



You are free: to copy, distribute and transmit the work; to adapt the work.  
You must attribute the work in the manner specified by the author or licensor

## ANÁLISE ESPACIAL DA DENSIDADE, UMIDADE E RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO SOB SISTEMAS DE CULTIVO<sup>1</sup>

José Marcílio da Silva<sup>2</sup>; Antonio da Lapa Rocha Passos<sup>3</sup>; Fabiana Augusta Santiago Beltrão<sup>4</sup>

### RESUMO

O estudo objetivou avaliar a resistência mecânica do solo à penetração em duas profundidades em sistema de cultivo direto e convencional, em área de cerrado, através da estatística clássica e da geoestatística na análise dos dados. Foram abordados aspectos básicos da geoestatística, com ênfase na análise de semivariograma como metodologia para determinação da variabilidade espacial. A área de pesquisa foi constituída de dois talhões de 40 x 55m definidos com malha regular de 44 pontos espaçados 5 m. Os resultados indicam baixo coeficiente de variação para resistência mecânica do solo à penetração na profundidade 20-40 cm nos dois sistemas, e para umidade do solo e densidade nos dois sistemas de cultivo nas duas profundidades e médio para resistência mecânica do solo à penetração nos dois sistemas na profundidade 0-20 cm. A análise dos semivariogramas indica moderado índice de dependência espacial para umidade e densidade do solo com alcance de 17,30m e 11,10m no plantio direto e preparo convencional na profundidade de 0-20 cm respectivamente, e forte para densidade e resistência mecânica do solo à penetração no plantio direto com alcance de 15,90 m e 27,30 m na profundidade de 0-20 cm, respectivamente e de 26,50 m na profundidade de 20-40 cm para resistência à penetração.

**Palavras-chave:** Geoestatística; variabilidade espacial; compactação do solo.

### SPATIAL ANALYSIS OF DENSITY, HUMIDITY AND MECHANICAL RESISTANCE OF SOIL TO PENETRATION UNDER CULTIVATION SYSTEMS

### ABSTRACT

The study it aimed to evaluate the soil mechanical resistance to penetration in two depths in cultivation system, no-tillage and conventional-tillage in savannah area through the classic statistics and the geostatistics in the analysis of the data. Basic aspects of the geostatistics were considered, with emphasis in the semivariogram analysis as methodology for determination of the spatial variability. The research area was constituted of two plots of 40 x 55m regular grid with 44 points spaced 5m. Data were collected from 0 to 20 and 20 to 40 depth layers. Results indicates low coefficient of variation for mechanical resistance of the soil to penetration at 20 to 40cm in the two systems, and for soil humidity and density in the two cultivation systems in the two depths. For soil mechanical resistance to penetration CV were medium in the two systems in the depth of 0 to 20cm. The semivariograms analysis indicates moderate valve for the index of spatial dependence for soil humidity and density with range of 17,30m and 11,10m in the no-tillage and conventional-tillage in the depth of 0 to 20cm respectively, and strong for density and mechanical resistance of the soil to the penetration in the no-tillage with range of 27,30m in the depth of 0 to 20cm respectively, and of 26,50m in the depth of 20 to 40cm for resistance the penetration.

**Key words:** Geostatistic; spatial variability; soil compaction.

Trabalho recebido em 27/05/2009 e aceito para publicação em 18/09/2009.

<sup>1</sup> Parte da Dissertação do Primeiro Autor apresentado ao PPGPV, CCA-UFES, Alegre-ES.

<sup>2</sup> Prof<sup>o</sup> M.Sc. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), Campus Barreiros, Fazenda Sapé S/N, Zona Rural, CEP 55560-000. e-mail: marciliocilo@yahoo.com.br

<sup>3</sup> Prof<sup>o</sup> M.Sc. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO). Doutorando na Universidade Autônoma de Assunção (UAA), Assunção, PY. e-mail: dalapa7a@hotmail.com

<sup>4</sup> Prof<sup>o</sup> M.Sc. Colégio Agrícola "Vital de Negreiros", Universidade Federal da Paraíba, (CAVN/UFPB), Bananeiras, PB. e-mail: fasb.15@hotmail.com

## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de manejo do solo apresentam grande influência nas características físicas do solo e estão relacionados com a compactação que é um processo de densificação na qual há um aumento da resistência do solo, reduzindo sua porosidade, permeabilidade bem como a disponibilidade de nutrientes e água. A resistência mecânica do solo à penetração (RP) pode limitar o crescimento e o desenvolvimento do sistema radicular e diminuir a produtividade das culturas. A densidade do solo (Ds) é considerada o atributo físico mais comum de avaliação de compactação de solos em experimentos sobre plantio direto e preparo convencional de solo. Embora, não seja sensível para detectar a condição física do solo como afirmam McGarry et al. (2000). A Ds tem sido um dos atributos usados para avaliação do estado estrutural do solo.

O sistema plantio direto (PD) é uma das mais eficientes estratégias para a melhoria da qualidade e do potencial produtivo do solo agrícola (AMADO et al., 2007), pois representa a mais significativa alteração no manejo de solos da história moderna da agricultura. Este sistema envolve o uso de técnicas para produzir, preservando a qualidade ambiental, fundamentando-se na ausência de preparo do solo e na presença de cobertura permanente sobre o terreno, através de

rotação de culturas (MACHADO et al., 2004).

O sistema de preparo convencional (PC), por sua vez, promove maior aeração, quebra dos agregados do solo e a incorporação dos resíduos vegetais provocando rápida decomposição e perda do carbono orgânico, assim como uma mineralização do nitrogênio e do fósforo orgânico existente no solo (HOLTZ, 1995). Devido à maior quantidade de matéria orgânica e atividade biológica na superfície, a estrutura de solos sob PD pode ser mais favorável ao crescimento e desenvolvimento de plantas do que em solos cultivados convencionalmente, com igual ou maior densidade do solo (SILVA et al., 2000).

Enquanto os sistemas tradicionais tratam as propriedades agrícolas de forma homogênea, tomando como base as condições médias das extensas áreas de produção para programar as ações corretivas dos fatores limitantes, a agricultura de precisão contempla a variabilidade espaço-temporal desses fatores para a tomada de decisão (MANTOVANI et al., 2009), com aplicação de insumos em locais específicos, dividindo-se os campos inteiros em zonas de manejo menores e homogêneas.

A análise geoestatística constitui importante ferramenta na análise e

descrição da variabilidade das propriedades do solo (VIEIRA, 2002; CARVALHO et al 2002), e o uso de métodos geoestatísticos contribui para mostrar que o manejo adotado no solo influencia de forma diferente a variabilidade espacial dos atributos do solo (SILVA et al., 2008).

Neste aspecto, objetivou-se avaliar a variabilidade espacial da densidade e umidade do solo e da resistência mecânica à penetração em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico em sistema plantio direto e preparo convencional no cerrado, sob a égide da estatística clássica e da geoestatística na análise dos dados.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Fazenda Monte Alegre, localizada no município de Rio Verde, Goiás, em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico, textura argilosa (EMBRAPA, 2006), cujas coordenadas estão situadas geograficamente entre 17°29'24'' a 17°30'36'' de Latitude Sul (S) e 51°23'24'' a 51°24'36'' de Longitude Oeste (W), com altitude média de 748 m e topografia plana a levemente ondulada com declividade próximo de 3%. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima predominante na região é do tipo tropical

de Savana (Aw), com precipitação média anual de 1.500 mm.

Foram selecionados dois talhões com 2.200 m<sup>2</sup> cada, sendo um conduzido em plantio direto (PD) e o outro com preparo convencional do solo (PC). Realizou-se para cada talhão levantamento por amostragem em uma malha regular com as dimensões de 40 x 55m, totalizando 44 pontos em cada área, sendo que a menor distância entre amostras foi de 5m. O espaçamento de 5m foi adotado para se garantir a existência de estacionaridade intrínseca e gerar um número mínimo de 30 pares para cada distância estudada, para utilizar a geoestatística (CRESSIE, 1991).

A área estava sendo cultivada com soja (*Glycine max* (L.) Merrill) por dez anos em monocultivo, sob PD. Após este período, antes da semeadura da soja, foram selecionados dois talhões; no primeiro, continuou-se com o PD e no segundo, foi realizado o preparo do solo com auxílio de uma grade aradora na profundidade de aproximadamente 20 cm. Nos últimos cinco anos, na área sob PD, a soja foi cultivada no verão e sucedida pelo milheto na safrinha.

As determinações da RP e da umidade do solo foram realizadas em cada ponto de amostragem da malha regular, com cinco repetições, utilizando-se um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf (STOLF et al.,

1983) até a profundidade de 40 cm. Determinou-se a resistência mecânica do solo à penetração através da Equação 1 (STOLF, 1991). No momento da determinação da RP, após a realização da colheita da soja, coletaram-se amostras de solo deformadas fazendo-se uso de trado calador nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm nos 44 pontos distanciados de 5,0 m, em cada talhão para a determinação da umidade do solo, e amostras de solo indeformadas com auxílio do amostrador de Uhland, pelo método regionalizado, nas mesmas profundidades para determinação da densidade do solo, segundo metodologia de Embrapa (1997).

$$RP = \{5,6 + (68,9 / (P / N))\} / 10,2 \quad (1)$$

em que: RP = Resistência mecânica do solo à penetração (MPa); N = número de impactos (golpes) por camada de solo analisada; P = profundidade de penetração do penetrômetro (cm).

A estatística clássica foi aplicada às variáveis estudadas, antes da análise geoestatística, para obtenção das medidas de posição (média, mediana, valores máximo e mínimo) e dispersão (variância, desvio padrão e coeficiente de variação, assimetria e curtose). Para análise da hipótese de normalidade dos dados foi utilizado o teste Shapiro-Wilk's (W) ( $p \leq 0,05$ ). Os valores dos atributos físicos do solo nos dois sistemas e nas diferentes

profundidades foram comparados pelo teste t-Student ( $p \leq 0,05$ ).

O grau de dependência espacial foi realizado utilizando-se o *software* GS+ (ROBERTSON, 2000) para determinação dos semivariogramas experimentais (Equação 2).

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

em que:  $\gamma^*(h)$  é a semivariância experimental, obtida pelos valores amostrados  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i + h)$ ;  $N(h)$  é o número de pares de valores medidos;  $h$  é a distância entre pontos amostrais.

No ajuste dos semivariogramas teóricos aos dados testaram-se os seguintes modelos: esférico, exponencial, gaussiano e linear. Os semivariogramas foram escalonados pela variância dos dados no sentido de padronizar a escala, determinando os seguintes parâmetros: efeito pepita ( $C_0$ ), patamar ( $C_0 + C_1$ ) e alcance (a). Os valores do grau de dependência espacial, segundo Tringmar et al. (1987), são apresentados como porcentagem do patamar para facilitar a comparação do grau de dependência espacial (GD) que foi classificado segundo Cambardella et al. (1994), na qual um atributo pode ser considerado exibindo alta (forte), moderada ou baixa (fraca) dependência espacial, em função da relação entre o efeito pepita e o patamar de

seu semivariograma ajustado. Valores inferiores a 25% caracterizam alta dependência espacial, entre 25% e 75% moderada dependência espacial e superior a 75%, baixa dependência espacial. O coeficiente de variação (CV) foi classificado segundo proposta de Warrick e Nielsen (1998), na qual um atributo apresenta-se com baixa variação para  $CV < 15\%$ , média para o intervalo ( $15\% \leq CV < 50\%$ ) e alta variabilidade quando  $CV \geq 50\%$ .

Verificada a dependência espacial entre as variáveis estudadas, fez-se interpolação pelo método de krigagem ordinária para estimar valores em locais não amostrados, considerando *pixel* de 50 cm x 50 cm. A partir da krigagem foram gerados mapas para os atributos que apresentaram variabilidade espacial para identificar as diferentes zonas homogêneas de manejo. Para as variáveis que apresentaram efeito pepita puro (EPP), ou seja, ausência de dependência espacial e aquelas com alcance reduzido realizou-se o teste t-Student em nível de 5% de probabilidade, com intuito de comparar as médias de tais variáveis entre as duas profundidades estudadas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise descritiva dos parâmetros: média, mediana, mínimo, máximo, desvio-padrão ( $\bar{\sigma}$ ), coeficientes de

variação (CV), curtose ( $C_K$ ), assimetria ( $C_S$ ) e o teste Shapiro-Wilk's (W) para determinação da densidade do solo (Ds), umidade do solo (U) e resistência mecânica do solo à penetração (RP) avaliados nos dois sistemas de cultivo, direto e convencional, estão apresentados na Tabela 1. Os valores foram comparados na mesma profundidade a partir da média obtida de 44 pontos de amostragem, indicando distribuição normal, exceto para umidade do solo nos dois sistemas de cultivo na profundidade de 20-40 cm. Observa-se que os valores da média e mediana, para as três variáveis, estão próximos, mostrando distribuições simétricas, o que pode ser confirmado pelos valores de coeficiente de assimetria ( $C_S$ ) próximo de zero, com exceção da umidade do solo (U) no PD, na profundidade de 20-40 cm, que apresentou valor positivo, pela normalidade dos dados pelo teste Shapiro-Wilk's ( $p \leq 0,05\%$ ).

Segundo Carvalho et al. (2002), valores de assimetria e curtose de zero e três, indicam a normalidade dos dados, respectivamente. Entretanto, de acordo com Cressie (1991), a normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, é conveniente apenas que no gráfico de distribuição normal, os atributos não apresentem extremidades muito

alongadas, o que poderia comprometer as análises.

A RP, nas duas profundidades no PD, apresenta média maior que a mediana, portanto, assimetria positiva e no PC este atributo apresenta comportamento contrário. Para a RP, a assimetria dos dados varia de -0,25 a 0,51 e para a umidade do solo varia de -1,19 a 3,54 e a curtose tem uma variação entre os valores de -1,01 a 0,72 para a RP e entre -0,27 a 3,23 para a U, resultando para o atributo RP todos os dados com distribuição normal, e para U 50% com distribuição não definida.

A RP apresenta valores significativos entre os dois sistemas para uma mesma profundidade. Na profundidade de 0-20 cm o maior valor foi encontrado no PD, que apresenta maior estado de compactação, podendo ter ocorrido devido ao não revolvimento do solo por 15 anos. Valores semelhantes foram encontrados por Klepker; Anghinoni (1995), em solos afetados por métodos de preparo e modos de adubação, e por Silva et al. (2000), em estudo influenciado pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. Na profundidade de 20-40 cm, a RP foi maior no PC. Esse alto valor pode ser atribuído ao não aprofundamento suficiente da grade aradora por ocasião do preparo do solo neste sistema.

A RP apresentou valores médios de 2,53 e 2,92 MPa no PC e PD na profundidade de 0-20 cm, respectivamente. Na profundidade de 20-40 cm os valores foram de 4,59 MPa no PC e 4,00 MPa no PD. Estes resultados estão acima do limite de 2,0 MPa, especificado por Tormena & Roloff (1996), como solo compactado, estando de acordo com Silva et al (2000). Por outro lado, os valores encontrados neste trabalho encontram-se menores do que os obtidos por Souza et al. (2004), em estudo realizado em áreas com pequenas variações da pedofoma em um LATOSSOLO VERMELHO eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar, encontraram valores médios de 4,40 MPa na profundidade de 0-20 cm e na profundidade de 20-40 cm valores médios de 5,11 MPa, valores considerados altos para Latossolos. Para Vepraskas & Miner (1986 apud Silva et al. (2000), valores de resistência à penetração entre 2,8 a 3,2 MPa retardam a elongação das raízes e com 4,0 MPa não há crescimento de raízes. Segundo Canarache (1990) e Merotto et al. (1999), um solo com resistência variando de 1,0 a 3,5 MPa poderá restringir o crescimento e desenvolvimento de raízes. Entretanto, Torres & Saraiva (1999), Sene et al. (1985), Nesmith (1987), estabeleceram o valor até 3,5 MPa como baixo e 6,5 MPa como limite máximo da

compactação restringindo o desenvolvimento radicular de plantas.

Verificou-se que o coeficiente de variação (CV) apresentou baixa variação no sistema PC (2,60%) para Ds na profundidade de 20-40 cm e o maior CV foi observado no sistema PD (19,50%) para o atributo RP na profundidade de 0-20 cm (Tabela 1), sendo considerado com média variação segundo a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1998).

Os resultados obtidos neste trabalho para o atributo U (Tabela 1), estão de acordo com os obtidos por Souza et al. (2004), que encontraram 8,68% na profundidade de 0-20cm e 9,94% na profundidade de 20-40cm em estudo realizado sob cultivo de cana-de-açúcar. Adotando o critério de classificação para o CV proposto por Warrick & Nielsen (1998), para medida de dispersão, seus valores são: baixos ( $CV < 15\%$ ) para os atributos físicos U e Ds nas duas profundidades (100% dos dados) nos dois sistemas e para RP nos dois sistemas na profundidade de 20-40 cm (50% dos dados); médios ( $15\% \leq CV < 50\%$ ) para RP nos dois sistemas na profundidade 0-20 cm, com 50% dos dados; e nenhum atributo físico se enquadra na classe de alta variação ( $CV \geq 50\%$ ), indicando baixa dispersão dos atributos avaliados. Por outro lado, Souza et al. (2004), encontraram CV médio para a variável RP

nas profundidades de 0-20 cm (38,73%) e 20-40cm (28,12%). Como a média aritmética dos dados é uma medida de posição que representa o conjunto de dados dos valores de determinado atributo, e é tanto menos representativa quanto maior for à variação em torno dela, que por sua vez é medida pelo coeficiente de variação, pode-se afirmar que há baixa variabilidade dos atributos físicos avaliados.

A Ds e U do solo, nos dois sistemas de cultivos avaliados, nas duas profundidades, apresentaram valores médios baixos, porém significativamente diferentes, exceto Ds na profundidade de 20-40 cm (Tabela 1), mostrando que nessa camada de solo o preparo não alterou a sua camada, contribuindo para sua diminuição no PC até a profundidade de 20 cm. Resultados semelhantes foi encontrado por Silva et al. (2008), em um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no cultivo da soja no cerrado. Nesse caso, observa-se maior valor de Ds e U no PD, indicando influência do maior volume de microporos nesse sistema, o que pode ser beneficiado pelo acúmulo de palhada na superfície do solo, proporcionando maior armazenamento de água nos microporos. Em ambas as profundidades, os valores estavam próximos, não interferindo na análise da resistência à penetração do solo altamente influenciada pela umidade. Guimarães (2000) observou que em solo

revolvido há um volume maior de macroporos, diminuindo assim a umidade no solo. Resultados semelhantes foi encontrado por Canalli & Roloff (1997),

como também por Da Ros et al. (1997), que verificaram, durante cinco anos, que a menor Ds ocorreu no PC em relação ao PD em três camadas entre 0-21 cm.

**Tabela 1** - Estatística descritiva de atributos físicos do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna na mesma profundidade nos dois sistemas não diferem significativamente entre si, ao nível de 5%, pelo teste t.  $\delta$ : Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação;  $C_s$ : Coeficiente de assimetria;  $C_k$ : Coeficiente de curtose; \*: Distribuição normal; e \*\*: Distribuição não definida pelo teste Shapiro-Wilk's ao nível de 5% de probabilidade. RP: Resistência Mecânica do Solo à Penetração e U: Umidade do solo.

	Sistema	Média	Mediana	$\delta$	Valores		Coeficientes			W p
					Mínimo	Máximo	CV	$C_s$	$C_k$	
<b>Profundidade de 0-20 cm</b>										
<b>Ds (kg dm<sup>-3</sup>)</b>	PD	1,09a	1,09	0,05	1,00	1,20	4,63	0,28	-0,65	*
	PC	1,06b	1,06	0,05	0,97	1,15	4,25	-0,23	-0,56	*
<b>RP (MPa)</b>	PD	2,92a	2,87	0,57	1,72	4,36	19,50	0,51	0,72	*
	PC	2,53b	2,56	0,48	1,54	3,37	18,97	-0,25	-0,79	*
<b>U (g g<sup>-1</sup>)</b>	PD	0,24a	0,24	0,02	0,19	0,28	8,35	-0,21	-0,27	*
	PC	0,21b	0,22	0,01	0,17	0,23	9,47	-1,19	0,32	*
<b>Profundidade de 20-40 cm</b>										
<b>Ds (kg dm<sup>-3</sup>)</b>	PD	1,14a	1,14	0,04	1,06	1,27	3,51	0,55	1,29	*
	PC	1,15a	1,16	0,03	1,10	1,22	2,60	0,08	-0,67	*
<b>RP (MPa)</b>	PD	4,00b	3,97	0,55	2,94	5,36	13,75	0,25	-0,21	*
	PC	4,59a	4,64	0,51	3,56	5,43	11,11	-0,28	-1,01	*
<b>U (g g<sup>-1</sup>)</b>	PD	0,29a	0,27	0,11	0,15	0,77	6,97	3,54	13,23	**
	PC	0,23b	0,23	0,01	0,21	0,25	8,69	-0,95	1,30	**

Na Figura 1 observa-se a análise espacial dos parâmetros de ajustes dos semivariogramas escalonados para os atributos físicos avaliados no PC nas duas profundidades. Verifica-se que ocorreu ajuste apenas para o modelo esférico (ESF) para o atributo Ds nas duas profundidades em estudo, com alcance de 11,1m (0-20 cm) e 16,5m (20-40 cm), com valor do efeito pepita superior a 25% e inferior a 75% do valor do patamar na profundidade de 0-20 cm, apresentando uma moderada

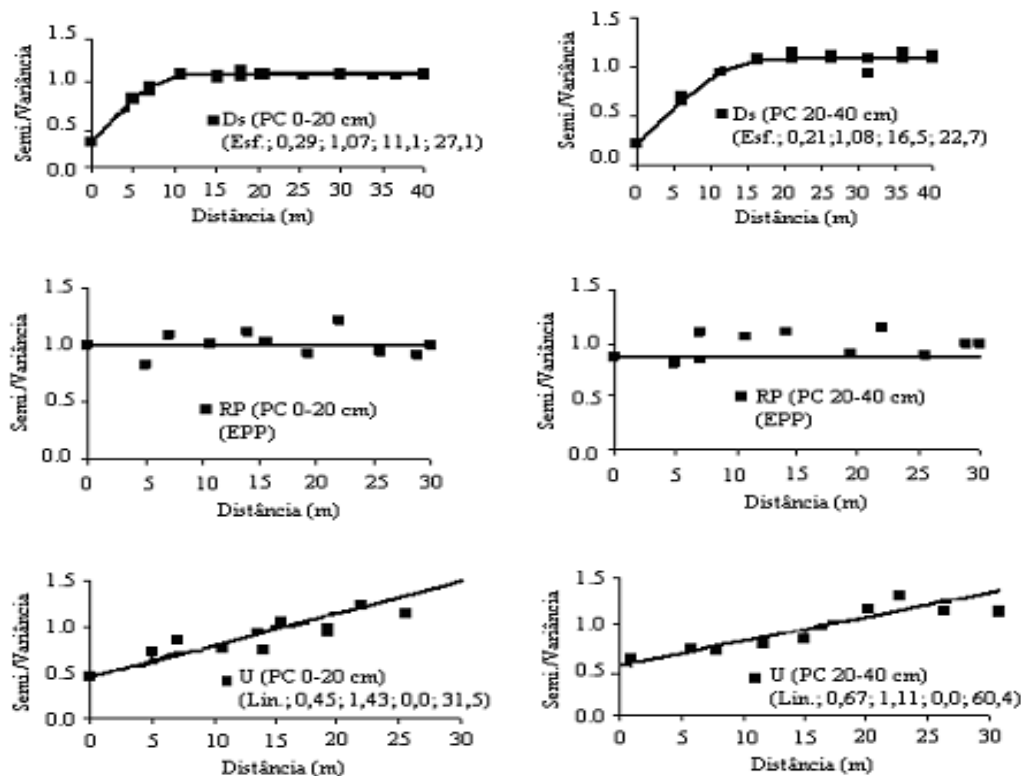
dependência espacial; e com valor do efeito pepita inferior a 25% do valor do patamar na profundidade de 20-40 cm, apresentando alto grau de dependência espacial, segundo metodologia adotada por Cambardella et al. (1994). O atributo RP, nesse sistema (PC), apresenta efeito pepita puro (EPP), indicando ausência de dependência espacial e a U ajusta-se ao modelo linear sem patamar (LIN) nas duas profundidades apresentando uma moderada dependência espacial, indicando que o



tamanho da amostra não foi suficiente para exibir a estacionaridade intrínseca dos dados (GUIMARÃES, 2000, VIEIRA, 2002).

O ajuste do EPP ao semivariograma experimental para alguns atributos, em diferentes profundidades e nos manejos indica ausência de dependência espacial

para distâncias maiores que a menor adotada na amostragem (5,0 m) (SILVA et al., 2008). No caso de ajuste ao modelo LIN, não foram construídos os mapas temáticos para esse atributo devido não ter proporcionado uma definição do patamar na escala adotada.



**Figura 1** – Modelos e parâmetros ( $C_0$ ;  $C_0 + C_1$ ;  $a$ ; GD) dos semivariogramas escalonados da Ds ( $\text{kg dm}^{-1}$ ), RP (MPa) e U ( $\text{g g}^{-1}$ ) no preparo convencional (PC) nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

Na Figura 2 observa-se a análise espacial dos parâmetros de ajustes dos semivariogramas escalonados para os atributos físicos avaliados no PD nas duas profundidades. Verifica-se que ocorreu ajuste para os modelos exponencial (EXP) para os atributos Ds na profundidade de 0-20 cm e RP nas duas profundidades em

estudo, e para o modelo esférico (ESF) para o atributo U na profundidade de 0-20 cm. Na profundidade de 20-40 cm os atributos Ds e U apresentaram efeito pepita puro (EPP).

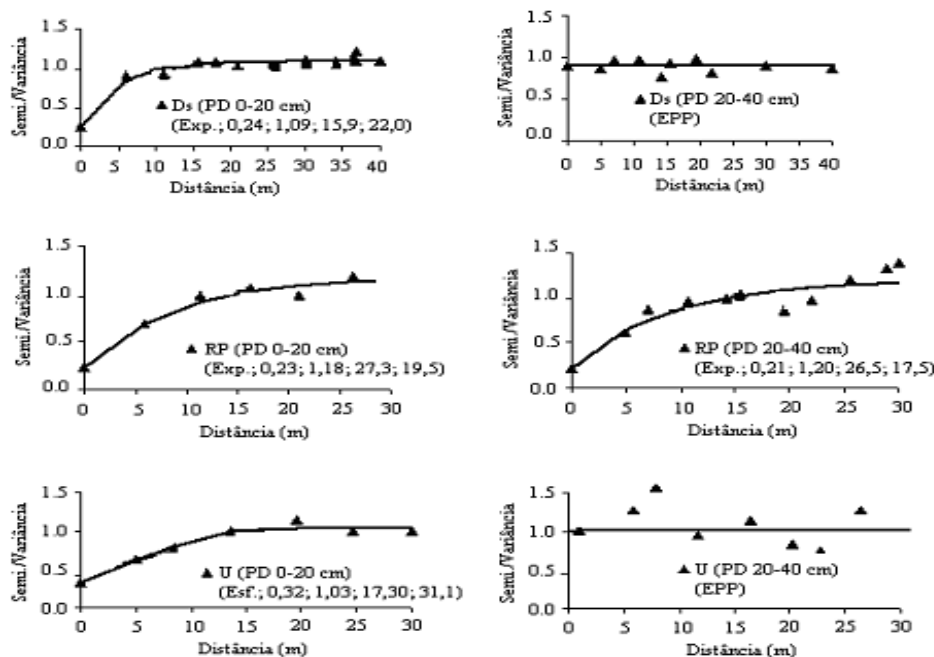
Com alcance de 15,9 m a Ds na profundidade de 0-20 cm, com valor do efeito pepita inferior a 25% do valor do

patamar, apresenta uma alta (forte) dependência espacial, o mesmo ocorrendo com a RP com alcances de 27,3 m na profundidade de 0-20 cm e de 26,5 m na profundidade de 20-40 cm, com o mesmo padrão de dependência espacial, com valor do efeito pepita inferior a 25% do valor do patamar com alta dependência espacial, segundo metodologia adotada por Cambardella et al. (1994). Estes resultados corroboram com os encontrados por Mercante et al.(2003), que ajustaram os parâmetros dos semivariogramas escalonados para a RP ao modelo EXP em

áreas com e sem as técnicas de agricultura de precisão.

A U apresenta um alcance de 17,3 m, com valor do efeito pepita superior a 25% e inferior a 75% do valor do patamar na profundidade de 0-20 cm, apresentando um grau de dependência espacial moderado.

Segundo Guimarães (2000) e Vieira (2002), para os atributos que apresentaram ausência de dependência espacial, indicam que o tamanho da amostra não foi suficiente para exibir a estacionaridade intrínseca dos dados.



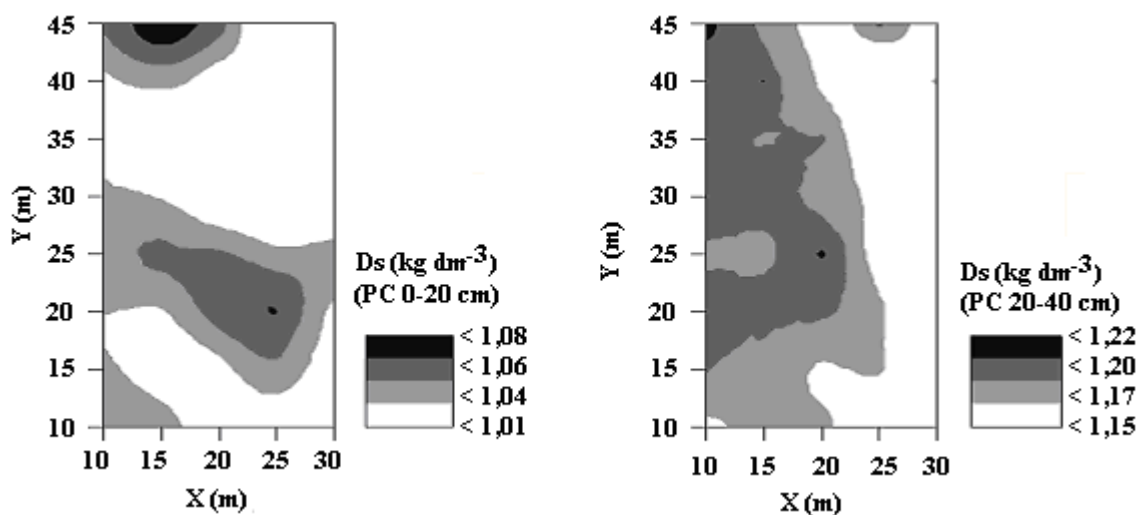
**Figura 2** – Modelos e parâmetros ( $C_0$ ;  $C_0 + C_1$ ; a; GD) dos semivariogramas escalonados da Ds ( $\text{kg dm}^{-1}$ ), RP (MPa) e U ( $\text{g g}^{-1}$ ) no plantio direto (PD) nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

A Figura 3 apresenta os mapas interpolados, no sistema PC, da variabilidade espacial da Ds nas

profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm. Observa-se que as regiões de maiores valores de Ds encontram-se na parte

inferior e esquerda de baixo para cima da área, com maior concentração na profundidade de 20-40 cm. De acordo com Silva et al. (2008), o revolvimento do solo na profundidade de trabalho da grade aradora no PC (0-20 cm) pode ter

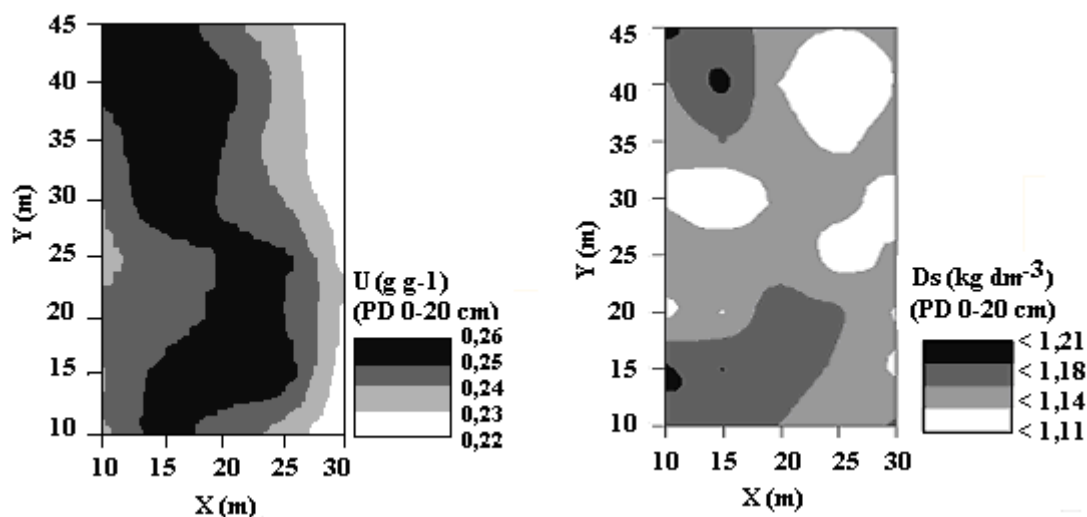
contribuído para a diminuição da Ds na profundidade de até 20 cm, o que não foi verificado na camada de 20-40 cm, devido sua estrutura não ser alterada mecanicamente.



**Figura 3** – Mapa de krigagem da densidade do solo (Ds) no preparo convencional (PC) nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

A Figura 4 apresenta os mapas interpolados, no sistema PD, da variabilidade espacial da U, Ds na profundidade de 0-20 cm e RP nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm. Observa-se que a Ds apresenta-se com maior distribuição espacial na área em estudo, verifica-se que onde há maior concentração, é devido, provavelmente, ao não revolvimento do solo na camada superficial (até 20 cm). No mapa da RP uma distribuição com maiores valores de compactação do solo no setor esquerdo e

pequena distribuição no setor direito, de baixo para cima, nas duas profundidades estudadas. Apresenta também o mesmo padrão de dependência espacial e forte semelhança entre o mapa temático de distribuição apresentado no atributo U, com maior distribuição no centro da área. Resultados semelhantes foram encontrados por Zanette et al. (2007), em estudo da umidade do solo, na profundidade de 15 cm e 30 cm, cultivado com soja sob sistema de manejo plantio direto e preparo convencional.



**Figura 4** – Mapa de krigagem da umidade do solo (U), densidade do solo (Ds) e resistência à penetração (RP) no plantio direto (PD) nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

#### 4. CONCLUSÕES

A densidade do solo no preparo convencional apresenta uma moderada e alta dependência espacial nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm, respectivamente e no plantio direto um forte grau de dependência espacial na profundidade de 0-20 cm, com ausência de dependência (EPP) na profundidade de 20-40 cm.

A variável resistência à penetração do solo no sistema preparo convencional não foi suficiente para determinação da dependência espacial apresentando ausência de dependência espacial.

A variável resistência à penetração do solo apresenta variabilidade espacial com comportamento distinto conforme o cultivo e a profundidade com forte grau de

dependência no sistema plantio direto nas duas profundidades.

A variável umidade do solo apresenta um moderado índice de dependência espacial nos dois sistemas de cultivo nas duas profundidades, exceto no PD na profundidade de 20-40 cm.

As duas formas de cultivo não influenciaram a dependência espacial da resistência à penetração do solo.

Os semivariogramas escalonados indicaram variação nos dois sistemas de cultivo na determinação da variabilidade espacial.

#### 5. AGRADECIMENTOS

À FESURV – Universidade de Rio Verde, GO pelo espaço físico para elaboração das atividades, e a COMIGO, Rio Verde, GO, pela concessão da área de estudo.

## 6. REFERÊNCIAS

- AMADO, T.J.C.; NICOLOSO, R.S.; LANZANOVA, M.; SANTI, A.L.; LOUVATO, T. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 42, n.8, p. 1101-1110, 2007.
- CAMBARDELLA, C.A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n.05, p. 1501-1511, 1994.
- CANALLI, L.B.; ROLOFF, G. Influencia do prepare e da conservação do solo na condição hídrica de um latossolo vermelho-escuro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n.1, p. 1-6, 1997.
- CANARACHE, A. Penetr-a generalized semiempirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil & Tillage Research**, v.16, p.51-70, 1990.
- CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, 2002.
- CRESSIE, N.A. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1991. 900p.
- DA ROS, C.O.; SECCO, D.; FIORIN, J.E.; PETRERE, C.; CADORE, M.A.; PASSA, L. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 241-247, 1997.
- EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1997. 212 p.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA Serviço de Produção de Informação, Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006. 306 p.
- GUIMARÃES, E.C. **Variabilidade especial de atributos de um latossolo vermelho escuro textura argilosa na região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional**. Campinas – SP, 2000. 92 f. Tese (Doutorado em Engenharia

- Agrícola) – Área de concentração: Água e Solo. Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, Campinas, 2000.
- HOLTZ, G.P. **Dinâmica da decomposição da palha e da distribuição do carbono, nitrogênio e fósforo numa rotação de culturas sob plantio direto na região de Carambei (PR)**. Curitiba – PR, 1995. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Área de concentração: Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.
- KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 395-401, 1995.
- MACHADO, P.L.O. de A.; BERNARDI, A.C. de C.; SILVA, C.A.; CARMO, C.A.F. de S. do.; MEIRELLES, M.S.P.; MANZATTO, C.V. Estudo de caso em agricultura de precisão: manejo de lavoura de soja na região de campos gerais, PR. In: MACHADO, P.L.O. de A.; BERNARDI, A.C. de C.; SILVA, C.A. (Ed.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. (Ed.). Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2004. p. 93-113.
- MANTOVANI, E. C.; COELHO, A. M.; MATOSO, M. J. Agricultura de precisão. In: EMBRAPA. **Artigos...** Disponível em: <[http://www.embrapa.br/noticias/artigos/folder.2005-02-02.1550581232/ArtigoAgriculturaPrecisao/mostra\\_artigo](http://www.embrapa.br/noticias/artigos/folder.2005-02-02.1550581232/ArtigoAgriculturaPrecisao/mostra_artigo)>. Acesso em: 29 abr. 2009.
- McGARRY, D.; BRIDG, B.J.; RADFORD, B.J. Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid tropics. **Soil & Tillage Research**, v.53, p.105-115, 2000.
- MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M.A.; SOUZA, E.G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.1149-1159, 2003.
- MEROTTO JUNIOR, A.; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista**

- Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.197-202, 1999.
- NESMITH, D.S. Soil compaction in double cropped wheat and soybean on Ultissol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p. 183-186, 1987.
- ROBERTSON, G.P. **GS+ Geostatistics for the environmental sciences: GS+ User's Guide Version 5**. Plainwell: Gamma Design Software, 2000. 200 p.
- SENE, M.; VEPRASKAS, M. J.; NADERMAN, G. C.; DENTON, H. P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p.422-427, 1985.
- SILVA, J.M.; LIMA, J.S.S.; PIRES, F.R.; ASSIS, R.L. Variabilidade espacial dos atributos físicos em um latossolo sob plantio direto e preparo convencional no cultivo da soja no cerrado. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, n. 50, p. 167-180, jul./dez. 2008.
- SILVA, V.R. da.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dos sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.5, p.795-801, 2000.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.6, p. 937-944, 2004.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, p.229-235, 1991.
- STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V.L. Recomendações para uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR/STOLF. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 1, n. 3, p.18-23, 1983.
- TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 333-339, 1996.
- TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camada de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: EMBRAPA Soja, 1999. 58 p. (Circular Técnico, 23).

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; WADE, M.K.; UEHARA, G.; SUDJADI, M. Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.51, p. 668-674, 1987.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2002, v.1, p.1-54.

ZANETTE, S.V.; SAMPAIO, S.C.; SILVESTRE, M.G.; BOAS, M.A.V.; URIBE-OPAZO, M.A.; QUEIROZ, M.M.F. de. *Análise espacial da umidade do solo*

cultivado com soja sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.3, p.239-247, 2007.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. **Environmental soil physics**. New York: Academic, 1998. p.655-675.