa da minha vida.

3.4.5 Porosidade drenável.....	32
3.5 Análise dos dados.....	33
3.5.1 Análise descritiva (estatística clássica).....	33
3.5.2 Análise geoestatística (espacial).....	36
3.5.3 Mapeamento através da krigagem.....	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Análise descritiva clássica e análise da variabilidade espacial.....	38
4.1.1 Argila.....	38
4.1.2 Areia	42
4.1.3 Silte.....	46
4.1.4 Densidade de partículas.....	50
4.1.5 Densidade global	54
4.1.6 Água disponível.....	59
4.1.7 Porosidade drenável.....	63
4.2 Análise geral das estatísticas	67
4.3 Krigagem e correlações	68
5 CONCLUSÕES.....	76
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

RESUMO

SIMÕES, Welson Lima. Variabilidade espacial da disponibilidade de água e da porosidade drenável em um Latossolo Vermelho distroférico. 2004. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG*

A variabilidade espacial de alguns atributos físico-hídricos do solo, tais como água disponível e porosidade drenável, pode influenciar diretamente o desenvolvimento e a produção das culturas. Esta variabilidade pode ser afetada por diversos fatores, dentre eles as práticas de manejo e uso do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do manejo do solo na variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho distroférico. O estudo foi realizado em três áreas vizinhas, com dimensões de 20 x 100 m cada, situadas no campus da Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, com os seguintes usos: A1 – área com mato nativo em pousio há 2 anos; A2 – área recentemente plantada com café e A3 – área cultivada com café há 3 anos. A amostragem foi disposta em malha com espaçamentos entre pontos de 1 m, 5 m e 10 m, totalizando 188 pontos amostrais. Em cada ponto foram coletadas amostras deformadas e indeformadas à profundidade de 0,3 m para avaliação dos seguintes atributos: água disponível, porosidade drenável, densidade global, areia, argila, silte e densidade de partículas. Os dados foram analisados pela estatística clássica com auxílio do software Sisvar 4.3 e pela geoestatística (análise espacial) com uso do software GeoR 1.2-5. A porosidade drenável e a água disponível foram altamente influenciadas pelo manejo das áreas, observando-se valores médios decrescentes desses atributos nas áreas 1, 3 e 2. A área 2 apresentou, no geral, os maiores coeficientes de variação, porém os maiores alcances. A porosidade drenável teve, em módulo, maiores correlações com a densidade global para as áreas 1 (-0,38) e 2 (-0,67) e com argila (-0,18) para área 3. A água disponível teve, em módulo, maiores correlações com argila (0,27) para área 1, silte (0,21) na área 2 e areia (-0,36) na área 3. A krigagem mostrou-se um interpolador eficiente para avaliação da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo, sendo uma ferramenta indispensável para um manejo mais preciso de áreas irrigadas e em experimentos de campo.

* Comitê Orientador: Elio Lemos da Silva - UFLA (Orientador), Marcelo Silva de Oliveira - UFLA.

ABSTRACT

SIMÕES, Welson Lima. Spatial variability of soil available water and drainable pore volume in a Distroferric Red Latossol. LAVRAS: UFLA, 2004. 85 p. (Thesis – Master Degree in Agricultural Engineering)*

The spatial variability of some soil water properties like available water and drainable pore volume, can show effects on growing and production of crops. This variability can be affected by the management and use of the soil. The present research aimed the evaluation of soil management effect on spatial variability of soil water properties in a Distroferric Red Latossol. The study was carried out in three contiguous areas, measuring 20 m by 100 m each, in the “Federal University of Lavras”, city of Lavras, Minas Gerais, Brazil, with the following uses: A1 –area with native brush and 2 years rest; A2 – area with recently planted coffee trees; A3 area with three-year-old coffee trees. The sampling was done in a grid with distances of 1 m, 5 m and 10 m between points, totalizing 188 sampling points. It was collected, in each sampling point, disturbed and undisturbed samples at depth of 0.30 m for evaluation of soil available water, drainable pore volume, bulk density, sand, clay, silt and mineral density. The results were analyzed by classic statistics using the software “Sisvar 4.3” and by geo-statistics (spatial analysis) with the software “GeoR 1.2-5”. Drainable pore volume and soil available water were highly affected by the management and use of the studied areas. It was observed decreasing average values of this properties in the areas 1, 3 and 2. The area number 2 presented, in general, the highest coefficients of variation and the highest ranges. The drainable pore volume had, in module, the highest correlations with bulk density for the areas 1 and 2 and with clay for the area 3. The soil available water had, also in module, the highest correlations with clay for area 1, silt for the area 2 and sand for the area 3. The kriging process showed as a efficient interpolator for the evaluation of spatial variability of soil water properties, being a very important tool for a more precise management of irrigated areas and in field experimental designs.

* **Guidance committee:** Elio Lemos da Silva - UFLA (Major professor),
Marcelo Silva de Oliveira - UFLA.

1 INTRODUÇÃO

A falta de água no solo próximo às raízes diminui a transpiração e, em consequência, a absorção de água e nutrientes pelas plantas. Nessas condições, segundo Lier (2000), as taxas fotossintética e respiratória, e o crescimento da planta não se realizam a valores máximos e a quantidade de água disponível à planta torna-se fator limitante ao seu desenvolvimento.

O conhecimento dos limites, superior e inferior, da disponibilidade de água, bem como os fatores que afetam esse reservatório, é de suma importância para a resolução de problemas práticos de irrigação e drenagem.

A capacidade de campo vem sendo definida, tradicionalmente, como a umidade do solo após “cessada” a redistribuição da água, proveniente de uma irrigação ou chuva. É também chamada de “limite superior” de disponibilidade de água. O ponto de murcha permanente, “limite inferior”, é alcançado quando o solo está com um teor de água indisponível para a maioria das culturas. Na literatura são citadas, como tensões representativas da capacidade de campo, 6, 10 e 33 kPa, dependendo das características do solo e, como tensão no ponto de murcha permanente, 1500 kPa.

A capacidade de armazenamento de água do solo está diretamente relacionada à distribuição dos poros que, por sua vez, sofre influência da textura e da estrutura do solo e do uso e manejo empregados na área.

Sendo o solo um fator de grande peso na produção agrícola e dotado de grande heterogeneidade, o conhecimento de sua variabilidade espacial é imprescindível para um melhor manejo e entendimento da resposta das culturas.

A análise da variabilidade de atributos do solo a partir dos parâmetros oriundos da estatística clássica é extremamente útil, mas tem como grande restrição o fato de não avaliar a distribuição dos dados no espaço, não podendo,

assim, concluir se a variação dos dados está relacionada com os locais de amostragem (Silva, 1988).

Ao contrário da estatística clássica, a geoestatística leva em consideração a dependência espacial entre as amostras e a sua localização geográfica. Para o manejo de áreas grandes e/ou muito heterogêneas, a amostragem de todos os pontos dos quais se deseja informações, na maioria das vezes, é uma opção cara e trabalhosa. Porém, segundo Vieira (2000), com o procedimento geoestatístico da krigagem, pode-se estimar os valores desses pontos sem maiores gastos de amostragem, análise e processamento, sem tendência e com variância mínima.

Neste contexto, objetivou-se, com o presente trabalho, avaliar a influência dos atributos físicos e do manejo do solo na variabilidade espacial da disponibilidade de água e da porosidade drenável por meio da estatística clássica e da geoestatística.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Água disponível

Depois de cessada a precipitação ou irrigação, a camada superior do solo que foi quase totalmente saturada não retém toda a água, surgindo um movimento descendente em resposta aos gradientes gravitacional e de pressão. Este movimento da água no perfil do solo após a infiltração é denominado drenagem ou redistribuição interna. Dependendo das condições existentes, a velocidade com que a redistribuição ocorre pode ser apreciável por muitos dias ou tornar-se rapidamente desprezível. A intensidade da redistribuição e sua duração determinam a capacidade de armazenamento do solo. Essa é uma propriedade importante no estudo de diversas questões da engenharia de recursos hídricos, tornando-se fundamental em projetos de irrigação (Tucci, 2001).

Segundo Bernardo (1995), a água disponível é classicamente definida como sendo uma característica estática e representa a quantidade de água que um solo poderia reter ou armazenar entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, equivalente às tensões de 33 e 1500 kPa, portanto, totalmente aproveitável pelos vegetais. Na realidade, sabe-se que os conceitos de capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) não são exatos, pois foram formulados em relação à tensão com que a água é retida no solo, independente da condição do mesmo e do vegetal presente. Para Reichardt, (1996), muitas plantas conseguem retirar a água retida sob tensões superiores a 1500 kPa, o que dificulta a definição exata do que seja água disponível. A validade dessa simplificação está no fato de que as forças de retenção de água do solo aumentam muito rapidamente a partir do PMP (1500 kPa) e, dessa maneira, qualquer pequena retirada de água do solo, a partir desse ponto, provoca um

enorme aumento na força com que o restante da água estará retido. Deve-se considerar também que, bem antes de atingido o PMP, a água começa a ser absorvida com menos intensidade, o que é mais evidenciado no caso das plantas em um solo mais argiloso (Figura 1). Observa-se também, na Figura 1, que o armazenamento de água no solo argiloso é superior ao arenoso.

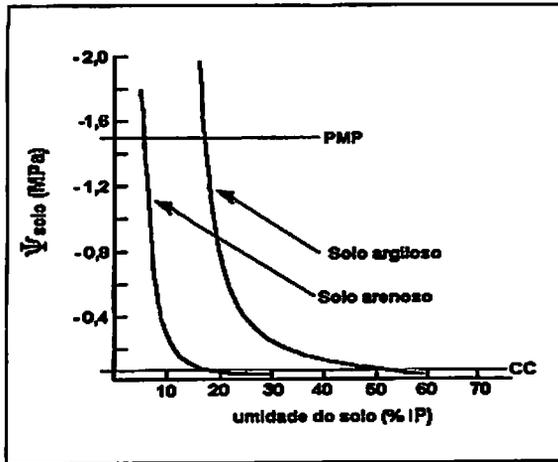


FIGURA 1 Exemplo de variação do potencial de água em função do teor de água no solo (PMP = ponto de murcha permanente; CC = capacidade de campo e P = a base de peso), Lavras, MG, 2004.

Segundo Freire (1975), a retenção de água pelo solo é influenciada principalmente pela textura, estrutura, matéria orgânica, óxidos de ferro livres, superfície específica e alterações no preparo das amostras.

O conceito de água disponível é bastante controverso dentro da física do solo e áreas correlatas; por ser oriundo da diferença entre a CC e o PMP, está envolto basicamente em três tipos de dificuldades:

1) grande variação nos valores de potencial matricial correspondentes à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente, embora haja tendência em assumirem-se valores constantes (Richards, 1949 e Souza, 1989);

2) falta de correspondência entre valores medidos em laboratório e no campo (Borges & Medina, 1981 e Stevenson, 1982);

3) estabelecimento das condições sob as quais os conceitos foram definidos, particularmente do fim da drenagem livre para a medida da capacidade de campo (Reichardt, 1996; Cassel & Nielsen, 1986; Souza, 1989).

2.2 Capacidade de campo

A caracterização do solo como um reservatório de água, aspecto de fundamental importância na resolução de problemas práticos ligados à irrigação, à drenagem e mais especificamente à água disponível para as plantas, passa pela caracterização de sua umidade na capacidade de campo (Carvalho et al., 1996).

O armazenamento de água não é um problema de estática, mas sim um fenômeno temporário ditado pela dinâmica da água no solo, fato que complica sua descrição matemática. Assim, ao longo do tempo, foram introduzidos conceitos não rigorosamente corretos, mas aceitáveis do ponto de vista prático, como é o caso do conceito de capacidade de campo. A redistribuição interna tem sua velocidade diminuída com o tempo, até que atinge valores desprezíveis. A partir desta constatação, definiu-se capacidade de campo como o teor de água do solo a partir do instante em que a redistribuição “cessa”, do ponto de vista prático (Tucci, 2001).

O processo de redistribuição e, conseqüentemente, da variação do armazenamento é contínuo, sem que apresente interrupção ou níveis estáticos. Apesar das limitações, o conceito de capacidade de campo é aceito para definir o limite superior de água que um solo pode reter. Sua aplicação é mais válida em solos de textura grossa já que nestes a diminuição da umidade implica um rápido decréscimo da condutividade hidráulica, com o fluxo interno tornando-se rapidamente muito pequeno. Em solos com textura média ou fina, o processo de

redistribuição pode persistir de maneira apreciável por um longo período de tempo (Reichardt, 1985; Tucci, 2001 e Souza, 1989).

Recentemente, com o desenvolvimento de teorias sobre o movimento da água no solo e com as técnicas experimentais de medidas mais precisas, o conceito de CC tem sido considerado arbitrário e não como uma propriedade intrínseca do solo, independente do modo de sua determinação. Este conceito não leva em conta fatores como a umidade do solo antes da infiltração, profundidade de molhamento, quantidade de água aplicada, heterogeneidade do perfil entre outros, além de considerar que o processo de redistribuição tem uma interrupção abrupta ou níveis estáticos (Reichardt, 1996).

A necessidade de uma definição mais precisa está no fato de a capacidade de campo ser de grande importância agrônômica, sobretudo na estimativa da água disponível de um solo ou, em agricultura irrigada, na determinação da lâmina de irrigação. Seu valor representa a umidade máxima do solo para o qual a perda de água por drenagem é pequena e, por isso, ela também é chamada de “limite superior de disponibilidade de água”, pois se o solo estiver com teores de água mais elevados, esta água, embora disponível, não o é por muito tempo (Lier, 2000).

Para Ferreira (1980), existe uma correlação entre o potencial matricial e o teor de água, descrita pela curva característica de retenção de água no solo, revelando uma região na qual a umidade do solo permanece constante com uma pequena variação no valor do potencial, originando um ponto de inflexão. Segundo Marcos (1971), citado por Carvalho et al. (1996), o ponto de inflexão da curva característica de um determinado solo indica sua capacidade de campo e pode ser determinado por vários métodos.

A facilidade da determinação, em laboratório, da umidade do solo em função de um potencial matricial, quando comparada com a determinação da capacidade de campo *in situ*, tem levado muitos pesquisadores a utilizar como

capacidade de campo a umidade retida às tensões de 6, 10 e 33 kPa (Bernardo, 1995 e Lier, 2000). Nesse caso é considerada como critério de seleção a textura do solo; assim, quanto mais arenoso for o solo, menor a tensão considerada, ignorando, dessa forma, seu verdadeiro conceito e reduzindo a validade da sua utilização. Para Reichardt (1988), esses valores têm pouco fundamento teórico, além da literatura apresentar muitas controvérsias. Bernardo (1995) comenta ainda que a tensão geralmente usada é de 33 kPa, para qualquer tipo de solo.

Ferreira (1980), estudando os pontos de inflexão das curvas características de um Latossolo Roxo distrófico, cita a tensão 6 kPa como a melhor estimativa para capacidade de campo desse solo.

Segundo Cassel & Nielsen (1986), apesar das limitações, o conceito de capacidade de campo continua a ser usado em aplicações práticas, uma vez que um procedimento mais adequado ainda não foi formalizado.

2.3 Ponto de murcha permanente

À medida que a água do solo vai sendo utilizada pelos vegetais e sendo perdida no processo de evapotranspiração, a espessura do filme d'água ao redor das partículas do solo vai diminuindo e a força com que a água está retida vai aumentando. Não havendo reposição, com o avanço dos processos de perda, a água ficará retida pelas partículas coloidais a uma tensão que o sistema radicular não conseguirá absorver. Nessa condição, convencionou-se que esse solo estaria no ponto de murcha permanente, ou seja, haverá um murchamento podendo levar à morte do vegetal (Peres, 2002).

Furr & Reeve (1945), citados por Cassel & Nielsen (1986), definem ponto de murcha permanente como sendo o teor de água no solo no qual o par de folhas mais baixas de uma determinada espécie de planta, em um determinado estágio de crescimento, murcha e não se recupera quando colocada em uma

câmara de atmosfera saturada. Lier (2000) faz o mesmo comentário a respeito, porém, não faz menção ao par de folhas mais baixas.

Segundo Lier (2000), a importância da determinação do PMP é menor que a da capacidade de campo, por estar fora da faixa de umidade que ocorre normalmente em solos agrícolas irrigados e o seu valor é utilizado apenas para caracterizar o solo em termos da sua capacidade de água disponível. Outro fato é que, nas altas tensões, grandes variações de potencial matricial causam pequenas variações de umidade, implicando em pequenos erros. De acordo com Cassel & Nielsen (1986), para a maioria dos solos, exceto para os de textura fina, as variações do teor de água entre as tensões de 800 e 3000 kPa são desprezíveis. No entanto, a determinação do PMP nas condições de campo não é constante para um solo específico. Na verdade, o PMP resulta de efeitos integrados das condições do solo, planta e atmosfera. A extensão e profundidade do sistema radicular, cobertura vegetal, proporção relativa da superfície de evaporação e microclima, são elementos que definem com exatidão o PMP nas condições de campo.

2.4 Densidade global

A densidade do solo corresponde à massa seca por unidade de volume de solo, podendo ser expressa em g cm^{-3} , levando em consideração o volume de vazios, espaços que podem estar ocupados por água e/ou ar. É também chamada de densidade aparente ou densidade do solo. Nos solos arenosos, normalmente, a densidade global varia de 1,3 a 1,8 g cm^{-3} , nos solos argilosos de 1,0 a 1,4 g cm^{-3} e nos solos orgânicos de 0,2 a 0,6 g cm^{-3} (Libardi, 1999). Os horizontes superficiais do solo normalmente apresentam menor densidade que os horizontes subsuperficiais (Buckman & Brady 1989 e Chan, 1981).

Kiehl (1979) comenta que a densidade global depende da natureza, das dimensões e da disposição das partículas do solo e, segundo Archer & Smith

(1972), variações na densidade afetam a disponibilidade de água e a capacidade de aeração, influenciando fortemente a permeabilidade, a taxa de drenagem e a penetração das raízes no solo.

2.5 Porosidade

Kiehl (1979) define a porosidade como sendo o volume de vazios ou ainda o espaço do solo não ocupado pela "matriz" (conjunto dos componentes orgânicos e inorgânicos).

O espaço poroso de um solo é a porção ocupada pelo ar e pela água. O tamanho deste espaço poroso é principalmente determinado pela distribuição e arranjo das partículas sólidas (Buckman & Brady, 1989). A porosidade pode ser classificada em macro e microporosidade. Oliveira (1968) utiliza como limite de separação entre a macro e microporosidade uma tensão de 6 kPa, a qual corresponde aos poros com diâmetros da ordem de 50 μm , ou seja, poros com diâmetros menores que 50 μm são considerados microporos.

A porosidade do solo é a propriedade que interfere na aeração, condução e retenção de água, capacidade de penetração e ramificação das raízes no solo e, conseqüentemente, no aproveitamento de água e nutrientes disponíveis (Tognon, 1991).

Para Klar (1988), quanto maior a porosidade total, maior a capacidade do solo em armazenar água. Por isso, os solos argilosos (textura fina) apresentam maior capacidade de retenção e disponibilidade de água às plantas que os solos arenosos (textura grossa). Segundo Buckman & Brady (1989), apesar de um solo arenoso apresentar porosidade total relativamente reduzida, a movimentação da água e do ar é mais rápida devido ao predomínio de macroporos, que permitem maior movimento da água e do ar.

Segundo Tormenta et al. (1998), a porosidade drenável, ou de aeração, destaca-se como uma das propriedades mais importantes em relação ao

desempenho dos sistemas de manejo sobre a produtividade das culturas. Pois, em caso de compactação do solo, pode ocorrer a redução da capacidade de retenção e do conteúdo de água disponível. Segundo Currie (1984), é comum também a ocorrência de baixa difusão de oxigênio no solo sob condições de umidade elevada.

Para Bertoni & Lombardi Neto (1990), a perda da porosidade está associada à redução do teor de matéria orgânica, à compactação e ao efeito do impacto das gotas das chuvas, diminuindo o tamanho dos agregados.

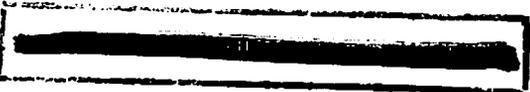
2.6 Textura e estrutura

A parte sólida do solo possui tamanhos diferentes. Algumas partículas são suficientemente grandes para serem vistas a olho nu, ao passo que outras são tão diminutas a ponto de apresentarem propriedades coloidais (Reichardt, 1985).

Segundo Cabello (1996), os dois métodos mais utilizados para a classificação textural do solo, o da USDA (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos) e o da Sociedade Internacional de Ciência do Solo, convencionam os termos “areia” para partículas de diâmetro entre 0,2 e 0,05 mm, “silte” entre 0,05 e 0,02 mm e “argila” para partículas com diâmetros inferiores a 0,02 mm. Uma maneira de classificar solo texturalmente é utilizando o Triângulo Textural do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, o qual também é adotado pela ABNT, no Brasil.

Para Cabello (1996), dentre os componentes que compõem a textura do solo, as argilas se destacam por apresentar alta capacidade de retenção de água. Este fenômeno está relacionado à maior superfície de contato apresentada por estas partículas, quando comparada com as das demais partículas minerais do solo.

O teor de matéria orgânica e a composição da solução do solo também podem afetar a retenção de água. A matéria orgânica tem um efeito direto devido



à sua natureza, na maioria dos casos hidrófila e indireto, pela modificação da estrutura, como agente cimentante.

A estrutura do solo é o arranjo das partículas sólidas individuais (areia, silte, argila) em agregados naturais, que são separados entre si por planos de fraqueza. Segundo Libardi (1999), a porosidade do solo pode ser utilizada para definir qualitativamente essa estrutura.

Da interação destes atributos têm-se os solos com as várias características físicas, interferindo assim na disponibilidade de água e, conseqüentemente, na irrigação.

2.7 Estatística clássica e geoestatística

Segundo Webster & Oliveira (1990), muitas propriedades do solo variam continuamente no espaço. Conseqüentemente, os valores em locais mais próximos entre si são mais semelhantes, até um determinado limite, correspondente ao domínio destas propriedades. Caso isso ocorra, os dados não podem ser tratados como independentes e um tratamento estatístico mais adequado será necessário.

A variabilidade espacial do solo pode ser agrupada em duas categorias: sistemática e ao acaso. A variabilidade sistemática se caracteriza por uma mudança explicada dos atributos do solo em função das formas da paisagem, elementos geomórficos, fatores de formação e ou interação desses aspectos; já a variabilidade ao acaso constitui-se nas mudanças dos atributos do solo que não podem ser relacionadas a uma causa conhecida, podendo ser decorrente da litologia, intensidade diferencial do intemperismo, erosão, fatores biológicos, hidrologia diferencial, erros analíticos e amostrais (Sales, 1992).

Segundo Trangmar et al. (1985), a estatística clássica assume que o valor médio de uma propriedade do solo, em uma região amostrada, é igual ao valor da esperança em qualquer ponto dentro da região, com um erro de

estimativa correspondente à variância dos dados amostrais. Isto corresponde a assumir que a variabilidade em torno da média é aleatória e independente da posição espacial dos valores amostrais.

Krige, em 1951, trabalhando com dados de concentração de ouro, concluiu que somente a informação dada pela variância seria insuficiente para explicar o fenômeno em estudo. Para tal, seria necessário levar em consideração à distância entre as amostras. A partir daí, surgem os conceitos da geoestatística, que levam em consideração a localização geográfica e a dependência espacial (Vieira, 2000).

Considerando-se a dependência espacial, observa-se que as propriedades naturais da superfície terrestre são espacialmente contínuas, sendo restritivo, para a maioria dos casos, descrevê-las por meio de simples funções matemáticas. Modelos inferenciais para este objetivo vêm sendo propostos. A krigagem, que será detalhada mais à frente, é um desses modelos e sua base conceitual está fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas, formalizada por Matheron (1963 e 1971) a partir dos fundamentos da geoestatística e inspirada nos trabalhos de Krige (Vieira 2000).

Segundo Journel & Huijbregts (1978), uma variável regionalizada é uma variável aleatória que assume diferentes valores em função da posição dentro de uma certa região. Ao conjunto de variáveis aleatórias dá-se o nome de função aleatória (ou processo aleatório, ou campo aleatório, ou processo estocástico). Para esses autores, esta teoria consolida o alicerce da geoestatística.

Segundo Burrough (1987), a variação espacial de uma variável regionalizada pode ser expressa pela soma de três componentes: a) uma componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante; b) uma componente aleatória, espacialmente correlacionada e c) um ruído aleatório ou erro residual. Se x representa uma posição em uma, duas ou três dimensões, então o valor da variável Z , em x , é dada por:

$$Z(x) = m(x) + \varepsilon'(x) + \varepsilon'' \quad (1)$$

em que:

$m(x)$ é uma função determinística que descreve a componente estrutural de Z em x ;

$\varepsilon'(x)$ é um termo estocástico, que varia localmente;

ε'' é um ruído aleatório não correlacionado, com distribuição normal, média zero e variância σ^2 .

2.7.1 Hipóteses consideradas

Para o estudo da dependência espacial de uma variável aleatória, devem ser observadas algumas hipóteses, como as de estacionariedade e intrínseca.

Uma variável regionalizada é estacionária se os momentos estatísticos da variável aleatória $Z(x_i+h)$ forem os mesmos para qualquer vetor h . De acordo com o número k de momentos estatísticos que são constantes, a variável é chamada de estacionária de ordem k (Vieira, 2000).

Uma variável aleatória é estacionária de 1ª ordem se:

$E\{Z(x_i)\} = m$, para qualquer x_i dentro da área S , em que m é estimada pela média dos valores amostrais.

Decorre desta definição que, se for tomado um vetor h de separação entre dois pontos, o qual apresenta módulo e direção, para qualquer h , tem-se:

$$E[Z(x_i) - Z(x_i+h)] = 0 \quad (2)$$

Segundo Journel & Huijbregts (1978), admite-se também que a função aleatória considerada seja estacionária de segunda ordem, isto é, a covariância

entre dois pares quaisquer $Z(x)$ e $Z(x+h)$, separados por um vetor de distância h , existe e depende somente de h .

Então:

$$C(h) = \text{Cov} [Z(x), Z(x+h)] = E[Z(x).Z(x+h)] - m^2, \forall x; \quad (3)$$

Segundo Vieira (2000), esta hipótese implica na existência de uma variância finita dos valores medidos. Esta hipótese pode não ser satisfatória para alguns fenômenos físicos que têm uma capacidade infinita de dispersão.

A estacionariedade da covariância também implica na estacionariedade do variograma:

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x)-Z(x+h)]^2\} \quad (4)$$

em que $2\gamma(h)$ é definido na geoestatística como função variograma.

Para Vieira et al. (1983), em fenômenos nos quais a variância é infinita, a geoestatística pode adotar uma hipótese de estacionariedade menos restritiva denominada intrínseca, que requer apenas a existência e estacionariedade do variograma, que pode ser aplicada e definida por:

$$E[Z(x)] = m(x) = m, \forall x \quad (5)$$

A variância das diferenças, sendo finita e dependente somente do vetor distância h , é definida por Journel & Huijbregts (1978) como:

$$\text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] = E\{[Z(x)-Z(x+h)]^2\} = 2\gamma(h) \quad (6)$$

Dentro da hipótese de estacionariedade de segunda ordem, a covariância e a semivariância são ferramentas equivalentes para caracterizar a autocorrelação entre duas variáveis. Porém, segundo Braga (1990), existem duas principais vantagens do semivariograma em relação ao autocorrelograma:

(1) não necessidade do conhecimento da esperança da função aleatória ($Z(x)$) para o conhecimento da semivariância;

(2) maior abrangência de sua definição, pois incluem-se as funções aleatórias com variância infinita. Portanto, a hipótese de estacionariedade de 2ª ordem não é um pré-requisito básico para o seu uso, levando-se em consideração apenas a hipótese intrínseca, que é menos restritiva.

2.7.2 Semivariograma

O variograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem, que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (Huijbregts, 1975).

Segundo Journel & Huijbregts (1978), como em cada posição x usualmente tem-se apenas uma realização da variável aleatória, apenas um par de valores [$Z(x)$ e $Z(x+h)$] existe para cada posição x . Para contornar este problema, é introduzida a hipótese intrínseca, que torna possível estimar a semivariância $\gamma(h)$ a partir dos dados disponíveis, definindo-se um estimador $\gamma^*(h)$ igual à média aritmética das diferenças quadradas entre dois valores experimentais [$Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$], em todos os pontos separados pela distância h :

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (7)$$

em que:

$N(h)$ é o número de pares de valores medidos, $z(x_i)$ e $z(x_i+h)$, valores separados por um vetor distância h .

O gráfico dos valores assim calculados em função dos valores de h é denominado semivariograma experimental (Isaaks & Srivastava, 1989).

2.7.3 Características dos semivariogramas

O semivariograma $\gamma(h)$ mede a variabilidade das diferenças entre as realizações da variável aleatória de interesse, de tal maneira que, quanto menor a semivariância, menor a variação dessas diferenças. Quando o gráfico do semivariograma é idêntico para qualquer direção de h , caso mais simples e menos freqüente na natureza, ele é chamado de isotrópico. Mas, como na maioria das vezes as variáveis em ciências do solo apresentam um comportamento anisotrópico, é aconselhável analisar o semivariograma nas principais direções: 0° na direção do eixo x ; 90° na direção do eixo y ; 45° e -45° nas duas diagonais; mas, quando os dados forem coletados em transecto, o semivariograma é unidirecional e nada pode ser dito com relação à anisotropia (Vieira, 2000)

A Figura 2 ilustra um semivariograma experimental com as características padrão esperadas de dados de campo, em que as diferenças $\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}$ decrescem à medida que h , distância que os separa, decresce. É esperado que observações mais próximas geograficamente tenham um comportamento mais semelhante entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias. Desta maneira, é esperado que $\gamma(h)$ aumente com a distância h (Oliveira, 1991; Vieira, 2000 e Camargo, 2002).

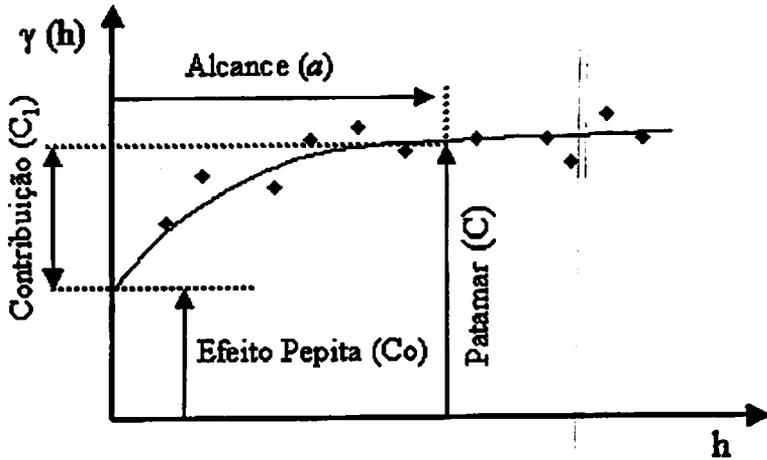


FIGURA 2 Parâmetros característicos de um semivariograma. Lavras, MG, 2004.

Os parâmetros do semivariograma observados na Figura 2 são:

- *alcance* (a): distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente;
- *patamar* (C): é o valor do semivariograma correspondente a seu *alcance* (a). Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras ($\text{Var}[Z(x) - Z(x+h)]$) torna-se invariável com a distância. Segundo Ribeiro Junior (1995), a relação entre a variância da amostra e o patamar do variograma tem causado alguma confusão na literatura; no entanto, se o patamar é claramente presente no gráfico do variograma, seu valor pode ser usado como uma estimativa da variância populacional. Porém, a variância amostral não pode ser usada como uma estimativa do patamar do variograma;
- *efeito pepita* (C_0): idealmente, $\gamma(0)=0$. Entretanto, na prática, à medida que h tende para 0 (zero), $\gamma(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado efeito pepita (C_0), que revela a descontinuidade do semivariograma

para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Para Isaaks & Srivastava (1989), parte desta descontinuidade pode ser também atribuída a erros de medição; no entanto, é impossível quantificar se a maior contribuição provém dos erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem;

- *contribuição* (C_1): é a região onde se observa a estrutura de dependência espacial, definida pela diferença entre o patamar (C) e o efeito pepita (C_0).

2.7.4 Modelos de semivariograma

É importante que o modelo ajustado represente a tendência de $\gamma(h)$ em relação a h . Desse modo, as estimativas obtidas a partir da krigagem serão mais exatas e, portanto, mais confiáveis.

O procedimento de ajuste do semivariograma não é direto e automático, como no caso de uma regressão, por exemplo, mas sim iterativo, pois nesse processo o intérprete faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico aos dados. Nesta fase deve-se verificar a existência de dados anormais ou de tendências na área, as quais possam atrapalhar ou invalidar o modelo ajustado. Segundo Gonçalves (1997), dependendo do ajuste obtido, pode-se ou não redefinir o modelo visualmente aos pontos experimentais, o que carece de sustentação estatística.

Segundo Isaaks & Srivastava (1989) e Vieira (2000), os modelos estão divididos em dois tipos: modelos com patamar e modelos sem patamar. Alguns modelos do primeiro tipo atingem o patamar (C) assintoticamente. Para tais modelos, o alcance (a) é arbitrariamente definido como a distância correspondente a 95% do patamar. Modelos do segundo tipo não atingem o patamar e continuam aumentando enquanto a distância aumenta. Tais modelos são utilizados para modelar fenômenos que possuem capacidade infinita de

dispersão. Os modelos com patamar mais utilizados são: modelo esférico, modelo exponencial e modelo gaussiano.

MODELO ESFÉRICO

O modelo esférico é um dos modelos mais utilizados e, segundo Vieira (2000), sua equação é definida por:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1,5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]; 0 < h < a \quad (8)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1; h \geq a \quad (9)$$

Segundo Vieira (2000), este modelo é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita (C_0) e do patamar (C_0+C_1). Depois, traça-se uma reta que intercepta o eixo y em C_0 e que seja tangente aos primeiros pontos próximos de $h=0$. Essa reta cruzará o patamar à distância $a' = (2/3)a$. Assim, o alcance (a) será $a = (3/2)a'$. O modelo esférico é linear até aproximadamente $(1/3)a$.

MODELO EXPONENCIAL

Um outro modelo bastante utilizado é o exponencial e, segundo Vieira (2000), tem a seguinte definição:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-3 \frac{h}{a} \right) \right]; 0 < h < d \quad (10)$$

em que d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido.

Este modelo atinge o patamar assintoticamente, com o alcance prático definido como a distância na qual o valor do modelo é 95% do patamar (Isaaks & Srivastava, 1989).

MODELO GAUSSIANO

O modelo gaussiano é muitas vezes usado para modelar fenômenos extremamente contínuos (Isaaks & Srivastava, 1989). Segundo Vieira (2000), sua formulação é dada por:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-3 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right) \right]; 0 < h < d \quad (11)$$

Semelhante ao modelo exponencial, o modelo gaussiano atinge o patamar assintoticamente e o parâmetro a é definido como o alcance prático ou distância na qual o valor do modelo é 95% do patamar (Isaaks & Srivastava, 1989). O que caracteriza este modelo é seu comportamento parabólico próximo à origem.

Na Figura 3, observa-se o gráfico dos modelos de semivariograma citados.

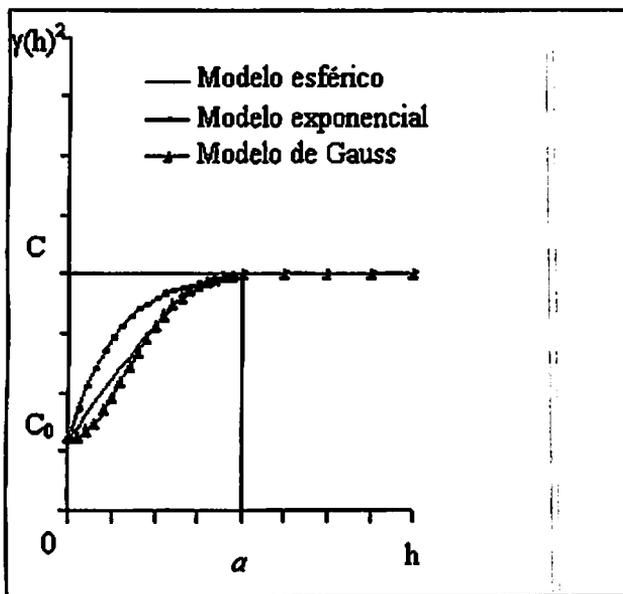
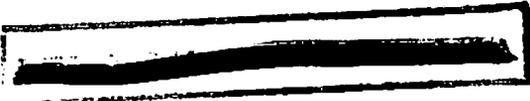


FIGURA 3 Representação gráfica dos principais modelos de semivariograma, segundo Isaaks & Srivastava (1989). Lavras, MG, 2004.

2.8 Krigagem

Os métodos tradicionais de interpolação espacial, como triangulação, média local das amostras e método da distância inversa, estão amplamente disponíveis nos SIGs do mercado. No caso de dados esparsos, no entanto, tais métodos possuem limitações na representação da variabilidade espacial, porque desconsideram a anisotropia e a continuidade do fenômeno que se quer observar (Burrough, 1987).

O termo krigagem ou krigeagem é derivado do nome Daniel G. Krige, que foi o primeiro a introduzir o uso de médias móveis para evitar erros de estimação de reservas de mineração (Delfiner & Delhomme, 1975 e Vieira, 2000). Inicialmente, o método de krigagem foi desenvolvido para solucionar problemas de mapeamentos geológicos, mas seu uso expandiu-se com sucesso



no mapeamento de solos (Burgess & Webster, 1980), mapeamento hidrológico (Kitanidis & Vomvoris, 1983) e outras áreas do campo agrônômico.

A diferença entre a krigagem e outros métodos de interpolação é que na krigagem, os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a krigagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínima (Ribeiro Junior, 1995).

Segundo Camargo (2002), a incorporação de procedimentos geoestatísticos em SIGs, baseados em técnicas de krigagem, é importante, porque essa associação melhora os procedimentos tradicionais de tais sistemas devido à qualidade do estimador e, principalmente, pela informação de acurácia fornecida nesse modelo inferencial.

2.9 Grau de dependência espacial

Segundo Vieira (2000), quanto menor for o efeito pepita do semivariograma, menor será a variância da estimativa. Mais precisamente, quanto maior for a diferença do patamar em relação ao efeito pepita no semivariograma, maior a continuidade do fenômeno, menor a variância da estimativa, ou seja, maior a confiança que se pode ter na estimativa. A própria intuição poderia levar a esperar tal comportamento, pois, se uma propriedade estudada varia grandemente entre locais medidos, então não é de se esperar grande confiança na estimativa, como também poderia acontecer se esse valor fosse medido, pois a variabilidade é grande.

O grau de dependência espacial, também chamado de proporção espacial por alguns autores, determina quanto da variância espacial está presente na variância total da amostra e, segundo Zimback (2001), é representada pela seguinte expressão:

$$GD = \frac{C_1}{C_0 + C_1} * 100 \quad (12)$$

em que:

GD = grau de dependência espacial;

C_0 = efeito pepita;

C_1 = contribuição.

Zimback (2001), adaptando a classificação de Cambardella et al. (1994) para atributos do solo, considera grau de dependência fraco, moderado e forte, os valores $GD < 25\%$; $25\% \leq GD \leq 75\%$ e $GD > 75\%$, respectivamente.

O grau de dependência dá idéia da continuidade do fenômeno. Assim, quanto maior a proporção da contribuição para o patamar, maior será a continuidade do fenômeno.

2.10 Autovalidação

A autovalidação é um procedimento utilizado na geoestatística para avaliar as incertezas sobre o erro da estimativa feita por meio dos parâmetros ajustados nos modelos. Esse procedimento, segundo Vieira (2000), envolve a estimativa de cada ponto medido, “fazendo de conta” que ele não existe, durante a sua estimativa. Há necessidade absoluta de se “fazer de conta” que o valor que está sendo estimado não existe, porque, senão, a solução do sistema de krigagem fornecerá o peso associado a ele com valor unitário ($\lambda=1$) e todos os outros pesos iguais a zero. A razão para isso é que a krigagem é um interpolador exato, passando exatamente pelo ponto medido, quando este é usado no cálculo. Porém, quando se “faz de conta” que o valor não existe, ele será estimado normalmente como se fosse ponto perdido, levando em conta a variabilidade espacial local expressa nas primeiras distâncias no semivariograma.

Segundo Vieira (2000), as condições de não-tendência e de variância mínima requeridas na krigagem, tornam a autovalidação uma ferramenta valiosa e de fácil uso nas aplicações de geoestatística. O fato de terem valores ideais fixos de média do erro reduzido e variância do erro reduzido em 0 (zero) e 1 (um) e de serem expressos em número de desvios padrão da estimativa facilita o seu julgamento e estudo, bem como permite a sua comparação com outras situações expressas em unidades diferentes.

2.11 Usos da geoestatística para atributos físico-hídricos do solo

A variabilidade espacial de algumas características do solo tem sido uma das preocupações de pesquisadores já há algum tempo. Nielsen et al. (1973) concluíram que para os atributos argila, areia, densidade do solo e teor de água, os dados apresentam uma distribuição normal, enquanto que para condutividade hidráulica mostram distribuição log-normal.

Vários trabalhos confirmam a distribuição normal para os dados de densidade do solo (Coelho, 1974; Cassel & Bauer, 1975), granulometria e teor de água na saturação (Gumaa, 1978). Silva (1988) encontrou distribuição normal para porosidade total na camada de 25cm e Anderson & Cassel (1986) também confirmaram distribuição log-normal para condutividade hidráulica.

A retenção de água no solo também tem sido estudada com relação ao número de amostras necessárias para sua avaliação, por Rogowski (1972), Cassel & Bauer (1975), Gajem et al. (1981) e Greminger et al. (1985).

A relação entre os atributos físico-hídricos foi estudada por Prevedello (1987), Ribeiro Junior (1995), Guimarães (1993), Guimarães (2000), Takeda (2000), Eguchi (2001) e Roque (2003).

Silva (1988), estudando a variabilidade espacial da água disponível, notou um aumento excessivo na variabilidade quando se compõem valores para obter um terceiro, no caso a CC e PMP, para obter água disponível.

A estrutura de dependência espacial para teor de água no solo foi observada por Valclín et al. (1983) para a tensão de 33 kPa, por Reichardt (1985) para três usos distintos do solo, medidos com sonda de nêutrons, por Gonçalves (1997) para 8 tensões da curva de retenção e por Batista (2002) em irrigação por gotejamento sob cultivo protegido.

A estrutura de dependência espacial para armazenamento de água no solo foi observada por Carvalho et al. (1992), estudando um Latossolo Vermelho-Amarelo nas tensões de 10, 33 e 1500 kPa, por Folegatti (1996), estudando um solo siltoso e por Fietz (1998), estudando um Latossolo Roxo álico epieutrófico muito argiloso, para 6 tensões da curva característica de retenção.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização da área experimental

As áreas estudadas estão localizadas próximo ao Departamento de Agricultura, no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), no município de Lavras, MG, a 21°14' de latitude Sul e a 45°00' de longitude Oeste de Greenwich, com altitude média de 918 m, ao sul do Estado de Minas Gerais. O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é Cwa, com chuvas irregularmente distribuídas ao longo do ano, havendo excesso de água nos meses de novembro a março e deficiência no período de abril a agosto (Villela & Ramalho, 1981).

3.2 Características das áreas experimentais

A área em estudo foi subdividida em três áreas experimentais, com dimensões de 20 x 100 m, considerando as direções leste/oeste e norte/sul, respectivamente. A área útil de amostragem foi de 15 x 95 m, sendo considerada uma bordadura lateral de 2,5 m. As áreas situam-se uma ao lado da outra (Figura 7) e apresentam as seguintes características:

- Área 1 – localizada na parte superior do terreno, com 1,07% de declividade na direção sul-norte e 6,03% na direção leste-oeste. Esta área encontrava-se com mato nativo, em pousio, há 2 anos (Figura 4). A última intervenção no solo desta área foi uma aração e uma gradagem, porém, sem instalação de cultura;

- Área 2 – situada na parte intermediária do terreno, apresenta 1,9% de declividade na direção sul-norte e 7,6% na direção leste-oeste. Esta área foi recentemente plantada com café (Figura 5), sofrendo os seguintes tratamentos culturais: uma aração, uma gradagem, um sulcamento, uma passagem de trator

com carreta para distribuição de adubo e uma passagem de trator para fechar os sulcos, além do pisoteio no processo de plantio;

- Área 3 – encontra-se na parte inferior do terreno e apresenta 0,72% de declividade na direção sul-norte e 11,37% na direção leste-oeste. Esta área encontrava-se plantada com café há 3 anos, bem conduzido (Figura 6), com colheita manual e o único trato cultural mecanizado é a passagem de enxada rotativa nas entrelinhas uma vez por ano.

As declividades das áreas foram obtidas com auxílio do nível de engenheiro.

O solo das três áreas em estudo é o Latossolo Vermelho distroférico, segundo classificação da Embrapa (1999).



FIGURA 4 Vista da Área 1, com mato nativo em pousio há 2 anos. Lavras, MG, 2004.



FIGURA 5 Vista da Área 2, recentemente plantada com café. Lavras, MG, 2004.

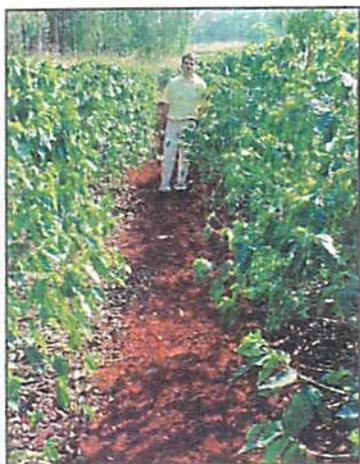


FIGURA 6 Vista da Área 3, cultivada com café há 3 anos. Lavras-MG, 2004.

3.3 Plano amostral ✓

A amostragem foi realizada em forma de malha retangular com espaçamentos variando entre 5 e 10 m. Em algumas seções, esse espaçamento foi reduzido para 1 m (Figura 7), com o objetivo de minimizar o efeito pepita dos semivariogramas, conforme recomendação de Ribeiro Junior (1995). No total, foram coletadas 188 amostras.

A escolha do formato retangular para as áreas teve como propósito aumentar o comprimento da área em estudo, evitando uma possível falha no ajuste do modelo do semivariograma, quando os mesmos, para alguns atributos estudados, poderiam não atingir o patamar, fato este evidenciado por Sales (1992), Carvalho (1991) e Machado (1994), entre outros.

Para cada ponto, à profundidade de 0 – 0,30 m, foram realizadas coletas de amostras deformadas (para análise de areia, silte, argila e densidade de partículas) e indeformadas com cilindro de Uhland (para análise de água disponível, porosidade drenável e densidade global), seguindo os procedimentos para cada atributo, segundo recomendações de Ferreira et al. (2000).

3.4 Procedimentos de análise dos atributos

As amostras indeformadas foram levadas ao Laboratório de Relação Água Solo Planta do Departamento de Engenharia da UFLA, onde foram determinados água disponível, porosidade drenável e densidade global. As amostras deformadas foram levadas ao Laboratório de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo da UFLA, onde foram analisados os atributos densidade de partículas, areia, silte e argila.

Os procedimentos seguidos pelas análises são descritos a seguir.

3.4.1 Densidade global

Para determinação da densidade global foi utilizado o Método do Anel Volumétrico, conforme metodologia descrita por Blake (1986), obtendo-se amostras de volume conhecido, através do cilindro de Uhland. Após serem coletadas, as amostras foram secadas em estufa à temperatura de 105°C, durante 24 horas. A densidade global foi calculada pela relação entre a massa seca da amostra e o volume do anel.

$$Dg = \frac{m_s}{V} \quad (13)$$

em que:

Dg = densidade global (g cm^{-3});

m_s = massa de solo seco em estufa (g);

V = volume do anel (cm^3).

3.4.2 Densidade de partículas ✓

A densidade de partículas foi determinada pelo Método do Balão Volumétrico, por meio da relação entre a massa de solo seco e o volume de sólidos. Foi utilizado um balão de 50 mL com 20 g de terra fina seca em estufa (TFSE), cujo volume foi completado com álcool etílico, obtendo-se o volume de sólidos pela diferença entre o volume do balão e o volume gasto de álcool (Dias Junior, 2000). Assim, os valores de densidades de partículas foram obtidos pela seguinte relação:

$$Dp = \frac{m_s}{V_s} \quad (14)$$

em que:

Dp = densidade de partículas (g cm^{-3})

m_s = massa de solo seco em estufa (g)

V_s = volume de sólidos (cm^3)

3.4.3 Textura ✓

As análises granulométricas das amostras foram realizadas pelo Método da Pipeta, descrito por Day (1965), que trabalha com fração areia separada em tamiz de 0,053 mm e com secagem em estufa da suspensão de argila coletada

com pipeta, descontada a quantidade de hidróxido de sódio presente na amostra. A fração silte foi obtida pela diferença entre os valores de areia e argila determinados.

3.4.4 Água disponível ✓

A tensão adotada como capacidade de campo foi 6 kPa, pois, segundo Ferreira (1980), é a que melhor representa a capacidade de campo para a classe de solo em estudo. Para o ponto de murcha permanente adotou-se o valor convencional 1.500 kPa.

Para a obtenção do teor de água na tensão de 6 kPa foi utilizado o funil de placa porosa de Haines e para tensão de 1.500 kPa utilizou-se o extrator de Richards.

A água disponível para as plantas foi obtida pela seguinte expressão:

$$AD = \frac{(CC - PMP) * Dg * Pe}{10} \quad (15)$$

em que:

AD = água disponível para as plantas, em mm;

CC = capacidade de campo, % em peso;

PMP = ponto de murcha permanente, % em peso;

Dg = densidade global, em g cm⁻³;

Pe = espessura da camada amostrada, em cm (considerada 30cm).

3.4.5 Porosidade drenável ✓

Para determinação da porosidade drenável, também denominada de porosidade de aeração por alguns autores, foi considerada como limite inferior a

umidade na capacidade de campo (tensão de 6 kPa) e, como limite superior, a umidade de saturação.

A determinação das umidades seguiu a mesma metodologia citada para água disponível.

A porosidade drenável foi obtida pela seguinte expressão:

$$PD = (\theta_s - \theta_{cc}) * 100 \quad (16)$$

em que:

PD = porosidade drenável %;

θ_s = umidade na saturação, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_{cc} = umidade na capacidade de campo, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

3.5 Análise dos dados

Os dados foram analisados através da estatística clássica (estatística descritiva), com uso do software Sisvar 4.3 e da geoestatística (análise espacial), com uso do software GeoR 1.2-5.

3.5.1 Análise descritiva (estatística clássica)

A análise descritiva dos atributos em estudo visou avaliar as medidas de posição (média, mediana e a moda), de dispersão (amplitude total, variância, desvio padrão e o coeficiente de variação) e a normalidade (coeficientes de assimetria e curtose). Foram obtidos também os valores mínimos e máximos dos dados para cada atributo.

Os cálculos estatísticos seguiram as seguintes expressões:

- Média (\bar{X})

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (17)$$

em que:

\bar{X} é a média amostral;

x_i é o valor da i -ésima observação;

n é o tamanho da amostra.

- Moda (Mod)

Mod = valor mais freqüente

- Mediana (Md)

$$Md = \frac{1}{2} [x_k + x_{k+1}] \quad (18)$$

em que:

Md é a mediana;

x_k e x_{k+1} é o intervalo que contém o ponto mediano dos dados ordenados.

- Amplitude (A)

$$A = x_{\max} - x_{\min} \quad (19)$$

em que:

A é a amplitude total dos dados;

x_{\max} e x_{\min} correspondem aos valores máximos e mínimos dos dados.

- Variância (s^2)

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (20)$$

- Desvio padrão (s)

$$s = \sqrt{s^2} \quad (21)$$

- Coeficiente de variação (CV)

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} \cdot 100 \quad (22)$$

- Coeficiente de assimetria (Ass)

$$Ass = \frac{m_3}{m_2 \sqrt{m_2}} \quad (23)$$

em que:

$$m_t = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^t}{n} \quad \text{com } t = 1, 2, 3, \dots \quad (24)$$

- Coeficiente de curtose (Curt.)

$$Curt. = \frac{m_4}{m_2^2} \quad (25)$$

- Coeficiente de correlação

A correlação mede a intensidade e direção da relação linear entre duas variáveis quantitativas e varia de -1 (máxima correlação inversa) a $+1$ (máxima correlação direta), sendo 0 a ausência de correlação. A análise foi realizada por meio do programa Excel 2000.

Para fins de comparação e discussão, foram adotados os limites de coeficiente de variação (CV) propostos por Warrick & Nielsen (1980) para a classificação de variáveis do solo sendo: $CV < 12\%$; $12\% < CV < 60\%$ e $CV > 60\%$, considerados de baixa, média e alta variabilidade, respectivamente.

A análise da distribuição dos dados foi feita com base na seguinte classificação apresentada por Ferreira (1996):

- coeficiente de assimetria = 0; média = mediana = moda (distribuição simétrica);
- coeficiente de assimetria > 0 ; média $>$ mediana $>$ moda (distribuição assimétrica à direita);
- coeficiente de assimetria < 0 ; média $<$ mediana $<$ moda (distribuição assimétrica à esquerda).

3.5.2 Análise geoestatística (espacial)

A geoestatística foi utilizada com o objetivo de definir o modelo de variabilidade espacial e, com isso, conhecer a dependência espacial dos atributos físico-hídricos envolvidos na pesquisa.

Para avaliar se os dados apresentavam valores discrepantes, tendências ou subáreas dentro das áreas experimentais que anulassem a hipótese intrínseca, foram utilizadas algumas ferramentas disponíveis no programa GeoR, como gráficos “box-plot”, histogramas, “postplot” e gráficos de distribuição de valores por coordenadas, seguindo metodologia detalhada por Ribeiro Junior (1995).

A análise da dependência espacial foi feita por meio de semivariogramas, cuja representação dos modelos é feita através da semivariância em função da distância $\gamma(h)$, conforme Equação (7).

O modelo que melhor se ajustou aos dados foi escolhido por meio da autovalidação, seguindo metodologia detalhada por Vieira (2000), a qual utiliza como critério de seleção o modelo que apresentar média do erro reduzido e

variância do erro reduzido o mais próximo de 0 (zero) e 1 (um), respectivamente. Após a escolha do melhor modelo obtiveram-se os parâmetros alcance, contribuição e efeito pepita.

Devido às peculiaridades dos modelos gerados, o alcance efetivo da variável (A), segundo Journel & Huijbregts (1978), foi considerado $3a$, sendo “a” o alcance fornecido pelo programa para o modelo Exponencial e $a\sqrt{3}$ para o modelo Gaussiano. Para o modelo esférico, o alcance efetivo utilizado foi o mesmo fornecido pelo programa.

O grau de dependência espacial (GD), que determina quanto da variância espacial está presente na variância total da amostra, foi calculado por meio da Equação 12. Para fins de classificação, foram considerados graus de dependência fraco, moderado e forte, os valores de $GD < 25\%$; $25\% \leq GD \leq 75\%$ e $GD > 75\%$, respectivamente, conforme adaptação de Zimback (2001), à classificação de Cambardella et. al. (1994), para atributos do solo.

Em análises preliminares observou-se uma pequena contribuição à precisão das estimações quando considerada a anisotropia. Assim, as análises espaciais foram realizadas por meio de semivariogramas unidirecionais.

3.5.3 Mapeamento através da krigagem

O método de interpolação utilizado foi a krigagem ordinária pontual que, segundo Webster (1985), é o mais indicado para a amostragem realizada de forma pontual e em malha.

Para melhor visualização e comparação da variabilidade de cada atributo nas áreas em estudo, foram gerados mapas de krigagem, por meio do programa GeoR. Este procedimento por parte do programa consiste numa interpolação dos valores amostrados, a partir dos modelos de semivariogramas ajustados, de modo a formar uma malha regular de $0,5 \times 0,5$ m em toda a área.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise descritiva clássica e análise da variabilidade espacial

Segundo a classificação da USDA, pelos valores texturais médios observados (Tabelas 1, 3 e 5), as áreas 1 e 2 foram classificadas como argilosas e a área 3 como argilosa pesada. A diferença de textura entre as áreas pode estar relacionada com a sua posição topográfica. A área 3, por estar localizada na parte mais baixa, recebe as partículas mais finas transportadas pela ação da água e do vento das partes mais altas do terreno.

Para facilitar a visualização e a comparação entre o uso das áreas, a discussão dos parâmetros das estatísticas descritiva e espacial será feita por atributo.

4.1.1 Argila

4.1.1.1 Análise descritiva clássica

Observou-se, em análise exploratória, uma tendência dos valores de argila em diminuir no sentido sul-norte do terreno. Como esta variável sofre pouca influência do manejo (Guimarães, 2000), esta tendência pode estar relacionada com os processos de intemperismo do solo.

Analisando-se a Tabela 1, observa-se, segundo a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980) que, para área 1, o teor de argila é de média variabilidade e para as áreas 2 e 3 é de baixa variabilidade. No caso da área 1, sua posição geográfica no terreno pode estar influenciando este fato, pois a mesma se encontra na parte mais alta e como este atributo é de fácil mobilidade no solo (Correa, 1986), parte destas partículas pode ter sido carregada de forma desuniforme em enxurradas, o que provocaria valores diferentes na área. A

influência da posição no relevo sobre este atributo também foi encontrada por Pocay (2000).

Observa-se, na Tabela 1, que os valores obtidos para média, mediana e moda foram semelhantes entre si, porém, demonstram uma pequena assimetria à esquerda na distribuição dos dados, conforme classificação de Ferreira (1996), para as três áreas em estudo. Os valores observados de assimetria e curtose, próximos de 0 e 3, respectivamente, demonstram um comportamento próximo da distribuição normal para as três áreas. A normalidade para este atributo também foi encontrada por Gonçalves & Folegatti (1995), trabalhando com Terra Roxa Estruturada.

TABELA 1 Estatística descritiva, referente ao atributo argila. Lavras, MG, 2004.

Parâmetros estatísticos	Áreas estudadas		
	A1	A2	A3
Número de pontos	63	63	62
Média	59,8893	58,0444	62,6543
Variância	54,4246	37,6334	35,1264
Desvio padrão	7,37730	6,13460	5,92675
Coefficiente variação	12,3182	10,5688	9,45945
Coef. de assimetria	-0,2397	-0,7445	-0,5954
Coef. de curtose	2,22356	2,63159	2,42517
Mínimo	44,3520	41,7270	48,4680
Máximo	74,1400	66,2060	71,7050
Amplitude total	29,7880	24,4790	23,2370
Mediana	60,4044	59,3944	63,9206
Moda	62,2248	60,9605	65,3148

Valores em percentagem (%).

Os valores de coeficientes de variação (CV) encontrados neste trabalho são menores que os observados por Correa (1986), para esta mesma classe de solo (18,4% e 15,5%) e maiores que os observados por Libardi et al. (1986), para Terra Roxa Estruturada (7,3%) e Silva (1988), para solo argiloso (5%).

4.1.1.2 Análise da variabilidade espacial

Para o atributo argila, foi encontrada dependência espacial entre os dados amostrados nas três áreas em estudo, como pode ser observado na Figura 8, por meio do ajuste dos semivariogramas. A tendência dos dados diminuírem no sentido sul-norte para as áreas 1 e 3, foi corrigida por meio de rotinas do programa GeoR, por um modelo de primeiro grau, uma vez que a mesma estava afetando o semivariograma, aumentando o alcance e a contribuição. Segundo Ribeiro Junior (1995), esse comportamento é incompatível com a hipótese intrínseca e a não retirada desta tendência leva a interpretações inadequadas que comprometem e talvez invalidem toda a análise. Para avaliar a eficiência do procedimento de retirada de tendência, seguiu-se a metodologia de confecção e interpretação gráfica, exposta por Ribeiro Junior (1995). Os semivariogramas demonstrados na Figura 8 (A1 e A3) são dos dados com correção de tendência.

Analisando a Tabela 2, observa-se que o modelo de semivariograma ajustado para as três áreas foi o Gaussiano. O maior alcance encontrado foi para a área 2, seguida das áreas 3 e 1. Segundo classificação de Zimback (2001), as três áreas apresentaram um grau de dependência espacial moderado, porém, a área 2 foi a que apresentou um maior grau de dependência, seguida pelas áreas 1 e 3. A explicação para a variação das características dos semivariogramas de uma área para outra segue as mesmas já comentadas para variabilidade da estatística clássica, sendo também observada por Pocay (2000).

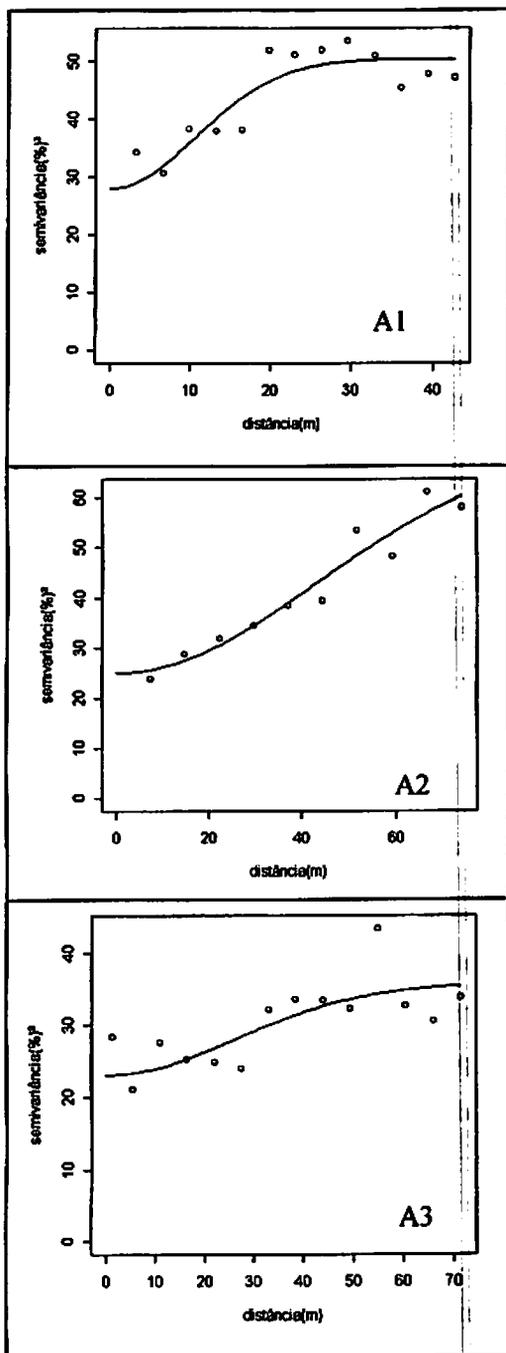


FIGURA 8 Semivariogramas para argila, nas áreas 1, 2 e 3, com correção de tendência em A1 e A3. Lavras, MG, 2004.

TABELA 2 Parâmetros dos semivariogramas ajustados para o atributo argila. Lavras, MG, 2004.

Parâmetro	Área 1	Área 2	Área 3
Modelo	Gaussiano ⁿ	Gaussiano	Gaussiano ⁿ
C₀	28,0243	24,9990	23,0447
C₁	22,3700	46,2981	12,7092
A	25,7904	106,6323	64,1094
GD	44,39	64,94	35,55

C₀ – efeito pepita; C₁ – contribuição; A – alcance (m); GD - grau de dependência (%) e ⁿ – semivariograma com retirada de tendência.

A variação do alcance encontrada para o atributo argila entre as áreas também pode ser observada na literatura. Gonçalves & Folegatti (1995), trabalhando com Terra Roxa Estruturada encontraram um alcance de 30m; Libardi (1986), também para Terra Roxa Estruturada encontrou um alcance de 15m e Folegatti (1996), para um solo siltoso, encontrou alcance de 10m.

4.1.2 Areia

4.1.2.1 Análise descritiva clássica

Observa-se, na Tabela 3, que os valores obtidos para média, mediana e moda foram próximos entre si, porém, demonstram uma certa assimetria à direita na distribuição dos dados, para as três áreas em estudo, conforme classificação proposta por Ferreira (1996). Os dados possuem um comportamento próximo da distribuição normal, com coeficiente de curtose próximo de 3 e coeficiente de assimetria afastando-se um pouco de zero. A normalidade para este atributo também foi citada por Gonçalves & Folegatti (1995), trabalhando com Terra Roxa Estruturada.

O deslocamento na distribuição de dados, segundo Ribeiro Junior (1995), geralmente é causado por sub-regiões de dados atípicos dentro da área. Essas sub-regiões podem ser observadas no item krigagem (4.3).

TABELA 3 Estatística descritiva, referente ao atributo areia. Lavras, MG, 2004.

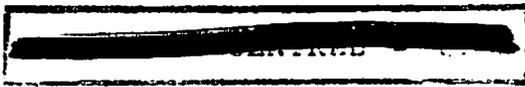
Parâmetros estatísticos	Áreas estudadas		
	A1	A2	A3
Número de pontos	63	63	62
Média	16,6286	18,6568	17,8343
Variância	11,3481	22,8917	14,2985
Desvio padrão	3,36869	4,78452	3,78134
Coefficiente variação	20,2584	25,6450	21,2027
Coef. de assimetria	0,98391	0,74520	0,94043
Coef. de curtose	2,75710	2,78254	2,74828
Mínimo	12,4970	12,0690	13,1220
Máximo	24,9420	31,9150	27,3960
Amplitude total	12,4450	19,8460	14,2740
Mediana	15,9972	17,7639	17,0474
Moda	15,3337	16,5107	16,4229

Valores em percentagem (%).

Segundo Corrêa (1986), esse atributo é de pouca mobilidade no solo, no entanto, a textura de um solo pode mudar de ponto para ponto, dependendo do material de origem, bioclima, atividade biológica e posição do solo na paisagem. Segundo Guimarães (2000), a variação deste atributo é pouco influenciada pelo manejo do solo.

Segundo a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980), a variabilidade deste atributo, nas três áreas estudadas, é considerada média.

Os valores de CV encontrados neste trabalho são menores que os observados por Correa (1986) para a mesma classe de solo em estudo (38,9% e 39,6%) e maiores que os observados por Libardi (1986), para Terra Roxa Estruturada (9,8%) e Silva (1988), para solo argiloso (11,5%).



4.1.2.2 Análise da variabilidade espacial

Para o atributo areia, foi encontrada estrutura de dependência espacial entre os dados amostrados nas três áreas em estudo, como pode ser observado na Figura 9. A tendência dos dados aumentarem no sentido sul-norte, para as três áreas, foi corrigida por meio de rotinas do programa GeoR, por um modelo de primeiro grau, uma vez que a mesma estava afetando o semivariograma e anulando a hipótese intrínseca como já comentado para o atributo argila. Os semivariogramas demonstrados na Figura 9 são dos dados com correção de tendência.

A inexistência de relação entre o manejo e a variabilidade deste atributo segue a mesma discussão feita para argila.

Observa-se, na Tabela 4, que, para as áreas 1 e 2, o modelo de semivariograma ajustado foi o Gaussiano e para a área 3 o Esférico, sendo que o maior alcance foi para a área 3, seguida das áreas 2 e 1. Segundo classificação proposta por Zimback (2001), para as áreas 1 e 2 o grau de dependência espacial do teor de areia é moderado e para a área 3, forte.

Para área 3, cujo alcance apresentou um valor muito superior ao maior comprimento da área amostrada, seria recomendável a realização de amostragem a uma distância maior, para a obtenção dos verdadeiros valores de alcance e contribuição, aqui estimados pelo modelo.

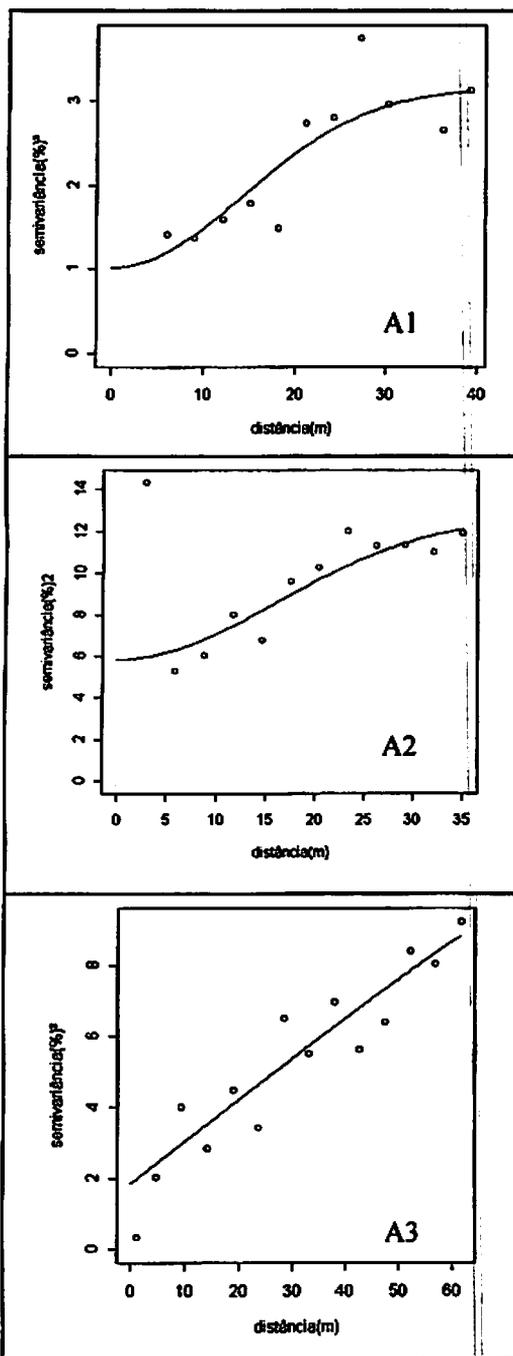


FIGURA 9 Semivariogramas para areia, nas áreas 1, 2 e 3, com correção de tendência para as três áreas. Lavras, MG, 2004.

TABELA 4 Parâmetros dos semivariogramas ajustados para o atributo areia. Lavras, MG, 2004.

Parâmetro	Área 1	Área 2	Área 3
Modelo	Gaussiano ⁿ	Gaussiano ⁿ	Esférico ⁿ
C₀	1,0169	5,8348	1,8655
C₁	2,1391	6,8784	13,4442
A	34,4785	38,9862	295,1534
GD	67,78	54,10	87,81

C₀ – efeito pepita; C₁ – contribuição; A – alcance (m); GD - grau de dependência (%) e ⁿ – semivariograma com retirada de tendência.

Os alcances observados na literatura, para este atributo, são menores que os encontrados neste trabalho. Gonçalves & Folegatti (1995), trabalhando com Terra Roxa Estruturada, encontraram um alcance de 30 m e Libardi et al. (1986), também para Terra Roxa Estruturada, encontraram alcance de 10 m para este atributo.

4.1.3 Silte

4.1.3.1 Análise descritiva clássica

Segundo a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980) e de acordo com a Tabela 5, o atributo silte possui média variabilidade para as três áreas em estudo. Esta variabilidade pode estar relacionada com o processo de determinação deste atributo, que considera como percentagem de silte a diferença entre a soma das percentagens de areia e argila e os 100% da amostra de solo. Assim, parte da variabilidade existente nos dados dos atributos areia e argila é incorporada aos dados do atributo silte. Este fato também foi observado por Roque (2003) e Silva (1988).

Um outro fator que pode estar influenciando é o efeito da matéria orgânica na dispersão do silte, como observado também por Correa (1986), pois, apesar de não ter sido realizada análise de matéria orgânica do solo, visualmente

observou-se uma maior cobertura vegetal e de palhada nas áreas 3, 1 e 2, respectivamente.

TABELA 5 Estatística descritiva, referente ao atributo silte. Lavras, MG, 2004.

Parâmetros estatísticos	Áreas estudadas		
	A1	A2	A3
Número de pontos	63	63	62
Média	23,4819	23,2987	19,5114
Variância	39,3756	20,8071	34,9748
Desvio padrão	6,27500	4,56148	5,91395
Coefficiente variação	26,7227	19,5782	30,3103
Coef. de assimetria	0,34999	-0,4456	0,36617
Coef. de curtose	2,02505	3,75207	2,79441
Mínimo	12,4190	11,7960	7,73200
Máximo	37,3870	34,4780	33,4890
Amplitude total	24,9680	22,6820	25,7570
Mediana	22,4062	23,7418	18,8934
Moda	20,3255	23,9246	18,2329

Valores em percentagem (%).

Os valores do atributo silte apresentaram uma tendência de decréscimo no sentido norte-sul na área 2, comportamento semelhante ao do atributo argila. Como esta variável sofre pouca influência do manejo (Guimarães, 2000), a tendência mencionada é, provavelmente, decorrente do processo de formação do solo.

Segundo Silva et al. (2001), solos com textura dominada pelas frações silte e areia fina são muito suscetíveis à erosão. Neste contexto a tendência observada para este atributo na área 2 pode estar relacionada à maior declividade desta área no sentido sul-norte do terreno, quando comparada com as demais.

Observa-se, na Tabela 5, que os valores obtidos de média, mediana e moda foram semelhantes entre si, porém, com comportamento diferenciado. As áreas 1 e 3 apresentaram assimetria à direita e a área 2 uma ligeira assimetria à esquerda, conforme classificação proposta por Ferreira (1996). Apesar dos

valores observados de assimetria e curtose afastarem-se um pouco de 0 e 3, respectivamente, os dados demonstram um comportamento próximo da distribuição normal para as três áreas. A normalidade para este atributo também foi citada por Gonçalves & Folegatti (1995), trabalhando com Terra Roxa Estruturada e por Folegatti (1996), trabalhando com solo siltoso.

Os valores de CV encontrados neste trabalho são menores que os citados por Correa (1986), para a mesma classe de solo (67,4% e 44%) e próximos aos encontrados por Libardi et al. (1986), para Terra Roxa Estruturada (19,7%), Moura et al. (1992), para Cambissolos e solos aluviais (24% e 47%) e Silva (1988), para solo argiloso (26%).

4.1.3.2 Análise da variabilidade espacial

Avaliando-se o teor de silte, observa-se dependência espacial entre os dados amostrados para as três áreas em estudo, como pode ser observado na Figura 10. A tendência observada na área 2 foi corrigida por meio de rotinas do programa GeoR, por um modelo de primeiro grau, para atender à exigência de estacionariedade já mencionada. O semivariograma mostrado na Figura 10 (A2) é com os dados sem tendência.

Observa-se na Tabela 6 que, para as três áreas em estudo, o modelo de semivariograma ajustado foi o Gaussiano, sendo que o maior alcance foi para a área 3, seguida das áreas 2 e 1, semelhante ao encontrado para areia. Segundo classificação proposta por Zimback (2001), para as três áreas, o grau de dependência espacial é moderado, sendo que a área 1 foi a que apresentou um maior grau de dependência, seguida pelas áreas 3 e 2.

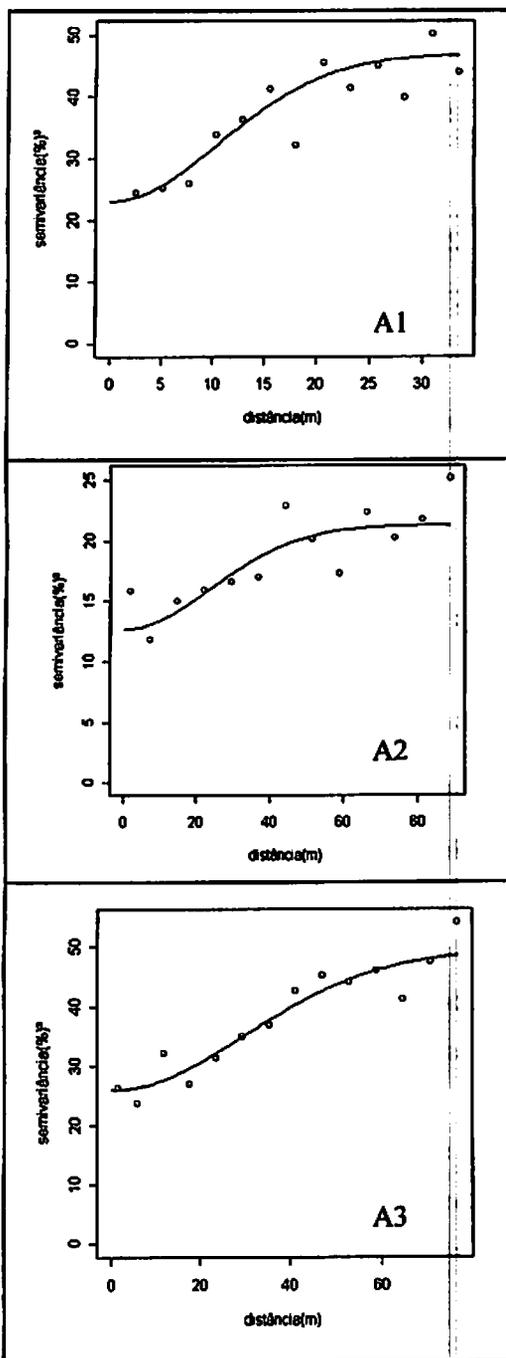


FIGURA 10 Semivariogramas para silte, nas áreas 1, 2 e 3, com correção de tendência para A2. Lavras, MG, 2004.

TABELA 6 Parâmetros dos semivariogramas ajustados para silte. Lavras, MG, 2004.

Parâmetro	Área 1	Área 2	Área 3
Modelo	Gaussiano	Gaussiano ⁿ	Gaussiano
C₀	23,1478	12,6865	25,9376
C₁	23,7070	8,5984	23,5439
A	25,8741	59,0397	73,3584
GD	50,60	40,40	47,58

C₀ – efeito pepita; C₁ – contribuição; A – alcance (m); GD - grau de dependência (%) e ⁿ – semivariograma com retirada de tendência.

A variação com relação ao alcance de silte entre as áreas não se confirmou na literatura consultada. Guimarães (2000), trabalhando com dois sistemas de plantio para um Latossolo Vermelho Escuro encontrou alcance de 40 metros nas duas áreas e Libardi et al. (1986), para Terra Roxa Estruturada, também citam alcance de 40 m para este atributo.

4.1.4 Densidade de partículas

4.1.4.1 Análise descritiva clássica

Observa-se, na Tabela 7, que os valores obtidos para média, mediana e moda foram semelhantes entre si, porém, demonstram uma pequena assimetria à esquerda na distribuição dos dados, conforme classificação de Ferreira (1996), para as três áreas em estudo. Avaliando-se a normalidade dos dados, observa-se que os coeficientes de assimetria aproximaram-se do zero e os de curtose afastaram-se um pouco de três, principalmente para a área 3. Para esta última, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk e encontrou-se um valor de probabilidade menor que 5% (0,00079), confirmando a não normalidade dos dados. Resultado semelhante foi observado por Silva (1988).

TABELA 7 Estatística descritiva, referente ao atributo densidade de partículas. Lavras, MG, 2004.

Parâmetros estatísticos	Áreas estudadas		
	A1	A2	A3
Número de pontos	63	63	62
Média	2,66302	2,66048	2,65129
Variância	0,00322	0,00491	0,00461
Desvio padrão	0,05676	0,07008	0,06791
Coeficiente variação	2,13132	2,63408	2,56130
Coef. de assimetria	-0,4467	-0,1794	-0,0722
Coef. de curtose	2,86741	2,15434	1,75093
Mínimo	2,53000	2,50000	2,53000
Máximo	2,78000	2,78000	2,78000
Amplitude total	0,25000	0,28000	0,25000
Mediana	2,66917	2,66800	2,65946
Moda	2,67875	2,72173	2,70519

Valores em g cm⁻³.

A densidade de partículas é um atributo que raramente sofre influência do manejo do solo, porém, pode ser influenciado pela contribuição dos materiais depositados, vindo com as chuvas ao longo do tempo de áreas localizadas acima no relevo (Roque, 2003). Estando a área 3 na parte inferior do terreno, quando comparada com as demais áreas, é provável que este fato esteja proporcionando o surgimento de subáreas com dados atípicos. Segundo Kiehl (1979), a densidade de partículas está relacionada também com os teores de matéria orgânica no solo e, sendo a área 3 caracterizada por ter uma maior quantidade de plantas, as suas raízes, fatores de grande variabilidade no solo, podem estar influenciando os resultados obtidos.

Segundo a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980), para as três áreas em estudo esse atributo é de baixa variabilidade.

Os valores de CV encontrados neste trabalho são próximos aos citados por Correa (1986), para a mesma classe de solo (5,5% e 4,1%), por Libardi et al.

(1986), para Terra Roxa Estruturada (2,1%) e por Silva (1988), para solo argiloso (5,4%).

4.1.4.2 Análise da variabilidade espacial

Para a densidade de partículas, apenas na área 3 não foi encontrada estrutura de dependência espacial entre os dados amostrados, sendo considerado, neste caso, efeito pepita puro (Figura 11-A3). Segundo Silva (1988), que também observou falta de estrutura de dependência espacial para este atributo, dados com estas características têm uma distribuição completamente aleatória e a única estatística aplicável é a estatística clássica, que considera independência entre as amostras.

Como pode ser observado na Tabela 8, para as áreas 1 e 2, o modelo ajustado foi o Gaussiano, sendo que a área 2 apresentou um maior alcance e grau de dependência espacial. Para área 1, o grau de dependência foi moderado e para área 2, forte, segundo classificação proposta por Zimback (2001).

Para áreas com características semelhantes às encontradas na área 3, propõe-se que sejam realizadas amostragens a distâncias menores que a realizada, para se obter valores mais precisos e fazer qualquer tipo de conclusão a respeito de alcance e grau de dependência espacial. Para áreas com características similares às da área 2, cujos alcances apresentam valores muito altos, quando comparados ao tamanho da área amostrada, propõe-se a realização de amostragens a distâncias maiores, para a obtenção dos verdadeiros valores de alcance e contribuição, aqui estimados pelo modelo.

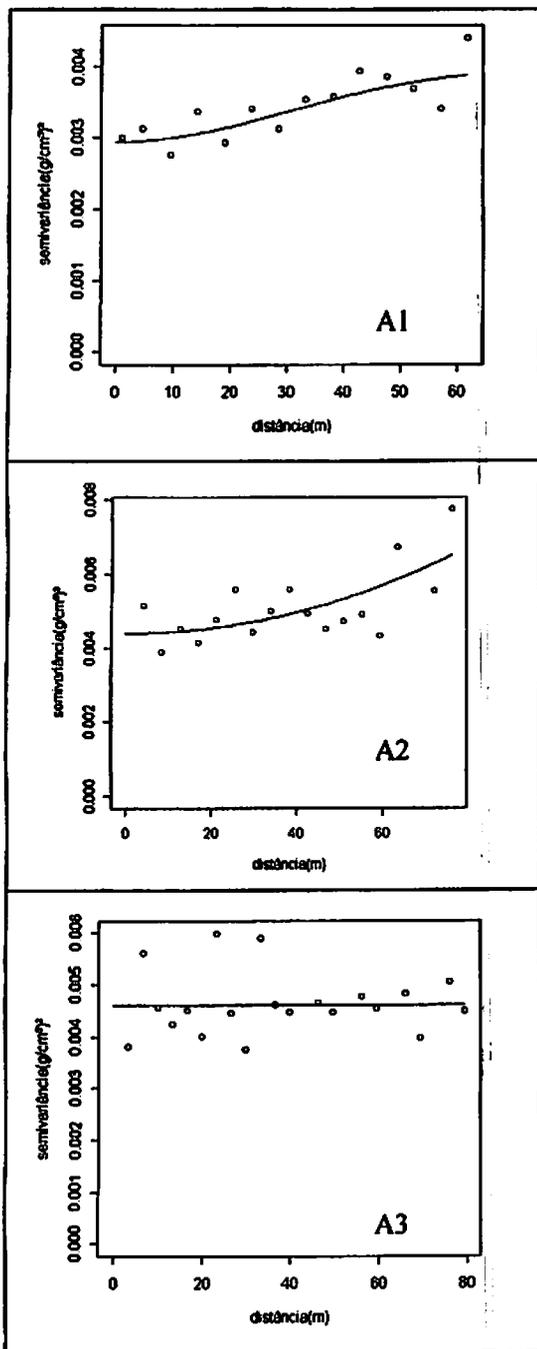


FIGURA 11 Semivariogramas para densidade de partículas, nas áreas 1, 2 e 3, com efeito pepita puro para A3. Lavras, MG, 2004.

TABELA 8 Parâmetros dos semivariogramas ajustados para densidade de partículas. Lavras, MG, 2004.

Parâmetro	Área 1	Área 2	Área 3
Modelo	Gaussiano	Gaussiano	*
C ₀	0,0029	0,0044	*
C ₁	0,001	0,6863	*
A	71,47	1373,65	*
GD	25,64	99,36	*

C₀ – efeito pepita; C₁ – contribuição; A – alcance (m); GD - grau de dependência (%) e * - área sem estrutura de dependência espacial.

Variações grandes com relação ao alcance deste atributo também foram observadas por Roque (2003), para diferentes solos de uma transeção perpendicular a um dreno natural.

4.1.5 Densidade global

4.1.5.1 Análise descritiva clássica

Observa-se, na Tabela 9, que os valores obtidos para média, mediana e moda foram semelhantes entre si, porém, demonstram uma pequena assimetria à esquerda na distribuição dos dados para as áreas 1 e 2 e à direita para a área 3, conforme classificação citada por Ferreira (1996). Os valores observados de assimetria e curtose, próximos de 0 e 3, respectivamente, demonstram um comportamento dos dados próximo da distribuição normal para as três áreas. Resultados semelhantes foram citados por Gonçalves & Folegatti (1995), para Terra Roxa Estruturada e Guimarães (2000), para Latossolo Vermelho Escuro.

TABELA 9 Estatística descritiva, referente ao atributo densidade global. Lavras, MG, 2004.

Parâmetros estatísticos	Áreas estudadas		
	A1	A2	A3
Número de pontos	63	63	62
Média	1,183540	1,286667	1,272661
Variância	0,005458	0,010366	0,003914
Desvio padrão	0,073879	0,101815	0,062562
Coefficiente variação	6,242180	7,913069	4,915878
Coef. de assimetria	-0,314265	-0,498264	0,423170
Coef. de curtose	2,593828	2,440880	2,938740
Mínimo	1,037000	1,056000	1,150000
Máximo	1,329000	1,471000	1,429000
Amplitude total	0,292000	0,415000	0,279000
Mediana	1,197059	1,296263	1,272760
Moda	1,208029	1,332667	1,275550

Valores em g cm⁻³.

Observando os valores médios encontrados, constata-se que as áreas 2 e 3 são mais compactadas que a área 1. Este fato pode ser explicado pelo maior tráfego de máquinas e pessoas nas áreas 2 e 3, o que, segundo Tormena et al. (1998) e Dias Junior (2000), altera as propriedades físicas do solo, aumentando a densidade e reduzindo a porosidade total. Além dos autores citados, o efeito do tráfego no aumento da densidade do solo também foi observado por Voorhees & Lindstrom (1983).

Segundo a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980), para as três áreas em estudo, o atributo densidade do global é de baixa variabilidade.

Os resultados do presente estudo corroboram com os observados por Guimarães (2000) que, trabalhando com um Latossolo Vermelho Escuro, encontrou coeficientes de variação de 6,27% e 7,12% para as áreas com plantio direto e plantio convencional, respectivamente. Correa (1986), para a mesma classe de solo em estudo, encontrou CVs de 10,6% e 8,9% e Silva (1988), para solo argiloso, encontrou CV de 6,3%.

4.1.5.2 Análise da variabilidade espacial

Para densidade global, apenas na área 3 não foi encontrada estrutura de dependência espacial entre os dados amostrados (Figura 12). A falta de estrutura para este atributo também foi observada por Silva (1988), concluindo que dados com estas características têm uma distribuição completamente aleatória e a única estatística aplicável é a estatística clássica. Segundo Journel & Huijbregts (1978), se o semivariograma, em vez de ser crescente e dependente da distância for constante e igual ao patamar para qualquer valor de h , então tem-se um efeito pepita puro ou ausência total de dependência espacial. Isto significa que o alcance para os dados é menor do que o menor espaçamento entre amostras. A falta de dependência espacial para densidade do solo também foi citada por Gonçalves & Folegatti (1995), Folegatti (1996) e Guimarães (2000).

Uma provável explicação para a falta de estrutura de dependência é que em lavouras de café, o pisoteio, fator que influencia diretamente neste atributo, se dá apenas entre as linhas de plantio e as amostras foram retiradas em forma de malha, o que pode ocasionar valores discrepantes a curtas distâncias. Um outro fator de alta variabilidade que também pode ter influenciado é uma maior presença de raízes nesta área, devido ao tamanho das plantas que, por sua vez, segundo Asaky & Smucker (1989), se acumulam na superfície, zona onde foram feitas as amostragens.

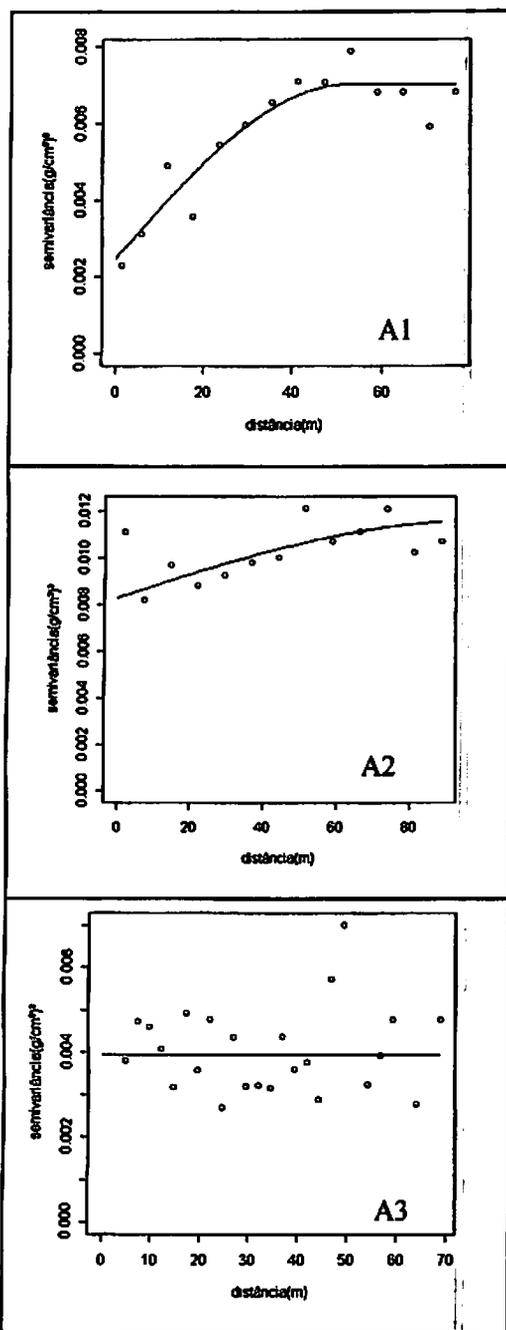


FIGURA 12 Semivariogramas para densidade global, nas áreas 1, 2 e 3, com efeito pepita puro para A3. Lavras, MG, 2004.

Observa-se, na Tabela 10, que o modelo de semivariograma ajustado para as áreas 1 e 2 foi o Esférico, sendo que a área 1 apresentou um menor alcance que a área 2. No entanto, a área 1 apresentou um grau de dependência espacial entre os pontos maior que a área 2. Segundo classificação de Zimback (2001), ambas as áreas apresentaram grau de dependência moderado. O maior grau de dependência da área 1 pode estar relacionado com o menor tráfego de máquinas nesta área o que, segundo Tormena et al. (1998), proporciona uma estabilização das condições físicas do solo, em consequência da maior estruturação, ocasionando nesta área uma menor variabilidade.

TABELA 10 Parâmetros dos semivariogramas ajustados para densidade global. Lavras, MG, 2004.

Parâmetro	Área 1	Área 2	Área 3
Modelo	Esférico	Esférico	*
C₀	0,0025	0,0084	*
C₁	0,0045	0,0032	*
A	51,87	97,81	*
GD	64,29	27,59	*

C₀ – efeito pepita; C₁ – contribuição; A – alcance (m); GD - grau de dependência (%) e * - área sem estrutura de dependência espacial.

Devido à falta de dependência espacial na área 3, foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk, que constatou um valor de probabilidade maior que 5% (0,2345), confirmando-se a normalidade dos dados. Para áreas com características semelhantes às encontradas nesta área, propõe-se que sejam realizadas amostragens a distâncias menores que a realizada, para se obter valores precisos e fazer qualquer tipo de conclusões a respeito de alcance e grau de dependência espacial.

Os alcances encontrados neste trabalho para as duas áreas, estão próximos do citado por Guimarães (1993) para um Latossolo Roxo muito

argiloso (70 m), Guimarães (2000), para Latossolo Vermelho Escuro em plantio convencional (50 m) e Ribeiro Júnior (1995), (18,1 m).

Analisando os resultados apresentados na Tabela 10, observa-se que a variabilidade espacial da densidade do solo é altamente influenciada pelo manejo agrícola.

4.1.6 Água disponível

4.1.6.1 Análise descritiva clássica

Observa-se, na Tabela 11, que os valores obtidos para média, mediana e moda foram semelhantes entre si, indicando uma pequena assimetria à esquerda para as áreas 1 e 3 e à direita para a área 2, conforme classificação citada por Ferreira (1996). Os dados demonstram um comportamento próximo da distribuição normal para as três áreas, com valores observados de assimetria e curtose afastando-se pouco de 0 e 3, respectivamente.

TABELA 11 Estatística descritiva, referente ao atributo água disponível. Lavras, MG, 2004.

Parâmetros estatísticos	Áreas estudadas		
	A1	A2	A3
Número de pontos	63	63	62
Média	30,1395	25,1577	29,6284
Variância	29,1448	29,5034	41,7283
Desvio padrão	5,39859	5,43170	6,45975
Coefficiente variação	17,9120	21,5906	21,8026
Coef. de assimetria	-0,2067	0,60350	-0,1505
Coef. de curtose	2,49387	3,06635	2,24488
Mínimo	18,3240	14,4380	17,3520
Máximo	40,9770	39,7710	43,7560
Amplitude total	22,6530	25,3330	26,4040
Mediana	30,5772	24,2257	30,2239
Moda	31,2495	22,8174	31,5141

Valores em mm/0,30 m.

Segundo a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980), para as três áreas em estudo esse atributo é de média variabilidade. Este fato pode ter relação com a afirmação de Silva (1988) de que alterações decimais nos valores da densidade do solo acarretaram grandes modificações na retenção de água no solo.

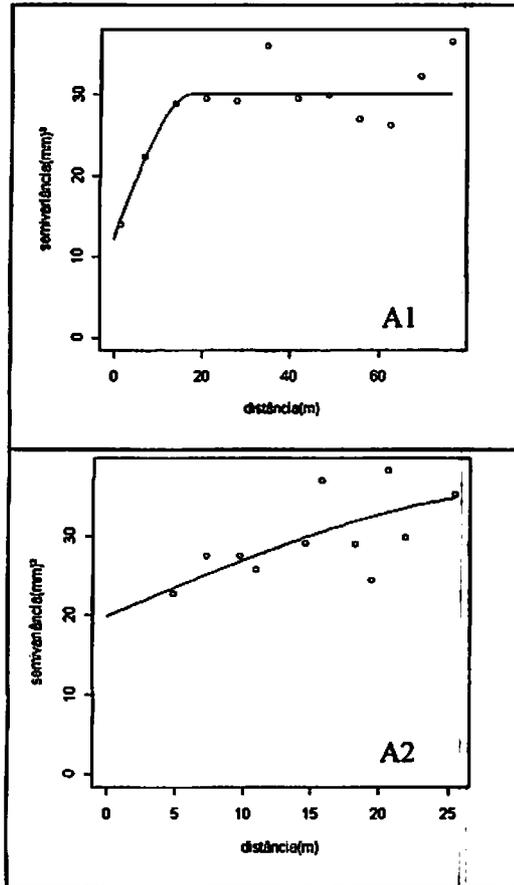
A maior disponibilidade de água no solo observada na área 1, seguida das áreas 3 e 2, respectivamente, pode estar relacionada com a desestruturação do solo pelo manejo nas áreas 2 e 3, devido ao maior tráfego de pessoas e máquinas, o que não ocorre na área 1. Segundo Tormena et al. (1998), o tráfego de máquinas altera a estrutura do solo, podendo reduzir até 24% da sua porosidade total, sendo os poros afetados os principais responsáveis pela retenção de água em baixas tensões e, portanto, mais facilmente disponível às plantas. A diferença de armazenamento observada entre as áreas corrobora com a afirmação de Hillel (1980) e Voorhees & Lindstrom (1983), de que os sistemas de preparo do solo afetam o processo de armazenamento de água no solo.

Os valores de CV encontrados para água disponível neste trabalho são menores que os citados por Silva (1988) para solo argiloso, no entanto esse autor considerou como tensão na capacidade de campo 10 kPa.

A maior densidade do solo e a menor disponibilidade de água observadas para área 2, com relação às outras áreas, estão de acordo também com Voorhees (1977), que afirma que o acréscimo na densidade global aumenta o teor de água, com base em volume, mas não aumenta a sua disponibilidade para as plantas e organismos vivos do solo. Tal fato deve-se à quebra da continuidade dos poros e maior força de retenção da água pelos finos poros produzidos pela compactação.

4.1.6.2 Análise da variabilidade espacial

Avaliando-se os dados de água disponível, encontrou-se estrutura de dependência espacial para as três áreas, como pode ser observado na Figura 13.



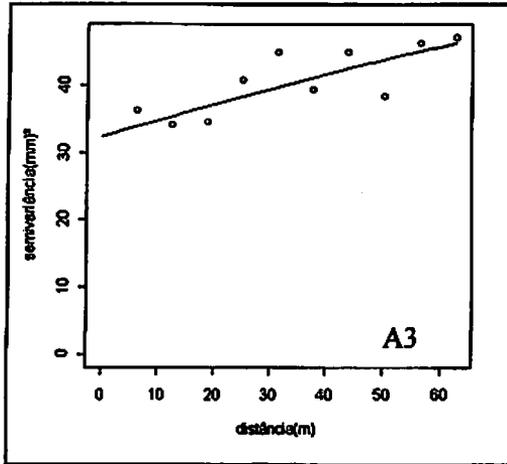


FIGURA 13 Semivariogramas para água disponível, nas áreas 1, 2 e 3. Lavras, MG, 2004.

Observa-se, na Tabela 12, que para as três áreas em estudo, o modelo de semivariograma ajustado foi o esférico, sendo que o maior alcance foi para a área 3, seguida das áreas 2 e 1. Segundo classificação proposta por Zimback (2001), para as três áreas, o grau de dependência espacial é moderado, sendo que a área 1 foi a que apresentou um maior grau de dependência, seguida pelas áreas 2 e 3.

TABELA 12 Parâmetros dos semivariogramas ajustados para água disponível. Lavras, MG, 2004.

Parâmetro	Área 1	Área 2	Área 3
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico
C_0	12,2221	19,9539	32,4380
C_1	17,9007	15,8690	21,0560
A	17,7605	32,4068	131,5926
GD	59,43	44,30	39,36

C_0 – efeito pepita; C_1 – contribuição; A – alcance (m); GD - grau de dependência (%).

Os valores de alcance observados diferem do encontrado por Moura et al. (1992), para Cambissolo e solos aluviais (200m) e Gajem et al. (1981), para armazenamento entre as tensões de 10 e 1500 kPa (30 m).

4.1.7 Porosidade drenável

4.1.7.1 Análise descritiva clássica

Observa-se, na Tabela 13, que os valores obtidos para média, mediana e moda foram semelhantes entre si, porém, demonstram uma pequena assimetria à direita na distribuição dos dados, conforme classificação de Ferreira (1996), para as três áreas em estudo. Os valores observados de assimetria e curtose afastam-se pouco de 0 e 3, respectivamente, demonstrando um comportamento próximo da distribuição normal. Resultados semelhantes foram encontrados por Guimarães (2000), para Latossolo Vermelho Escuro.

TABELA 13 Estatística descritiva, referente ao atributo porosidade drenável. Lavras-MG, 2004.

Parâmetros estatísticos	Áreas estudadas		
	A1	A2	A3
Número de pontos	63	63	62
Média	17,4677	15,1467	16,6444
Variância	15,8949	23,1433	19,8915
Desvio padrão	3,98684	4,81075	4,45998
Coefficiente variação	22,8241	31,7611	26,7957
Coef. de assimetria	0,47226	0,39085	0,44502
Coef. de curtose	2,40439	2,65508	2,37340
Mínimo	10,7560	5,63700	9,77300
Máximo	26,0800	25,9270	26,4330
Amplitude total	15,3240	20,2900	16,6600
Mediana	16,9814	14,6660	16,2397
Moda	16,0518	14,6226	15,2855

Valores em percentagem (%).

Segundo a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980), o atributo porosidade drenável é de média variabilidade nas três áreas em estudo,

sendo que a área 2 apresentou um maior CV, seguida das áreas 3 e 1, respectivamente. A elevada variabilidade encontrada para este atributo pode estar relacionada com a descontinuidade natural dos poros do solo. De acordo com Resende et al. (1999), o tamanho, distribuição e continuidade dos poros são variáveis e dependentes do tipo de solo e do manejo da área. Assim, em áreas com maior tráfego de pessoas e máquinas, o coeficiente de variação da porosidade é maior. Resultado semelhante foi encontrado por Guimarães (2000) para Latossolo Vermelho Escuro. Tormena et al. (1998) observaram uma redução média de 91% da porosidade de aeração devido ao tráfego na entrelinha de um cultivo convencional, comparada com a área não trafegada.

A maior porosidade drenável observada para área 1 pode estar relacionada com o menor tráfego de máquinas nesta área que, segundo Tormena et al. (1998), proporciona uma estabilização das condições físicas e biológicas do solo, tendo como consequência uma maior estruturação e maior macroporosidade, enquanto que, em áreas com maior tráfego de pessoas e máquinas, como nas áreas 2 e 3, ocorre uma redução dessas características.

⇒ Machado & Brum (1978), também trabalhando com diferentes sistemas de cultivo, encontraram uma maior macroporosidade para a área com mata natural, o que, segundo esses autores, era proveniente da atividade biológica e do maior conteúdo de matéria orgânica nesse sistema.

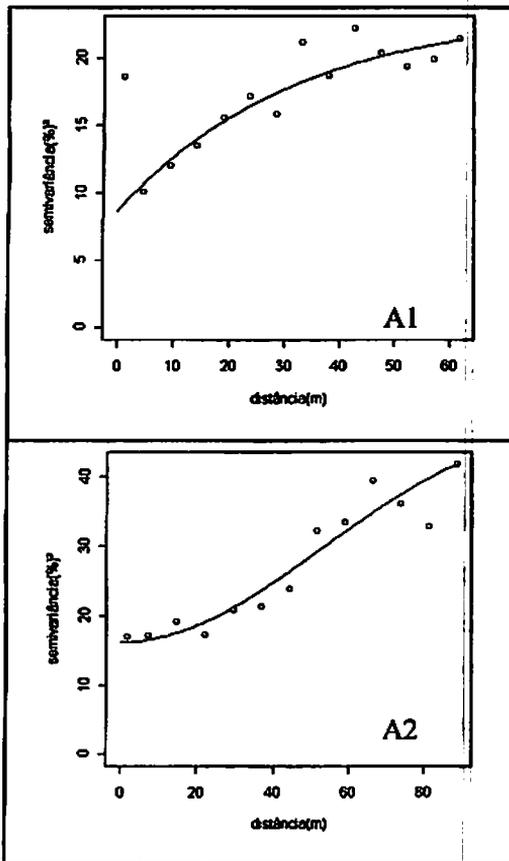
Os valores de CV encontrados neste trabalho são próximos dos citados por Correa (1986) para esta mesma classe de solo (34,7% e 20%) e por Guimarães (2000) para Latossolo Vermelho Escuro (27,3% e 34,5%).

Constata-se, pela Tabela 13 que a porosidade drenável média ficou acima de 10% e 12%, o que, segundo Vomocil & Flocker (1966) e Alvarenga et al. (1993), respectivamente, são as porosidades limites para que o crescimento de raízes e de microorganismos não seja comprometido. Tormena et al. (1998) acrescentam ainda que o tráfego de máquinas ocasiona sítios anaeróbicos que

podem resultar numa redução da eficiência de uso dos fertilizantes nitrogenados bem como na produtividade das culturas. No entanto, os valores de mínimo indicam que as áreas 2 e 3 apresentam sítios com problemas de aeração.

4.1.7.2 Análise da variabilidade espacial

Para os valores de porosidade drenável encontrou-se dependência espacial entre os dados amostrados nas três áreas em estudo, como pode ser observado na Figura 14.



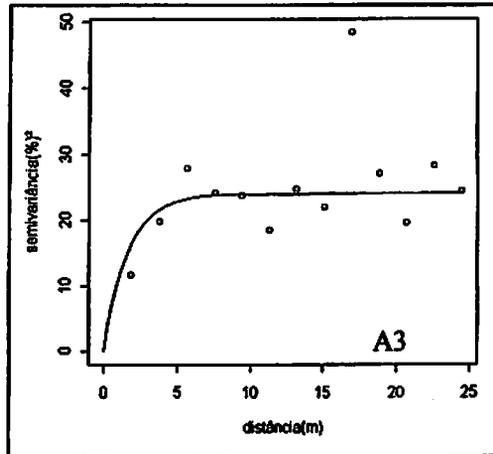
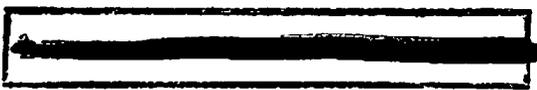


FIGURA 14 Semivariogramas para porosidade drenável, nas áreas 1, 2 e 3. Lavras, MG, 2004.

Observa-se, na Tabela 14, que para as áreas 1 e 3, o modelo de semivariograma ajustado foi o Exponencial e para a área 2 o Gaussiano, sendo que o maior alcance foi para área 2, seguida das áreas 1 e 3. Segundo classificação proposta por Zimback (2001), para as áreas 1 e 2 o grau de dependência espacial foi moderado, e para área 3 forte, sendo que a área 2 apresentou um grau de dependência maior que a área 1.

O pequeno alcance pode estar relacionado, dentre outros fatores, à maior presença de raízes nesta área, fator de alta variabilidade que, segundo Asaky & Smucker (1989), se acumula na camada superficial do solo ocupando parte do espaço poroso, aumentando assim a variabilidade deste atributo. Outro fator que pode estar influenciando é a compactação advinda do pisoteio no manejo do cafezal. Segundo Corrêa (1986), o maior teor de argila, aliado à amostragem em forma de malha, pode ocasionar valores bem discrepantes a curtas distâncias. Takeda (2000) também encontrou dependência espacial moderada para este atributo.

TABELA 14 Parâmetros dos semivariogramas ajustados para porosidade drenável. Lavras, MG, 2004.

Parâmetro	Área 1	Área 2	Área 3
Modelo	Exponencial	Gaussiano	Exponencial
C ₀	8,6545	16,2668	0,01
C ₁	14,7957	33,977	24,0386
A	95,0232	224,6487	4,9134
GD	63,09	67,62	99,96

C₀ – efeito pepita; C₁ – contribuição; A – alcance (m); GD - grau de dependência (%).

Observa-se uma certa variação com relação ao alcance para o atributo porosidade drenável. Esta variação também é verificada na literatura por Guimarães (2000) que, trabalhando com Latossolo Vermelho Escuro para plantio convencional, encontrou 50 m e para plantio direto não encontrou estrutura de dependência espacial e Roque (2003), para Neossolo Flúvico, Argissolo Vermelho-Amarelo e Gleissolo Háplico, encontrou 4,6 m, 7,04 m e 3,0 m, respectivamente.

4.2 Análise geral das estatísticas

Comparando-se os alcances encontrados neste trabalho com os citados por alguns autores como Eguchi (2001), Guimarães (2000), Gonçalves (1997) e Roque (2003), para solos considerados menos desenvolvidos, como Neossolo Flúvico, Cambissolo, Argissolo Vermelho-Amarelo, Gleissolo Háplico, Gleissolo Melânico e solos aluviais, observa-se que o Latossolo em estudo apresenta uma menor variabilidade, com maiores alcances, confirmando a uniformidade das partículas esperada para esse solo, sem presença de mineral primário ainda por intemperizar e com pouca diferenciação de horizontes, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999). Este fato corrobora com o encontrado por Correa (1986) para solos aluviais e outros

solos menos desenvolvidos, que observou uma variabilidade relativamente alta, decorrente provavelmente da sua própria gênese.

Nota-se que, para os atributos areia e porosidade drenável, existiu uma variação no tipo de modelo ajustado para os semivariogramas. Este fato indica que a variação do manejo entre as áreas pode estar influenciando na estrutura de dependência espacial desses atributos. Este fato também foi observado por Guimarães (2000).

Observa-se também que a variação dos alcances entre os diferentes manejos foi maior para porosidade drenável que para água disponível.

A área 2 apresentou, no geral, os maiores coeficientes de variação, porém, os maiores alcances. Este segundo fato pode estar relacionado com o tráfego de máquinas ter sido no sentido do maior comprimento da área (norte-sul) o que, apesar de ter proporcionado uma maior desestruturação do solo, pode ter induzido um comportamento espacial homogêneo nessa direção, onde foram obtidos os maiores números de pares de pontos utilizados para a confecção dos semivariogramas.

Observou-se, na maioria dos casos, que para os atributos hídricos disponibilidade de água e porosidade drenável, os coeficientes de variação foram semelhantes ou superiores aos dos atributos físicos. Esses resultados assemelham-se aos encontrados por Nielsen et al. (1973) que, trabalhando com solo aluvial aparentemente uniforme, encontraram variações muito menores para os atributos físicos quando comparados aos atributos hídricos.

4.3 Krigagem e correlações

Após a escolha dos modelos que melhor se ajustaram, por meio da autovalidação, foram gerados mapas de isolinhas, por meio da krigagem, com subáreas em tons de cinza, escurecendo com o aumento do valor estimado, para todos os atributos nas três áreas (Figuras 13, 14 e 15). Os espaços em branco na

Figura 15 (1 e 7), pertencentes aos atributos densidade global e densidade de partícula da área 3, chamam a atenção para o fato de que a krigagem só pode ser realizada se existir dependência espacial e a ela for ajustado um modelo de semivariograma, o que, no caso, não existiu.

Apesar da estatística clássica dar idéia da variabilidade e da condição média do atributo na área, observa-se, a partir das Figuras 15, 16 e 17, que todos os atributos apresentaram variabilidade diferenciada na área e podem receber tratamento individualizado por sub-regiões, a depender do interesse do usuário. A porosidade drenável, por exemplo, apresenta, em média, valores acima de 10% e 12%, o que, segundo Vomocil & Flocker (1966) e Alvarenga et al. (1993), respectivamente, seriam as porosidades limite para que o crescimento de raízes e de microorganismos não seja comprometido. No entanto, o valor de mínimo indica que as áreas 2 e 3 apresentam sítios com problemas de aeração e que, por meio da krigagem, podem ser identificados na área.

A apresentação dos mapas de krigagem neste trabalho não teve como objetivo justificar cada pequena variação ocorrida na área, uma vez que as suas possíveis causas já foram elucidadas anteriormente, mas, sim, facilitar a visualização das correlações entre os atributos e enfatizar a importância prática desta ferramenta para um manejo correto da área. Nesse sentido foi elaborada a Tabela 15, em que são expostos os valores reais das correlações entre os atributos para facilitar a interpretação.

Observa-se, na Tabela 15, que as correlações variam entre os atributos e entre as áreas, com destaque para as altas correlações inversas observadas para os atributos texturais, silte e argila nas áreas 1 (-0,89) e 3 (-0,75). As explicações para esse fato já foram citadas anteriormente e podem ser visualizadas espacialmente nos mapas de krigagem, onde se observa o sentido inverso do escurecimento nas áreas.

TABELA 15 Correlações entre os atributos físico/hídricos, nas três áreas em estudo. Lavras, MG, 2004.

		Dens	AD	PD	argila	areia	silte	dpart
A1	dens	1,00	0,07	-0,38	-0,16	0,05	0,16	0,05
	AD	0,07	1,00	-0,08	0,27	-0,07	-0,27	0,28
	PD	-0,38	-0,08	1,00	0,15	-0,26	-0,04	-0,08
	argila	-0,16	0,27	0,15	1,00	-0,53	-0,89	0,20
	areia	0,05	-0,07	-0,26	-0,53	1,00	0,09	-0,18
	Silte	0,16	-0,27	-0,04	-0,89	0,09	1,00	-0,14
	dpart	0,05	0,28	-0,08	0,20	-0,18	-0,14	1,00
A2	dens	1,00	-0,10	-0,67	0,49	-0,47	-0,16	0,32
	AD	-0,10	1,00	0,15	-0,12	-0,05	0,21	0,01
	PD	-0,67	0,15	1,00	-0,31	0,39	0,01	-0,20
	argila	0,49	-0,12	-0,31	1,00	-0,68	-0,64	0,22
	areia	-0,47	-0,05	0,39	-0,68	1,00	-0,14	-0,33
	Silte	-0,16	0,21	0,01	-0,64	-0,14	1,00	0,05
	dpart	0,32	0,01	-0,20	0,22	-0,33	0,05	1,00
A3	dens	1,00	-0,01	-0,17	0,34	-0,28	-0,15	-0,12
	AD	-0,01	1,00	-0,02	0,14	-0,36	0,11	0,24
	PD	-0,17	-0,02	1,00	-0,18	0,06	0,14	-0,11
	argila	0,34	0,14	-0,18	1,00	-0,39	-0,75	0,09
	areia	-0,28	-0,36	0,06	-0,39	1,00	-0,31	-0,16
	Silte	-0,15	0,11	0,14	-0,75	-0,31	1,00	0,02
	dpart	-0,12	0,24	-0,11	0,09	-0,16	0,02	1,00

A1, A2 e A3 são as áreas 1, 2 e 3, dens = densidade global, AD = água disponível, PD = porosidade drenável, dpart = densidade de partícula.

Por meio da Tabela 15 e Figuras 15, 16 e 17, pode-se observar a influência dos atributos físicos sobre disponibilidade de água e a porosidade drenável, com as seguintes correlações:

- Área 1 – as maiores correlações para AD foram com a argila (0,27) e com o silte (-0,27) e para PD foram com a densidade global (-0,38) e areia (-0,26). Esses resultados confirmam as discussões já realizadas sobre esses atributos e demonstram que, aparentemente, o solo se encontra bem estruturado,

em que os fatores predominantes na formação da porosidade do solo são os agregados formados pelas argilas.

- Área 2 – as maiores correlações para AD foram com o silte (0,21) e com argila (-0,12) e para PD foram com densidade do solo (-0,67) e areia (0,39). Esses resultados confirmam a desestruturação e compactação desse solo, onde a porosidade drenável predominante é proveniente do tamanho das partículas de areia e não devido à estrutura dos agregados formada pela fração argila que, segundo Fietz (1998), seria mais comum para solos de regiões tropicais e subtropicais como os latossolos.

- Área 3 – as maiores correlações para AD foram com a areia (-0,36) e com argila (0,14); para PD foram com argila (-0,18) e densidade global (-0,17). Esses resultados indicam uma condição intermediária desta área com relação às duas anteriores.

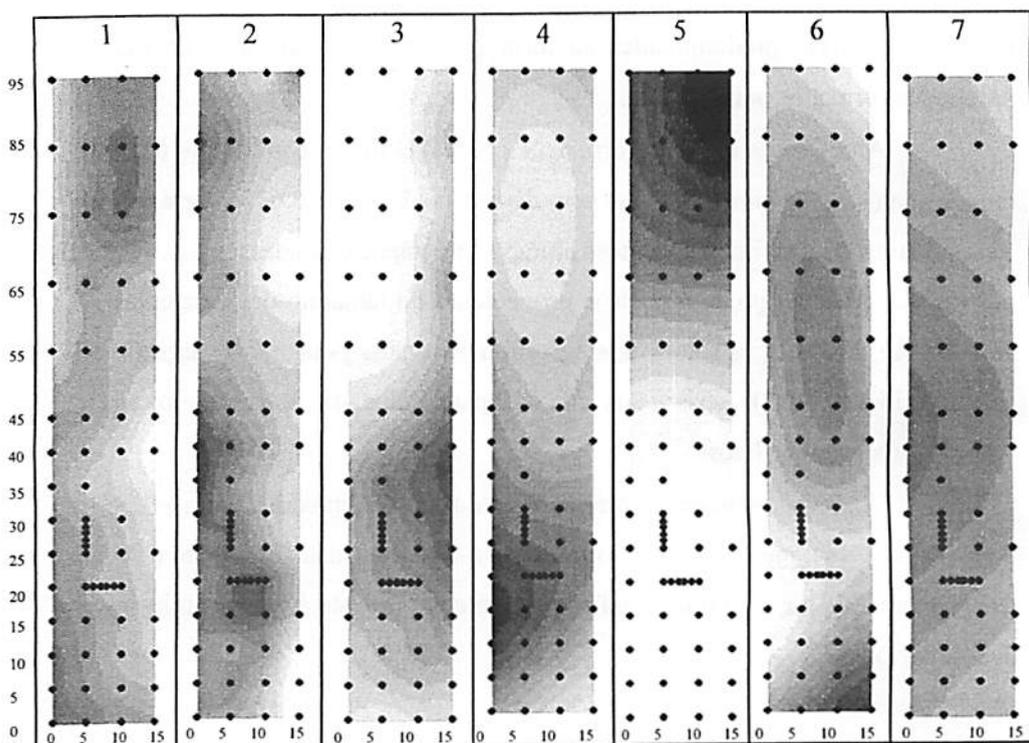


FIGURA 15 Mapeamento da área 1, realizado por meio da krigagem para os seguintes atributos: ¹densidade do solo, ²água disponível, ³porosidade drenável, ⁴argila, ⁵areia, ⁶silte, ⁷densidade de partículas. Lavras, MG, 2004.

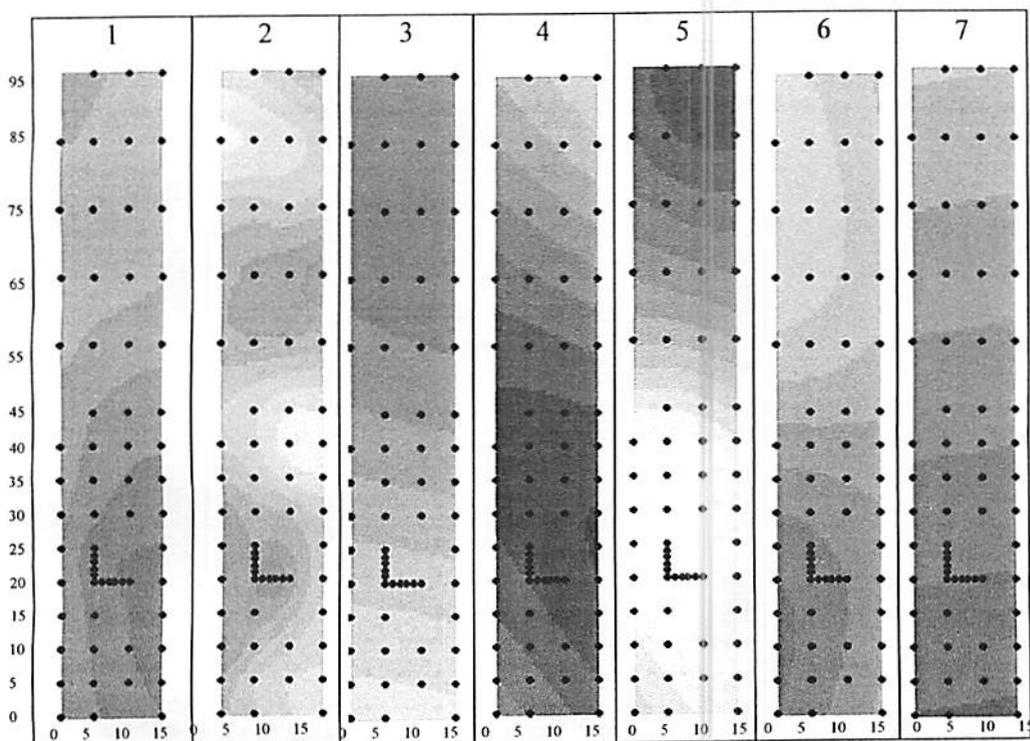


FIGURA 16 Mapeamento da área 2, realizado por meio da krigagem para os seguintes atributos: ¹ densidade do solo, ² água disponível, ³ porosidade drenável, ⁴ argila, ⁵ areia, ⁶ silte, ⁷ densidade de partículas. Lavras, MG, 2004.

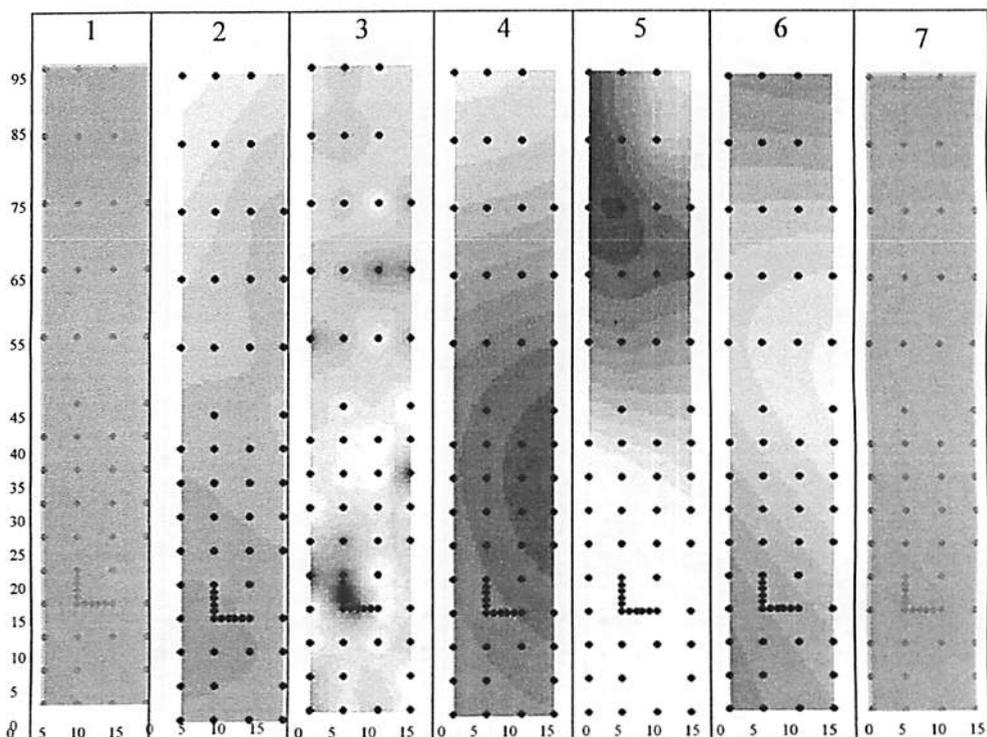


FIGURA 17 Mapeamento da área 3, realizado por meio da krigagem para os seguintes atributos: ¹densidade do solo, ²água disponível, ³porosidade drenável, ⁴argila, ⁵areia, ⁶silte, ⁷densidade de partículas. Lavras, MG, 2004.

Observa-se que a informação oferecida pelo mapa de krigagem é mais completa que a simples apresentação do semivariograma, pois, em cada área e para cada atributo, a variabilidade tem distribuição espacial diferente e por meio da krigagem podem ser observadas as tendências e a variabilidade dos atributos na área.

Torna-se evidente que a partir dos mapas apresentados podem ser feitas inferências sobre o comportamento de eventuais culturas a serem instaladas nestas áreas, com relação às propriedades hídricas, sendo possível identificar e

corrigir ou, pelo menos, minimizar os problemas. Em se tratando de irrigação, torna-se possível, ainda na fase de projeto, separar as áreas em parcelas uniformes para um melhor manejo. A escolha de áreas representativas para instalação de sensores de umidade também é um ponto que pode ser explorado, tanto em projetos a instalar como nos já instalados.

Devido ao pequeno tamanho das áreas em estudo e à grande variabilidade da disponibilidade de água encontrada nelas, pode não ser viável economicamente tratá-las na forma de subparcelas uniformes para irrigação. No entanto, torna-se necessário fazer o estudo econômico do projeto, levando em consideração o custo de implantação, a sensibilidade da cultura a ser implantada e o seu retorno econômico.

Para que o incremento de uma técnica como a geoestatística proporcione ganhos significativos para o produtor irrigante é necessário que toda a sua cadeia produtiva esteja bem ajustada, pois, de pouco adianta um projeto bem elaborado, se ele não tem equipamentos nem técnicos treinados que possam maximizar o uso dessa ferramenta no manejo. Atualmente são poucas as propriedades que atendem a esses pré-requisitos, entretanto, o conhecimento da variabilidade espacial já tem participação relevante na experimentação agrícola de campo pois a falta de conhecimento desta, nas glebas experimentais, pode comprometer os resultados das pesquisas, principalmente quando se trata da indicação da melhor lâmina ou tensão para irrigação de uma determinada cultura.

5 CONCLUSÕES

Nas condições em que foi realizado este trabalho, os resultados obtidos permitem apresentar as seguintes conclusões:

- os atributos em estudo não devem ser considerados fixos para um determinado tipo de solo, pois os mesmos são altamente dependentes do manejo e/ou da posição topográfica;
- a krigagem é um excelente interpolador para atributos físico-hídricos e deve ser considerada ferramenta primordial na agricultura de precisão e em pesquisas, principalmente na escolha de parcelas homogêneas no campo;
- não deve haver estudos isolados da porosidade drenável e da disponibilidade de água do solo em relação aos atributos físicos do mesmo;
- a disponibilidade de água e a porosidade drenável são altamente influenciadas pelo manejo e pelas características do solo, devendo ser considerada a sua distribuição espacial, principalmente em perímetros irrigados onde os valores desses atributos são diariamente utilizados nos cálculos da lâmina de irrigação;
- a variabilidade espacial da porosidade drenável é mais influenciada pelo manejo que a variabilidade espacial da disponibilidade de água.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, C. R. **Potencialidade de adubos verdes para a conservação e recuperação de solos.** 1993. 112 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ANDERSON, S. N.; CASSEL, D. K. Statistical and autoregressive analysis of soil physical properties of Portsmouth Sandy Loam. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 50, n. 5, p. 1096-1104, Sept./Oct. 1986.

ARCHER, S. R.; SMITH, P. D. Relation between bulk density, available water capacity, and air capacity of soils, *Journal of Soil Science*, Edinburgh, v. 23, n. 4, p. 475-480, Dec. 1972.

ASAKY, G. H.; SMUCKER, A. J. M. Compaction and root modification of soil aeration. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 52, n. 1, p. 251-254, Jan./Feb. 1989.

BATISTA, I. F. **Variabilidade especial da umidade do solo em irrigação por gotejamento sob cultivo protegido,** Botucatu: UNESP, 2002. p. 113.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação.** 6. ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1995. 657 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** São Prulo: Ícone, 1990. 355 p.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis.** I. Physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1986. p. 363-375

BORGES, E. A.; MEDINA, B. F. Correlação entre capacidade de campo determinada in situ e em laboratório. *Agropecuária Técnica*, Viçosa, v. 2, n. 1, p. 50-61, 1981.

BRAGA, L. P. V. Geostatística e aplicações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PROBABILIDADES E ESTATÍSTICA, 9., 1990, São Paulo. **Minicurso....** São Paulo: IME/USP, 1990. p. 36.

BUCKMAN, H. D.; BRADY, N. O. **Natureza e propriedades dos solos**. São Paulo: Freitas Bastos, 1989. 594 p.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II Block Kriging. **Journal of Soil Science, Oxford**, v. 31, n. 2, p. 333-341, June 1980b.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1987. 193 p.

CABELLO, F. P. **Riegos localizados de Alta Frecuencia: goteo-microaspersión- Exudación**. 3. ed. España: Ediciones Mundi-Prensa, 1996. 513 p.

CAMARGO, E. C. G. Disponível em: <www.ltid.inpe.br>. Acesso em: set. 2002

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, Sept./Oct. 1994.

CARVALHO, L. G. de; SAMPAIO, S. C.; SILVA, A. M. da. Determinação da condutividade hidráulica "*in situ*" de um Latossolo Roxo distrófico. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 7, p. 1-97, dez. 1996.

CARVALHO, T. M. de. **Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho Amarelo através da geoestatística**. 1991. p. 84. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, MG.

CARVALHO, T. M. de; SILVA, A. M. da; OLIVEIRA, M. S. de; AQUINO, L. H. de; FERREIRA, M. M. Variabilidade espacial da retenção de água em um Latossolo Vermelho-Amarelo através da geoestatística. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 16, n. 4, p. 521-528, out./dez. 1992.

CASSEL, D. K.; BAUER, A. Spatial variability in soils below depth of tillage: bulk density and fifteen atmosphere percentage. **Soil Science of America Proceedings**, Madison, v. 39, p. 247-250, 1975.

CASSEL, D. K.; NIELSEN, D. R. Field capacity and available water capacity. In: KLUTE, A. **Methods of soils analysis**. Madison: ASM/SSSA, 1986. Cap. 36, p. 901-926.

CHAN, K. Y. Representative sampling for bulk density in a vertisol. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 45, n. 3, p. 668-679, May/June 1981.

COELHO, M. A. **Spatial variability of water related soil physical properties**. 1974. 186 p. Thesis (Ph. Doctor) – University of Arizona, Tucson.

CORRÊA, J. B. D. **Variabilidade espacial de características e propriedades físicas de Latossolo Roxo do município de Lavras-Mg**. 1986. 83 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

CURRIE, J. A. Gas diffusion through soil crumbs: The effects of compaction and wetting. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 35, n. 1, p. 1-10, Mar. 1984

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**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. pt. 1, p. 545-567.

DELFINER, P. Delhomme, J. P. Optimum interpolation by Kriging. In: DAVIS, J. C.; McCULLAGH, M. J. (Ed.). **Display and analysis of spatial data**. New York: John Wiley, 1975. p. 96-114.

DIAS JUNIOR, M. de S. **Compactação do solo: tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2000. v. 1, p. 55-95.

EGUCHI, E. S. **Variabilidade especial de atributos físico-hídricos de um solo hidromórfico no município de Lavras-MG**. 2001. 85 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FERREIRA, D. F. **Estatística básica**. Lavras: UFLA, 1996. 118 p.

FERREIRA, M. M. O ponto de inflexão da curva característica de umidade como estimativa da capacidade de campo do solo. 1980. 55 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

FERREIRA, M. M.; DIAS JUNIOR, M. S.; BERTONI, J. C.; BASTOS, A. R. R. Física do solo: curso de pós-graduação em solos e nutrição de plantas. Lavras, UFLA, 2000. 33p. (Notas de aula prática).

FIETZ, C. R. Variabilidade espacial do armazenamento de água no solo visando o manejo da irrigação por aspersão. 1998. p. 97. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP..

FOLEGATTI, M. V. Estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade e do armazenamento de água em solo siltoso. Piracicaba: ESALQ, 1996. 84 p.

FREIRE, J. C. Retenção de umidade em um perfil oxissol do município de Lavras-MG. 1975. 76 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

GAJEM, Y. M.; WARRIC, A. W.; MYERS, D. E. Spatial dependence of physical properties of a typic torriferent. Soil Science Society of American Journal, Madison, v. 45, n. 4, p. 709-715, July/Aug. 1981.

GONÇALVES, A. C. A. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação. 1997. p. 118. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

GONÇALVES, A. C.; FOLEGATTI, M. V. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo, ao longo de uma transeção em área irrigada por pivô central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Viçosa. Anais... Viçosa: UFV, 1995.

GREMINGER, P. J.; SUD, Y. K.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of field measured soil water characteristics. Soil Science Society of American Journal, Madison, v. 49, n. 5, p. 1075-82, Sept./Oct. 1985.

GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo em um Latossolo Roxo. 1993. 138 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Campinas, Campinas, SP.

GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial de atributos de uma Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional. 2000. 85 p. Tese (Doutorado) – Universidade de Campinas, Campinas, SP.

GUMAA, G. A. Spatial variability of in situ available water. 1978. 140 p. Thesis (Doctor) – University of Arizona, Tucson.

HILLEL, D. Applications of soil physics. New York: Academic Press, 1980. 385 p.

HUIJBREGTS, C. J. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: DAVIS, J. C.; McCULLAGH, M. J. (Ed.). Display and analysis of spatial data. New York: John Wiley, 1975. p. 38-53.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA R. M. An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University Press, 1989. 560 p.

JOURNEL, A. C.; HUIJBREGTS, C. J. Mining geostatistics, London: Academic Press, 1978. 600 p.

KIEHL, E. J. Manual de edafologia. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262 p.

KITANIDIS, P. K.; VOMVORIS, E. G. A geostatistical approach to the inverse problem in groundwater modelling (steady state) and one dimensional simulations. Water Resources Research, Baltimore, v. 19, n. 3, p. 677-690, June 1983.

KLAR, A. E. A água no sistema solo-planta-atmosfera. São Paulo: Nobel, 1988. 408 p.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba: ESALQ/USP, 1999. 497 p.

LIBARDI, P. L.; PREVEDELLO C. L.; PAULETO, E. A.; MORAES, S. O. Variabilidade Espacial da umidade, textura e densidade de partículas ao longo de uma transeção. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 10, n. 2, p. 85-90, maio/jun. 1986.

LIER, Q. de J. V. Índices da disponibilidade de água para as plantas: tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2000. v. 1, p. 95-107.

MACHADO, J. A.; BRUM, A. C. R. Efeito de sistemas de cultivo em algumas propriedades físicas do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 2, n. 2, p. 81-84, maio/ago. 1978.

MACHADO, R. V. Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos em uma hidrossequência de solos bem a muito mal drenados. 1994. p. 88. Dissertação (Mestrado) Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, MG.

MOURA, E. G.; VIEIRA, S. R.; CARVALHO, A. M. , Avaliação da capacidade de aeração e de água disponível dos solos de duas transeções na baixada ocidental maranhense. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 16, n. 1, p. 7-18, jan./abr. 1992.

NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W.; HER, K. T. Spatial variability of field-measured soil water properties. Hilgardia, Berkeley, v. 42, n. 7, p. 215-259, Nov. 1973.

OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela "mesa de tensão" em amostras de solo com estrutura indeformada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1, p. 197-200, jan./fev. 1968.

OLIVEIRA, M. S. Planos amostrais para variáveis espaciais utilizando geostatística. 1991. p. 100. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Campinas, Campinas, SP.

PERES, L. E. P. Disponível em: <www.ciagri.usp.br>. Acesso em: set. 2002.

POCAY, V. G. Relações entre pedoforma e variabilidade espacial de atributos de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. 2000. p. 135. Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual de São Paulo, Jaboticabal, SP.

PREVEDELLO, B. M. S. Variabilidade espacial de parâmetros de solo e planta. 1987. 166 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 12, n. 3, p. 211-216, set./dez. 1988.

REICHARDT, K. Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas. 2 ed. Piracicaba: USP/ESALQ, 1996. 505 p.

REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. Campinas: Fundação Cargil/ESALQ-CENA, 1985. 445 p.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B. de; CORRÊA, G. F. Pedologia 3. ed. Viçosa: NEPUT, 1999. 338 p.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo. 1995. p. 99. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

RICHARDS, L. A. Methods of measuring moisture tension. Soil Science, Baltimore, v. 68, p. 95-112, 1949.

ROGOWSKI, A. S. Watershed physics: soil variability criteria. Water Resources Research, Washington, v. 8, n. 4, p.1015-1023, Aug. 1972.

ROQUE, M. W. Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos em solos de uma transeção perpendicular a um dreno natural. 2003. 138 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

SALES, L. E. O. Variabilidade espacial da velocidade de infiltração básica associada a propriedades físicas das camadas superficial e subsuperficial de dois solos da região de Lavras (MG). 1992. p. 103. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, MG.

SILVA, A. P. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo. 1988. p. 105. (Tese doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

SILVA, M. L. N. Conservação e planejamento de uso do solo: In Marques, J. J.; FERNANDES, L. A.; SILVA, M. L. N.; DIAS JR., M. S.; CURI, N.; FAQUIN, V. Solo no contexto ambiental, Lavras: UFLA/FAEPE, p.111-115, 2001.

SOUZA, L. D. Estimativas e utilização da capacidade de campo. 1989. 126 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

STEVENSON, D. S. Unreliabilities of pressure plate 1500 kilopascal data in predicting soil water contents at which plants become wilted in soil-peat mixes. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v. 62, n. 2, p. 415-419, 1982. Notes.

TAKEDA, E. Y. Variabilidade especial de atributos físicos e químicos de uma associação de solos sob videira (*Vitis vinifera* – L.) de Vitória Brasil (SP). 2000. 98 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

TOGNON, A. A. Propriedades físico hídricas do Latossolo Roxo da região de Guairá-SP sob diferentes sistemas de cultivo. 1991. 67 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 301-309, abr./jun. 1998.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistic to spatial studies of soil properties. *Advance in agronomy*, New York, v. 38, p. 45-94, 1985.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 2001. 943 p.

VACLIN, M.; VIEIRA, S. R.; VACHAUD, G.; NIELSEN, D. R. The use of corriging with limited field soil observations. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 47, n. 2, p. 175-184, Mar./Apr. 1983.

VIEIRA, S. R. Geostatística em estudo de variabilidade espacial do solo: in NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2000. v. 1, p. 1-55.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, San Pablo, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

VILELA, E. A.; RAMALHO M. A. P. análise das temperaturas e precipitações pluviométricas de Lavras-MG. *Ciência e Prática*, Lavras, v. 3, n. 6, p. 71-79, nov./dez. 1981.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effects of soil compaction storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 4, p. 242-246, Mar./Apr. 1966.

VOORHEES, W. B. Soil compaction how it influences moisture temperature, yield, root growth. **Crops and Soil Magazine**, v. 29, p. 13-16, 1977.

VOORHEES, W. B.; LINDSTROM, M. J. Soil compaction constraints on conservation tillage in the northern Corn Belt. **Journal Soil Water Conservation**, Ankeny, v. 38, n. 3, p. 307-311, 1983.

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

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. **Advances in Soil Sciences**, New York, v. 3, p. 1-70, 1985.

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

ZIMBACK, C. R. L. **Análise especial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 p. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.