



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbccs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Brasil

Schaffrath, Valter Roberto; Tormena, Cássio Antônio; Fidalski, Jonez; Andrade Gonçalves, Antônio  
Carlos

Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo  
convencional

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 32, núm. 4, agosto, 2008, pp. 1369-1377  
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180214233001>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

## VARIABILIDADE E CORRELAÇÃO ESPACIAL DE PROPRIEDADES FÍSICAS DE SOLO SOB PLANTIO DIRETO E PREPARO CONVENCIONAL<sup>(1)</sup>

Valter Roberto Schaffrath<sup>(2)</sup>, Cássio Antônio Tormena<sup>(3)</sup>, Jonez Fidalski<sup>(4)</sup> & Antônio Carlos Andrade Gonçalves<sup>(3)</sup>

### RESUMO

Os sistemas de manejo do solo influenciam a distribuição espacial das propriedades físicas do solo. Os objetivos deste estudo foram verificar a dependência e a correlação espacial de algumas propriedades físicas do solo por meio do ajuste de dados aos semivariogramas simples e cruzados num Latossolo Vermelho distroférrico, sob plantio direto e preparo convencional, no município de Campo Mourão, Estado do Paraná. Em abril de 2004, realizou-se a amostragem de solo e retiraram-se 128 amostras de solo indeformadas, em malha de 3,0 x 5,0 m, no terço médio da camada de 0-0,15 m de profundidade. Foram determinadas as seguintes propriedades físicas do solo: densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, e o conteúdo de água do solo na tensão de 100 hPa ou equivalente à capacidade de campo. Essas propriedades físicas do solo apresentaram semivariogramas simples com maior variabilidade espacial e menor alcance no plantio direto do que no preparo convencional. Contrariamente, os semivariogramas cruzados entre a densidade do solo com a porosidade total ou a capacidade de campo mostraram correlação espacial com menor variabilidade espacial e maior alcance no plantio direto, comparado ao preparo convencional. Os semivariogramas cruzados evidenciaram que a densidade do solo determinou as correlações espaciais com as outras propriedades físicas nos dois sistemas de manejo do solo.

**Termos de indexação:** densidade do solo, porosidade do solo, variabilidade espacial, semivariograma cruzado, plantio direto.

<sup>(1)</sup> Recebido para publicação em janeiro de 2007 e aprovado em maio de 2008.

<sup>(2)</sup> Professor da Escola Técnica da Universidade Federal do Paraná – UFPR. Rua Dr. Alcides Vieira Arcoverde 1225, CEP 81520-260 Curitiba (PR). E-mail: vschaffrath@ufpr.br

<sup>(3)</sup> Professor do Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá – UEM. Av. Colombo 5790, CEP 87020-900 Maringá (PR). Bolsistas do CNPq. E-mail: catormena@uem.br; acagoncalves@uem.br

<sup>(4)</sup> Pesquisador do Instituto Agronômico do Paraná – IAPAR. Caixa Postal 564, CEP 87701-970, Paranavaí (PR). E-mail: fidalski@iapar.br

**SUMMARY: VARIABILITY AND CORRELATION AMONG PHYSICAL PROPERTIES OF AN OXISOL UNDER NO-TILL AND CONVENTIONAL TILLAGE**

*Soil management systems modify the spatial distribution of soil physical properties. The objectives of this study were to verify the spatial dependency and co-relationship of some soil physical properties by data fitting to individual and cross-semivariograms in an Oxisol (Typic Haplorthox) under no-till and conventional tillage, in Campo Mourão, state of Paraná, Brazil. In April 2004, 128 undisturbed soil samples were collected in a 3 x 5 m grid, in the middle of the 5–0.15 m layer. The following soil physical properties were measured: soil bulk density, macroporosity, microporosity, total soil porosity and soil water content at a tension of 100 hPa (field capacity). The spatial variability in the single semivariogram of these soil physical properties was higher and the range in no-tillage was smaller than in conventional tillage. On the other hand, the cross-semivariogram of soil bulk density and total porosity or field capacity indicated spatial co-relationships with lower spatial variability and higher ranges in no-tillage than conventionally tilled soils. The cross-semivariogram suggested that soil bulk density showed a spatial co-relationships with the other soil physical properties in both soil management systems studied.*

*Index terms: soil bulk density, soil porosity, spatial variability, cross-semivariogram, no-tillage.*

## INTRODUÇÃO

O conhecimento da variabilidade espacial das propriedades físicas do solo pode contribuir na definição de melhores estratégias para o manejo sustentável do solo. A utilização de técnicas geoestatísticas permite avaliar e descrever detalhadamente a distribuição espacial das propriedades do solo. Em relação às propriedades físicas do solo, a maioria dos estudos tem demonstrado uma ampla diversidade de resultados, com variação entre os locais estudados, com ou sem continuidade espacial, provavelmente associada ao sistema de manejo e às características intrínsecas dos solos (Grego & Vieira, 2005).

A geoestatística tem sido aplicada no estudo da distribuição espacial das propriedades físicas do solo. Propriedades como densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e o conteúdo de água do solo têm apresentado dependência espacial descritas por semivariogramas simples (Vieira et al., 1981; Vauclin et al., 1983; Gonçalves et al., 2001; Souza et al., 2001; Carvalho et al., 2003; Souza et al., 2004; Grego & Vieira, 2005; Fidalski et al., 2006). Por outro lado, Gonçalves (1997) e Guimarães (2000) demonstraram a ausência de dependência espacial da densidade do solo nos seus ambientes de estudo. Tais resultados são atribuídos à malha muito ampla, estabelecendo efeito pepita puro.

A partir do conhecimento da variabilidade espacial de propriedades do solo, é possível descrever a correlação espacial entre essas variáveis, denominada correlação cruzada. Esta correlação é obtida por meio do semivariograma cruzado e do ajuste de um modelo matemático que descreve a sua estrutura de variação

(Trangmar et al., 1985; Webster, 1985; McBratney & Webster, 1986; Isaaks & Srivastava, 1989). A correlação espacial tem sido utilizada em estudos relacionando a infiltração de água no solo e a espessura do horizonte A (Bertolani & Vieira, 2001), o conteúdo de água e a textura do solo (Vauclin et al., 1983), a textura do solo, a produção de biomassa e a produtividade de grãos (Miller et al., 1988). Buttafuoco et al. (2005) estudaram as variações do conteúdo de água no solo durante um período de secamento e, ou, umedecimento.

O sistema de manejo do solo é considerado uma das fontes mais importantes de variabilidade espacial das propriedades físicas do solo. Muitos trabalhos têm comparado sistemas de manejo com e sem revolvimento do solo, utilizando técnicas estatísticas convencionais (Souza et al., 1998; Tormena et al., 1999a; Stone & Silveira, 2001; Falleiro et al., 2003; Sepaskhah et al., 2005). Por outro lado, a aplicação de técnicas geoestatísticas em estudos de variabilidade espacial de diferentes sistemas de manejo ainda é pouco utilizada. Os objetivos deste estudo foram verificar a dependência espacial de algumas propriedades físicas do solo por meio do ajuste de dados aos semivariogramas simples e cruzados para avaliar as correlações espaciais em plantio direto e preparo convencional, estabelecidos num Latossolo Vermelho distroférreo.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Fazenda Experimental da Cooperativa Agroindustrial Mourãoense Ltda.

(COAMO), localizado no município de Campo Mourão, PR, situado entre as coordenadas  $23^{\circ} 17' 9''$  de latitude sul e  $51^{\circ} 55' 17''$  de longitude oeste de Greenwich, e altitude de 620 m. O clima da região é do tipo subtropical úmido mesotérmico, com verões quentes, geadas pouco freqüentes, e tendência de concentração de chuvas nos meses de verão, com índice pluviométrico anual superior a 1.800 mm, sem estação seca definida (IAPAR, 1978). O solo foi identificado como Latossolo Vermelho distroférrico textura muito argilosa (Embrapa, 2006). A análise granulométrica realizada na camada de 0–0,20 m apresentou teores médios de 870, 92 e 38 g kg<sup>-1</sup> respectivamente de argila, silte e areia.

Foram selecionadas duas áreas contíguas sob plantio direto e preparo convencional, ambas estabelecidas há quatro anos. Por ocasião da amostragem, ambas as áreas tinham sido cultivadas com a cultura da soja em seqüência à cultura de trigo. O preparo convencional do solo consistiu de aração com arado de discos e gradagem niveladora. Este sistema de manejo no preparo convencional do solo caracterizou maior número de passadas de máquinas na área em relação ao plantio direto. As adubações para as culturas foram realizadas anualmente, conforme recomendações técnicas baseadas em análises químicas de solos. Em abril de 2004, foi realizada a demarcação das áreas nos sistemas de manejo plantio direto e preparo convencional, estabelecendo em cada uma um retângulo de 21 x 65 m (1.365 m<sup>2</sup>), referenciados no eixo Y (21,0 m) e no eixo X (65,0 m). Os pontos centrais foram alinhados e marcados com trena para obter malha regular de 3,0 x 5,0 m. Em duas colunas do meio, o espaçamento foi de 3,0 x 2,5 m, devidamente referenciados em coordenadas X e Y, totalizando 128 pontos amostrais em cada sistema de manejo de solo.

A amostragem de solo foi realizada em abril de 2004, aproximadamente um mês após a colheita da cultura da soja. Foram obtidas amostras de solo com estrutura indeformada no terço médio da camada de 0–0,15 m, utilizando amostrador tipo Uhland e anéis metálicos (0,05 m de diâmetro e altura) com volume de 100 cm<sup>3</sup>. As amostras indeformadas foram saturadas em bandeja com água por um período de 48 h, e drenadas na tensão de 60 hPa, utilizando-se uma mesa de tensão adaptada de Kiehl (1979), com 100 hPa de tensão por meio de uma membrana extratora de Richards (Klute, 1986). Em seguida, as amostras foram secas em estufa com temperatura de 110 °C por 48 h. Nessas amostras, foram determinados a densidade do solo (Blake & Hartge, 1986); a porosidade total; o volume de macroporos drenados com tensão de 60 hPa (60 hPa = 60 cm de coluna de água = 6 kPa) e o volume de microporos ou equivalente ao conteúdo de água do solo na tensão de 60 hPa (Embrapa, 1997); e o conteúdo de água do solo na tensão de 100 hPa, estimado como na capacidade de campo (Reichardt, 1988). A porosidade total foi calculada como o conteúdo de água do solo saturado.

Os dados originais foram submetidos à análise exploratória, a partir da qual foram obtidos a média e a mediana como medidas de tendência central; o desvio-padrão, a variância e o coeficiente de variação como medidas de dispersão. Também foram avaliados a amplitude total e os quartis para analisar a distribuição dos dados, e os coeficientes de assimetria e curtose para a verificação da posição dos dados em relação à distribuição normal. Essas análises foram realizadas com o software Statistica (StatSoft, 2000). Os dados foram submetidos ao teste Kolmogorov-Smirnov para a constatação da distribuição normal, conforme Campos (1983).

No preparo convencional, as variáveis estudadas apresentaram um componente determinístico com dependência em relação à direção X ou Y, ou em ambas as direções, o que foi identificado por uma análise de regressão linear realizada no software estatístico SAS (SAS, 1999). A dependência dos valores das variáveis em relação ao eixo Y, para a densidade do solo e a porosidade total, e em relação aos eixos X e Y, para macroporosidade, capacidade de campo e microporosidade, foi removida subtraindo-se, do valor medido, o valor obtido com o modelo de regressão linear ajustado, obtendo-se resíduos livres de tendência conforme Vieira (2000) e Gonçalves et al. (2001). Os resíduos dessas variáveis foram analisados para verificar a sua distribuição normal e, como não se aproximaram desta distribuição, foram transformadas em logaritmo natural. Procederam-se, ainda, à análise de candidatos a "outliers", considerando-se "outlier" somente aqueles valores que afastavam dos dados a distribuição normal, por gerar uma assimetria exagerada, em função da sua posição na distribuição de freqüência (Hamlett et al., 1986), e que apresentavam uma posição espacial discrepante dos demais valores vizinhos, conforme a metodologia de análise exploratória espacial preconizada por Libardi et al. (1996). No plantio direto, os dados das variáveis analisadas não apresentaram dependência da direção X ou Y. Os valores da porosidade total no plantio direto e da macroporosidade no preparo convencional, considerados "outliers", foram excluídos da análise variográfica e da validação cruzada, porém mantidos no processo de interpolação por krigagem.

A análise espacial constou da construção e interpretação do semivariograma experimental e do ajuste de um modelo matemático para explicar a estrutura de variância dos dados. A análise variográfica foi realizada com o software Variowin 2.2 (Pannatier, 1996).

Considerou-se, neste trabalho, que os dados atendem à condição de estacionariedade intrínseca que ocorre quando a esperança ( $E$ ) de  $Z(x_i)$  é constante,  $\mu(x_i) = \mu$  e a variância (VAR) do incremento entre  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i + h)$  é finita e independente da posição no espaço, dependendo apenas da distância de separação  $h$ , já que os dados são simétricos em relação à normalidade. Assim:

$$\text{VAR}\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\} = E\{[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2\}, 2\gamma(h) \quad (1)$$

para qualquer  $s_i$  (ponto amostral) dentro da área S (domínio) (Gonçalves, 1997; Vieira, 2000). Este nível de estacionariedade dos dados é suficiente para a aplicação da geoestatística. Por isso foi possível estimar a função de semivariância  $[\gamma^*(h)]$  a partir do estimador clássico ou de Matheron, expresso por:

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

em que  $N(h)$  é o número de pares de valores medidos  $Z(s_i), Z(s_i + h)$  a variável, separados por uma distância amostral, vetor  $h$  (Journel & Huijbregts, 1978), e gerar os semivariogramas simples. A estimativa da correlação espacial entre duas variáveis com todas as combinações possíveis, conforme Holmes et al. (2005), foi realizada pela construção do semivariograma cruzado, que é expresso pela equação:

$$\gamma_{12}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_1(x_i) - Z_1(x_i + h)] [Z_2(x_i) - Z_2(x_i + h)] \quad (3)$$

em que  $N(h)$  é o número de pares de valores medidos  $Z_1(s_i), Z_1(s_i + h)$  e  $Z_2(s_i), Z_2(s_i + h)$  para as variáveis  $Z_1$  e  $Z_2$ , separados por uma distância amostral, vetor  $h$  (Vieira, 2000).

As funções matemáticas autorizadas, segundo McBratney & Webster (1986), utilizadas neste trabalho, são descritas nas equações 4 e 5, respectivamente, para os modelos esférico e exponencial:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C_1 \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ para } 0 < h > a \\ \gamma(h) &= C_0 + C_1, \text{ para } h > a \end{aligned} \quad (4)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3 \frac{h}{a})] \text{ para } h > 0 \quad (5)$$

em que  $C_0$  é o efeito pepita ou "Nugget", que é o valor de  $\gamma(h)$  quando  $h = 0$ ;  $C_0 + C_1$  = patamar ou "Sill", é o valor de  $\gamma(h)$  quando a variância se estabiliza;  $C$  é a variância estrutural ou a diferença entre o efeito pepita e o patamar; e "a" é o alcance ou "Range", considerando a distância até onde o patamar se estabiliza e representa a amplitude da dependência espacial a partir da qual a variável se distribui ao acaso (Grego & Vieira, 2005).

A estimativa de valores das variáveis para locais não amostrados foi realizada pela krigagem, que usa a soma dos pesos igual à unidade e variância mínima, garantindo que o estimador de krigagem é o melhor estimador linear não tendencioso (Webster & Oliver, 1990). Conforme Trangmar et al. (1985), o ajuste do semivariograma cruzado entre as variáveis, independente da ordem, gera a mesma estrutura de variação conjunta no espaço. A avaliação da qualidade da estimativa realizada pela krigagem foi realizada pelo processo de validação cruzada, conforme recomendações de Isaaks & Srivastava (1989), usando o software GeoEAS (Englund & Sparks, 1991).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise exploratória dos dados das propriedades físicas incluindo os testes de normalidade é apresentada no quadro 1. Os coeficientes de assimetria e curtose com valores próximos de zero indicam que as variáveis densidade do solo, microporosidade e capacidade de campo apresentaram distribuição normal pelo teste Kolmogorov-Smirnov ( $p < 0,05$ ) nos dois sistemas de manejo de solo. A porosidade total apresentou distribuição normal apenas no preparo convencional, e a macroporosidade somente no plantio direto (Quadro 1). Estes resultados estão em conformidade com aqueles publicados por Souza et al. (2001), Carvalho et al. (2003), Gonçalves (1997) e Souza et al. (2004). As variáveis porosidade total no plantio direto e macroporosidade no preparo convencional apresentaram valores 8 e 1, respectivamente, caracterizados como "outliers", o que foram excluídos para a realização da análise variográfica. Após a exclusão desses valores discrepantes, estas variáveis apresentaram distribuição normal (Quadro 1).

A análise variográfica indicou que todas as variáveis analisadas apresentaram dependência espacial nos dois sistemas de manejo de solo, com os modelos matemáticos dos semivariogramas experimentais simples ajustados pelos modelos esférico e exponencial (Figura 1), estando de acordo com Webster (1985) e Trangmar et al. (1985).

O alcance da dependência espacial da densidade do solo foi de 7,5 m no plantio direto e 8,5 m no preparo convencional (Figura 1). O alcance do semivariograma indica a magnitude da dependência espacial, de modo que maior alcance no preparo convencional, comparado ao plantio direto sugere, conforme Grego & Vieira (2005), maior homogeneidade desta variável neste sistema de manejo, possivelmente devido ao intenso revolvimento do solo, o que pode ter promovido maior desagregação do solo, evidenciada pela redução da macroporosidade (Quadro 1). Provavelmente essa desagregação está associada ao tráfego mais intenso de máquinas e à redução dos teores de carbono orgânico do solo (9,5 e 13,3 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, no preparo convencional e plantio direto), o que justifica a menor densidade do solo no plantio direto, comparada à do preparo convencional (Quadro 1). No plantio direto, as características estruturais são mais dependentes de fatores biológicos, como o sistema radicular das culturas, da atividade biológica e da decomposição da palha na superfície do solo. O menor valor médio da densidade do solo e a maior porosidade do solo e macroporosidade no plantio direto contrastam com resultados obtidos por Stone & Silveira, (2001), Cruz et al. (2003) e Falleiro et al. (2003).

A porosidade total apresentou dependência espacial nos dois sistemas de manejo, com alcance de 9,4 e 11,5 m, respectivamente no plantio direto e preparo convencional (Figura 1). O maior alcance do semivariograma no preparo convencional indica maior

**Quadro 1. Estatística descritiva das probabilidade do teste de normalidade dos dados para as variáveis físicas do solo no plantio direto e preparo convencional**

Variável	Número de observações	Média	Mediana	Variância	Coeficiente			d <sup>(1)</sup>					
					Variância	Assimetria	Curtose						
%													
Plantio direto													
Densidade do solo (kg dm <sup>-3</sup> )	128	1,11	1,11	0,0054	6,62	-0,01	-0,30	0,05*					
Porosidade total (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	128	0,58	0,59	0,0019	7,35	-0,96	0,72	0,11ns					
Porosidade total (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>(2)</sup>	120	0,59	0,59	0,0012	5,78	-0,56	0,08	0,09*					
Macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	128	0,13	0,13	0,0027	38,6	0,13	-0,87	0,07*					
Microporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	128	0,45	0,45	0,0010	7,07	0,27	0,10	0,05*					
Capacidade de campo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	128	0,39	0,39	0,0013	9,07	0,01	-0,33	0,07*					
Preparo convencional													
Densidade do solo (kg dm <sup>-3</sup> )	128	1,20	1,21	0,0100	5,75	-0,31	0,57	0,05*					
Porosidade total (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	128	0,57	0,57	0,0009	4,00	0,19	0,19	0,06*					
Macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	128	0,08	0,06	0,0022	61,60	0,82	-0,15	0,16ns					
Macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>(2)</sup>	127	0,08	0,07	0,0014	47,56	0,43	-0,75	0,10*					
Microporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	128	0,50	0,50	0,0012	35,30	-0,37	-0,34	0,07*					
Capacidade de campo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	128	0,42	0,42	0,0009	7,21	0,03	-0,57	0,08*					

<sup>(1)</sup> Teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov), ns (p > 0,05) e \*(p < 0,05). <sup>(2)</sup> Valores após o ajuste dos dados.

semelhança na distribuição dos poros, visto que a porosidade total é fortemente influenciada pelo sistema de manejo de solo, conforme Tormena et al. (1998). De acordo com Grego & Vieira (2005), há uma homogeneização do processo de formação de poros durante o revolvimento do solo pela aração e gradagem, o que pode justificar os resultados obtidos. No plantio direto, a dinâmica de formação de poros passa por processos biológicos como o crescimento de raízes e a atividade de organismos no solo (Ehlers et al., 1983; Willians & Weil, 2004), o que promove uma maior variabilidade no espaço, indicada pelo menor alcance do semivariograma. De modo semelhante, Sepaskhah et al. (2005) mostraram resultados de maior homogeneidade da água retida no solo, no preparo convencional, em comparação com o plantio direto.

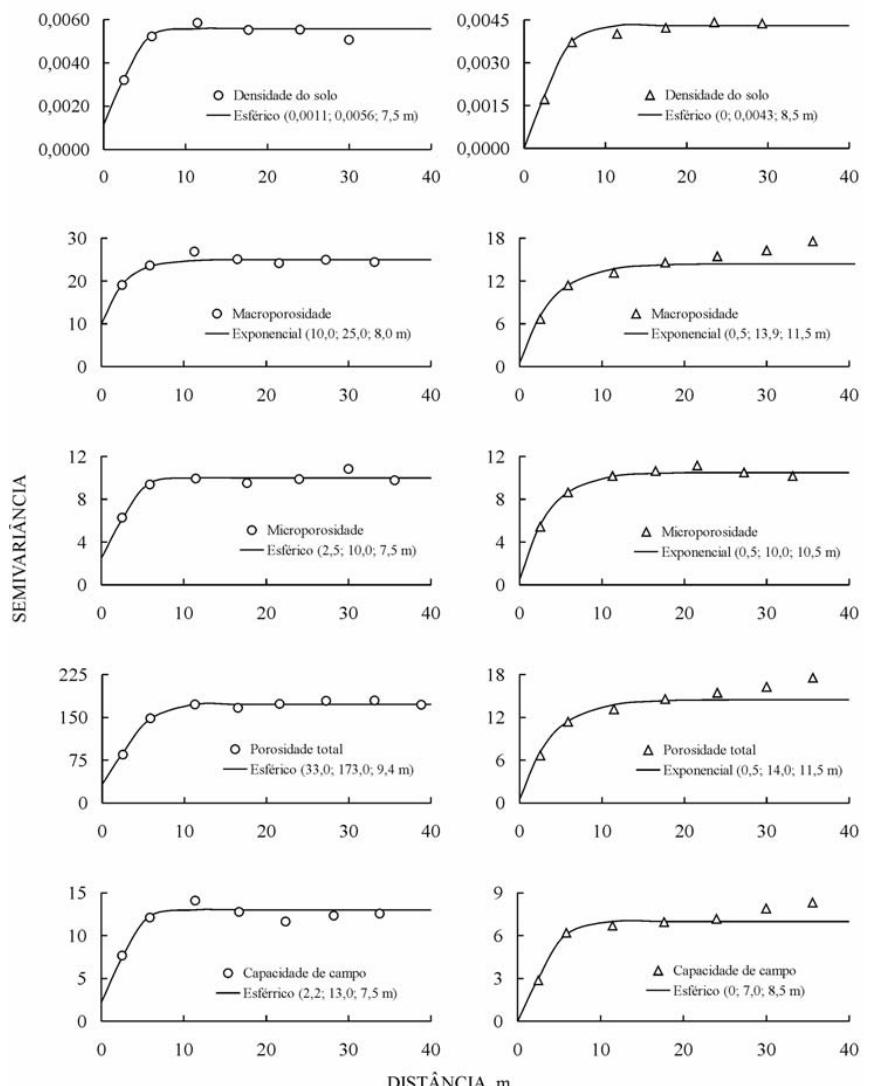
A macroporosidade apresentou alcance da dependência espacial de 8,0 m no plantio direto e 11,5 m no preparo convencional (Figura 1). A entrada de ar no solo, em baixas tensões, ocorre nos macroporos, cuja média é maior no plantio direto (0,13 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) comparado ao preparo convencional (0,08 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) (Quadro 1). A redução dos valores da macroporosidade no preparo convencional provavelmente decorre da matriz mais compactada resultante da desagregação do solo pelo preparo e pelo uso mais intenso de máquinas e implementos. Além disso, uma perda na estabilidade estrutural do solo, associada à redução dos teores de matéria orgânica, estabelece maior compactação do solo associada à redução da capacidade de suporte de carga do solo. Deve-se levar em conta que a amostragem ocorreu entre quatro e cinco meses após o revolvimento do solo. Além disso, com a tensão de 60 hPa, os valores

de poros com ar no preparo convencional podem estar indicando limitação da difusão de oxigênio para as raízes mesmo com umidade do solo disponível, conforme discutido por Tormena et al. (1999a,b).

A microporosidade apresenta dependência espacial com alcance de 7,5 m no plantio direto e 10,5 m no preparo convencional (Figura 1). A microporosidade do solo é uma variável que está ligada diretamente à densidade do solo. O manejo do solo pode modificar proporcionalmente o volume de microporos em razão da alteração na quantidade de macroporos, tornando assim o solo mais ou menos homogêneo e consequentemente com diferentes amplitudes da dependência espacial.

A capacidade de campo apresentou alcance de 7,5 m no plantio direto e 8,5 m no preparo convencional (Figura 1), atribuído à maior homogeneização do solo sob o preparo convencional. Ressalta-se que a quantidade de água armazenada expressa pela capacidade de campo é maior em preparo convencional, o que é coerente com a maior densidade do solo (Quadro 1) e a menor macroporosidade verificadas neste sistema de manejo do solo.

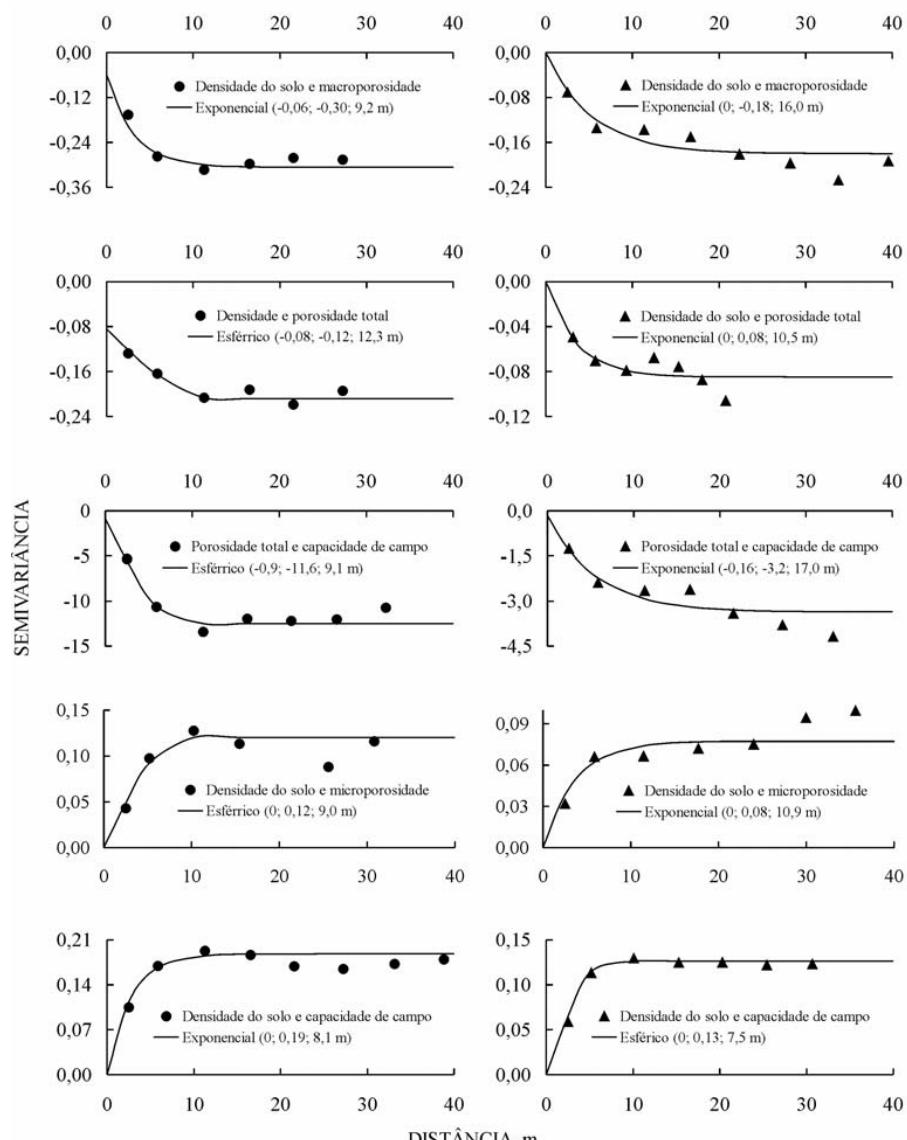
Os semivariogramas cruzados mostraram correlações espacialmente negativas entre densidade do solo e macroporosidade; densidade do solo e porosidade total; e porosidade total e capacidade de campo; e positivamente entre densidade do solo e microporosidade; e densidade do solo e capacidade de campo (Figura 2). Esses resultados mostram que a continuidade espacial dos semivariogramas cruzados diferenciou-se entre as variáveis nos sistemas de manejo de solo no plantio direto e preparo convencional



**Figura 1.** Semivariogramas experimentais simples e modelos matemáticos ajustados à densidade do solo, à macroporosidade, à microporosidade, à porosidade total e à capacidade de campo no plantio direto (○) e no preparo convencional (△). Os valores dentro dos parênteses correspondem, respectivamente, aos efeitos pepita, patamar e alcance.

(Figura 1). Os semivariogramas cruzados entre densidade do solo e macroporosidade; densidade do solo e microporosidade; e porosidade total e capacidade de campo apresentaram maior alcance no preparo convencional (16,0, 10,9 e 17,0 m) do que no plantio direto (9,2, 9,0 e 9,1 m), correspondendo ao padrão de continuidade espacial de cada uma dessas propriedades físicas do solo no preparo convencional e plantio direto (Figura 2). Esses resultados confirmam maior continuidade espacial no preparo convencional imposta pela maior homogeneização da porosidade do solo (macroporosidade, microporosidade e porosidade total), resultante do revolvimento sistemático do solo.

A confrontação dos semivariogramas mostrados na figura 2 revela que os semivariogramas cruzados no plantio direto são altamente dependentes da densidade do solo (densidade do solo e porosidade total; e densidade do solo e capacidade de campo) com alcance no plantio direto (12,3 e 8,1 m) superior ao do preparo convencional (10,5 e 7,5 m). Isto significa que a ausência de revolvimento mecânico no terço médio da camada de 0-15 cm (5-10 cm) de profundidade sob o plantio direto manteve correlação espacial negativa entre densidade do solo e porosidade total com maior alcance. Analogamente, a densidade do solo e o conteúdo de água na capacidade de campo mantiveram



**Figura 2.** Semivariogramas cruzados e modelos matemáticos ajustados (esférico e exponencial) à densidade do solo, à macroporosidade, à microporosidade, à porosidade total e à capacidade de campo no plantio direto (●) e no preparo convencional (▲). Os valores dentro dos parênteses correspondem, respectivamente, aos efeitos pepita, patamar e alcance.

correlação espacial positiva com alcance maior no plantio direto do que no preparo convencional. Isto permite constatar que, independente da magnitude da variabilidade das propriedades físicas do solo, o plantio direto tende a estender as relações de dependência entre as variáveis, no espaço, em distâncias cada vez maiores. No preparo convencional, por outro lado, o revolvimento do sistema dificulta esta organização no mesmo espaço, de maneira gradativa no tempo, uma vez que periodicamente o sistema é revolvido e esta organização é descaracterizada.

## CONCLUSÕES

1. Os semivariogramas simples apresentaram dependência espacial, com maior variabilidade espacial e menor alcance no plantio direto do que no preparo convencional para densidade do solo, microporosidade, macroporosidade, porosidade total e capacidade de campo.

2. Os semivariogramas cruzados apresentaram correlação espacial com menor variabilidade espacial e maior alcance no plantio direto, comparado ao

preparo convencional, entre densidade do solo com porosidade total ou capacidade de campo.

3. Os semivariogramas cruzados evidenciaram que a densidade do solo estabeleceu as correlações espaciais com as outras propriedades físicas nos dois sistemas de manejo do solo.

## LITERATURA CITADA

- BERTOLANI, F.C. & VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:987-995, 2001.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, America Society of Agronomy, 1986. p.363-375.
- BUTTAFUOCO, G.; CASTRIGNANO, A.; BUSONI, E. & DIMASE, A.C. Studying the spatial structure evolution of soil water content using multivariate geostatistics. *J. Hydrol.*, 311:202-218, 2005.
- CAMPOS, H. Estatística experimental não-paramétrica. 4.ed. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1983. 349p.
- CARVALHO, M.P.; TAKEDA, E.Y. & FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitoria Brasil (SP). *R. Bras. Ci. Solo*, 27:695-703, 2003.
- CRUZ, A.C.R.; PAULETTO, E.A.; FLORES, C.A. & SILVA, J.B. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:1105-1112, 2003.
- EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F. & BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil Till. Res.*, 3:261-275, 1983.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (Embrapa-CNPS. Documentos, 1)
- ENGLUND, E. & SPARKS, A. GeoEAS (Geostatistical Environmental Assessment Software) Las Vegas, U.S. Environmental Protecy Agency, 1991. (EPA/600/4-88/033a)
- FALLEIRO, R.M.; SOUZA, C.M.; SILVA, C.S.W.; SEDIYAMA, C.S.; SILVA, A.A. & FAGUNDES, J.L. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:1097-1104, 2003.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A. & OLIVEIRA JÚNIOR, R.S. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e da taxa de estratificação de carbono orgânico do solo em um Latossolo Vermelho eutroférico. *Ci. Rural*, 36:1773-1779, 2006.
- GONÇALVES, A.C.A. Variabilidade espacial de propriedades físicas de solo para fins de manejo da irrigação. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1997. 118p. (Tese de Doutorado)
- GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V. & DA MATA, J.D.V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. *Acta Sci.*, 23:1149-1157, 2001.
- GREGO, C.R. & VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas de solo em uma parcela experimental. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:169-177, 2005.
- GUIMARÃES, E.C. Variabilidade especial de atributos de um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao planto direto e ao plantio convencional. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 2000, 90p. (Tese de Doutorado)
- HAMLETT, J.M.; HORTON, R. & CRESSIE, N.A.C. Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50:868-875, 1986.
- HOLMES, K.W.; KYRIAKIDIS, P.C.; CHADWICK, O.A.; SOARES, J.V. & ROBERTS, D.A. Multi-scale variability in tropical soil nutrients following land-cover change. *Biogeochemistry*, 74:173-203, 2005.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ - IAPAR. Cartas climáticas básicas do Estado do Paraná. Londrina, 1978. 41p.
- ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. *An introduction to applied geostatistics*. New York, Oxford University Press, 1989. 561p.
- JOURNEL, A.G. & HUIJBREGTS, C.J. *Mining geostatistics*. London, Academic Press, 1978. 600p.
- KIEHL, E.J. *Manual de edafologia: Relação solo-água-planta*. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979. 262p.
- KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. Madison, America Society of Agronomy, 1986. p.635-660.
- LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O. & TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:1-12, 1996.
- MCBRATNEY, A.B. & WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *J. Soil Sci.*, 37:617-639, 1986.
- MILLER, M.P.; SINGER, M.J. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1133-1141, 1988.
- PANNATIER, Y. *VARIOWIN: Software for spatial data analysis in 2D*. New York, Springer, 1996. 96p.
- REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo, Manole, 1988. 188p.
- SAS Institute. *SAS User's guide; Statistics*. 5.ed. Cary, 1999. 956p.
- SEPASKHAN, A.R.; AHMADI, S.H. & NIKBAKHT SHAHBAZI, A.R. Geostatistical analysis of sortivity for a soil under tilled and no-tilled conditions. *Soil Till. Res.*, 83:237-245, 2005

- SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & BENTO, M.J.C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 28:51-58, 2004.
- SOUZA, L.M.; SILVA, M.L.S.; GUIMARÃES, G.L.; CAMPOS, D.T.S.; CARVALHO, M.P. & PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). *R. Bras. Ci. Solo*, 25:699-707, 2001.
- SOUZA, L.S.; COGO, N.P. & VIEIRA, S.R. Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica no solo em relação a sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:77-86, 1998.
- STATSOFT, INC. STATISTICA for windows:Computer program manual. Tulsa, 2000.
- STONE, L.F. & SILVEIRA, P.M. Efeito do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:395-401, 2001.
- TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. & SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:301-309, 1998.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; GONÇALVES, A.C.A. & FOLEGATTI, M.V. Intervalo ótimo de potencial da água no solo: Um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 3:286-292, 1999a.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisoil under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Till. Res.*, 52:223-232, 1999b.
- TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S. & UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.*, 38:45-94, 1985.
- VAUCLIN, S.; VIEIRA, S.R.; VACHAUD, G. & NIELSEN, D.R. The use of cokriging with limited field soil observations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:175-184, 1983.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2000. v.1. p.1-54.
- VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45:1040-1048, 1981.
- WEBSTER, R. & OLIVER, M.A. Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford, Oxford University Press, 1990.
- WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Adv. Soil Sci.*, 3:1-70, 1985.
- WILLIANS, S.M. & WEIL, R.R. Cover crops root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:1403-1409, 2004.