

ASPECTOS LINEARES E ESPACIAIS DA CORRELAÇÃO ENTRE A PRODUTIVIDADE DE FORRAGEM DE MILHO E A POROSIDADE DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO

RONALDO C. LIMA¹, LUIZ M. M. DE MELLO², MOREL DE P. E. CARVALHO²,
CESAR G. DA R. LIMA³, ARTHUR M. DE MELLO⁴

RESUMO: A porosidade do solo é de extrema importância à produtividade agrícola, uma vez que, em condições adversas, pode dificultar a penetração das raízes e, conseqüentemente, limitar o adequado aproveitamento dos nutrientes e da água disponível. Na Fazenda Bonança, em Pereira Barreto - SP, em 2005, foi analisada a produtividade de forragem do milho (MSF), a macroporosidade (MA), a microporosidade (MI) e a porosidade total (PT) de um Latossolo Vermelho distrófico (Acrustox Háptico), sob plantio direto, em três profundidades. O objetivo foi estudar as correlações lineares e espaciais entre os atributos da planta e do solo, na tentativa de selecionar, entre os do solo, um indicador da sua qualidade física de boa representatividade para a produtividade da forragem. Foi instalada a malha geoestatística para a coleta dos dados do solo e da planta, contendo 125 pontos amostrais numa área de 2.500 m². Os atributos estudados apresentaram variabilidade entre baixa e muito alta. Também, seguiram padrões espaciais claramente definidos, com alcances da dependência espacial entre 6,6 e 31,1 m. Apesar da correlação linear simples entre a MSF e a MI na profundidade de 0,10-0,20 m ter sido baixa, foi extremamente significativa. Contudo, do ponto de vista espacial, houve elevada correlação inversa entre tais variáveis. Assim, a MI2 apresentou-se como satisfatório indicador da qualidade física do solo de Pereira Barreto - SP, quando destinado à produtividade de forragem do milho.

PALAVRAS-CHAVE: manejo do solo, qualidade física do solo, forragicultura.

LINEAR AND SPATIAL ASPECTS OF THE CORRELATION BETWEEN THE CORN FORAGE YIELD AND THE SOIL POROSITY UNDER NO-TILLAGE

ABSTRACT: Soil porosity is of great importance for the crop yield, as the unfavorable conditions can hinder the roots penetration and, therefore, limit the appropriate nutrients and available water uptake. In the year of 2005, on Bonança farm, in Pereira Barreto - SP, Brazil, the corn forage yield (CFY), macroporosity (MA), microporosity (MI) and total porosity (TP) of a Typic Hapludox soil were analyzed concerning three different depths, under no-tillage. The objective was to analyze the variability and the linear and spatial correlations between soil and plant features, aiming at selecting a physical quality indicator which represents the forage yield. The geostatistical mesh to collect soil and plant data with 125 sampling stations has been established in an area of 2.500 m². In general, the studied features showed variability between low and very high. They were under clearly defined spatial patterns, with ranges of spatial dependence between 6.6 and 31.1 meters. Despite the fact that the simple linear correlation between CFY and MI at 0.10-0.20 m deep (M2) was low, it was extremely significant. However, from the spatial point of view, there was high inverse correlation between such variables. Therefore, the MI2 proved to be an excellent indicator for the soil physical quality of Pereira Barreto - SP, when it is intended to grow corn forage.

KEYWORDS: soil management, soil physical quality, foraging.

¹ Doutorando, Faculdade de Engenharia, UNESP, Câmpus de Ilha Solteira - SP, rclima@agr.feis.unesp.br

² Prof. Adjunto, Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, Faculdade de Engenharia, UNESP, Câmpus de Ilha Solteira - SP, malcolm@agr.feis.unesp.br; morel@agr.feis.unesp.br

³ Doutorando, Faculdade de Engenharia, UNESP, Câmpus de Ilha Solteira - SP, etaugustus@aluno.feis.unesp.br

⁵ Mestrando, ESALQ-USP, Piracicaba - SP, ammello@esalq.usp.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 3-12-2007

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 10-3-2009

INTRODUÇÃO

A cultura do milho (*Zea mays* L.) tem-se destacado como uma das principais explorações agrícolas no Brasil, não apenas pela área plantada, como também pela importância econômica e social. Para a produção de silagem, o milho destaca-se entre as plantas forrageiras de maior importância, em função do seu alto potencial produtivo e nutricional, sendo muito utilizado na alimentação de bovinos de leite e de corte. Estudos com cultivares de milho para silagem em diferentes locais e anos agrícolas para o Estado de São Paulo têm relatado valores de produtividade média de forragem entre 8 e 12 t ha⁻¹ (FAHL et al., 1998) e de 18,7 t ha⁻¹ (NUSSIO et al., 2001). Entretanto, há casos em que seu potencial é superior a 20 t ha⁻¹ (CRUZ et al., 2001), dependendo da fertilidade do solo, da cultivar e do clima. Por apresentar sistema radicular com alto potencial de desenvolvimento, os atributos físicos do solo, sobretudo aqueles estabelecidos pela relação massa/volume, em condições adversas, podem dificultar a penetração das raízes e, conseqüentemente, limitar a adequada absorção dos nutrientes e da água disponível.

A porosidade pode ser definida como sendo a porção do volume do solo não ocupada por partículas sólidas, isto é, pelo volume dado pelos componentes orgânicos e inorgânicos. Ela depende principalmente da textura e da estrutura, sendo considerada como ideal quando apresenta metade do seu volume. Sua caracterização é importante para a adoção de medidas de manejo, pois está estreitamente ligada à dinâmica de armazenamento e movimento da água, dos solutos e da circulação do ar no solo. Assim, o espaço poroso do solo regula as relações entre a fase sólida, líquida e gasosa (BAVER et al., 1973; KIEHL, 1979).

Para um perfeito desenvolvimento e boas produtividades das culturas, seria necessário ter um solo agrícola ideal, à luz da físico-química coloidal, o qual deve ser considerado como um sistema trifásico natural e disperso. A porosidade do solo é dividida em macroporosidade e microporosidade. A primeira, sendo responsável pela aeração e pela drenagem da água, é constituída de poros com diâmetro maior do que 0,05 mm. A segunda, responsável pelo armazenamento da água, possui poros menores do que o referido valor. Assim, os valores ideais considerados para a macroporosidade e microporosidade são, respectivamente, de 0,17 m³ m⁻³ e de 0,33 m³ m⁻³ do volume total do solo. Por outro lado, valores de macroporosidade menores do que 0,10 m³ m⁻³ podem afetar o desenvolvimento das raízes, a ponto de comprometer a produtividade vegetal (KIEHL, 1979).

A geoestatística vem apresentando aplicação crescente na avaliação da variabilidade espacial de atributos de interesse em ciências agrárias, permitindo a interpretação dos resultados com base na estrutura da sua variabilidade natural, considerando a existência da dependência espacial dentro do espaço de amostragem. No Brasil, o aumento substancial de publicações de trabalhos científicos por diversos pesquisadores com uso da geoestatística, nos últimos anos, tem demonstrado a importância da sua aplicação na interpretação e na compreensão de resultados, principalmente em relação aos atributos massa/volume do solo e da produtividade vegetal. Dessa forma, tem-se trabalhado com: a) solo (Latosolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho eutrófico, Latossolo Bruno distrófico, Aluvial eutrófico e Cambissolo), b) Estados (SP, MS, PR, PB, RN e RJ), c) culturas agrícolas (cana-de-açúcar, feijão, melão, milho, soja e videira) e d) malha geoestatística com amostragem entre 40 e 256 repetições, assim como, com espaçamentos entre pontos variando entre 1 e 10 m (CARVALHO et al., 2002, 2003; SOUZA et al., 2001, 2004; JOHANN et al., 2004; ANDRADE et al., 2005; GREGO & VIEIRA, 2005; FREDDI et al., 2006; SANTOS et al., 2006; AMARO FILHO et al., 2007; BERNER et al., 2007; MEGDA et al., 2008).

Diante do exposto, a presente pesquisa, realizada num Latossolo Vermelho distrófico no município de Pereira Barreto - SP, teve o objetivo de pesquisar, entre os atributos trabalhados do solo e da planta, aquele do solo que melhor possa explicar a variabilidade da produtividade de forragem do milho.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em 2005, em área irrigada com pivô central e manejada no sistema de integração agricultura-pecuária, ocupada com *Brachiaria brizantha* c.v. Marandu, utilizada há seis anos como pastagem irrigada no método rotacionado intensivo. A área localiza-se na Fazenda Bonança, pertencente à Agropecuária Damha, no município de Pereira Barreto - SP, latitude 20°40'12"S e longitude 51°01'50"W, com precipitação e temperatura médias anuais, respectivamente, de 1.300 mm e 24,1 °C. O tipo climático local é o A_w, segundo classificação de Köppen, caracterizado como tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno. O solo da área estudada foi classificado como sendo um Latossolo Vermelho distrófico típico, franco-arenoso, álico, epicompactado, fortemente ácido, de acordo com EMBRAPA (2006).

A planta-teste trabalhada foi o milho *safrinha* outonal (*Zea mays* L.), com a finalidade de produção de forragem destinada à alimentação bovina. Seguiram-se as instruções agrícolas para as principais culturas do Estado de São Paulo (FAHL et al., 1998), tomando-se por base a análise química inicial da fertilidade do solo para fins de rotina, realizada em 3-2-2005. Para a implantação do ensaio, a área de pastagem foi dessecada no dia 20-1-2005, onde utilizou o herbicida glyphosate na dosagem de 1,8 kg ha⁻¹ (p.a), sendo a semeadura realizada em 10-2-2005 em sistema plantio direto, com auxílio de semeadora configurada para tal sistema.

O milho utilizado foi o híbrido simples P30F80, com espaçamento entre linhas de 0,85 m, com densidade de 5,5 sementes por metro de linha de semeadura. Na adubação de semeadura, foram utilizados 320 kg ha⁻¹ da fórmula 08-28-16. A adubação de cobertura foi realizada por fertirrigação, com duas aplicações de 106 kg de ureia, sendo uma em 28-2-2005 e a outra em 16-3-2005, assim como uma aplicação de cloreto de potássio, na dosagem de 150 kg há⁻¹, em 3-3-2005.

Foram definidas as direções dos eixos cartesianos da malha geoestatística experimental, numa área do referido pivô, entre dois terraços agrícolas. Assim, o eixo x foi estabelecido em nível, enquanto o y ficou no sentido do declive. A malha ficou constituída com o total de 125 pontos amostrais, distribuídos numa área de 2.500 m² (50 m x 50 m), com declividade média de 0,025 m m⁻¹. O espaçamento entre os pontos amostrais utilizado na grande malha foi de 5 m, enquanto na de refinamento era de 1 m. Dessa forma, as áreas úteis utilizadas para a coleta de dados, tanto do solo quanto da planta, ficaram estabelecidas no entorno de cada ponto amostral da seguinte forma: a) na grande malha, com 3,40 m de largura (quatro linhas de semeadura) por 3,40 m de comprimento no sentido da linha, numa área de 11,56 m², e b) na de refinamento, com 2,55 m de comprimento (três linhas de semeadura) por 1,00 m de largura, no sentido da linha, e área de 2,55 m².

Os atributos do solo, obtidos no entorno de cada ponto amostral, foram a porosidade total (PT), macroporosidade (MA) e a microporosidade (MI), coletados nas profundidades de 0-0,10 m; 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, em 1^o-5-2005, analisados pela metodologia da Mesa de Tensão, conforme EMBRAPA (1997). Assim, foram identificados, em função da camada de coleta, da seguinte forma: para a camada de 0-0,10 m, PT1, MA1 e MI1; para a camada de 0,10-0,20 m, PT2, MA2 e MI2, e para a camada de 0,20-0,30 m, PT3, MA3 e MI3.

O atributo da planta, coletado no campo em 30-4-2005, foi a produtividade de massa verde de milho destinado para forragem, cujo estágio fenológico se encontrava entre o estágio R4, grão pastoso, que se encontra na fase de transição do estado leitoso para consistência pastosa, e estágio R5, formação de dente, em que os grãos se encontram em fase de transição do estado pastoso para farináceo (FANCELLI, 1986). Posteriormente, foi calculada a massa seca de forragem por hectare (MSF), para cada ponto amostral, pela seguinte expressão:

$$MSF = (MU/PA) FC 10^4 \quad (1)$$

em que,

- MSF - produtividade de massa seca da forragem do milho num determinado ponto amostral, kg ha^{-1} ;
- MU - massa úmida total do ponto amostral, kg;
- PA - área útil do ponto amostral, que foi de $11,56 \text{ m}^2$ para a grande malha, e de $2,55 \text{ m}^2$ para malha de refinamento;
- FC - fator de correção de massa verde em massa seca de forragem. Para o seu cálculo, foram retiradas aleatoriamente dez plantas de cada parcela, trituradas e tomada uma amostra de aproximadamente 600 g de massa verde, seca em estufa a $65 \text{ }^\circ\text{C}$, até a obtenção de massa constante, e
- 10^4 - fator de conversão de kg m^{-2} para kg ha^{-1} .

Para cada atributo estudado, efetuou-se a análise descritiva clássica com o auxílio do *software* estatístico SAS (SCHLOTZHAVER & LITTELL, 1997), onde foram calculados a média, a mediana, os valores mínimo e máximo, o desvio-padrão, e o coeficiente de variação, a curtose, a assimetria e a distribuição de frequência. Posteriormente, realizou-se a identificação dos *outliers*, efetuando a substituição dos seus valores pelo valor médio dos circunvizinhos contidos na malha, conforme ISAACS & SRIVASTAVA (1989), CAMBARDELLA et al. (1994). Por outro lado, foi montada a matriz de correlação, com objetivo de efetuar as correlações lineares simples para as combinações, duas a duas, entre todos os atributos estudados. Assim, foram selecionados aqueles de maior correlação linear, e que, portanto, poderiam apresentar semivariograma cruzado e a consequente cokrigagem. Também, conjuntamente para todas as camadas estudadas do solo, efetuou-se a regressão linear múltipla entre a variável dependente (MSF) e as independentes (atributos do solo), com o objetivo de selecionar aquelas que, nos devidos casos, proporcionariam as melhores relações entre causa e efeito, avaliadas pelo incremento do coeficiente de determinação. Para tanto, por intermédio do *step wise*, foi utilizada a planilha de cálculos do programa *Excel*.

Isoladamente para cada atributo, foi analisada sua dependência espacial pelo cálculo do semivariograma simples. Contudo, para aqueles que apresentaram interdependência espacial, calcularam-se também seus semivariogramas cruzados com base nos pressupostos de estacionaridade da hipótese intrínseca, pelo uso do pacote *Gamma Design Software* (GS⁺, 2004).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variabilidade de um atributo pode ser classificada conforme a magnitude do seu coeficiente (FREDDI et al., 2006). Na Tabela 1, a produtividade de massa seca da forragem do milho (MSF) apresentou média variabilidade (C.V. = 16,3%), concordando com os dados de NUSSIO (1991). Também, sua distribuição de frequência foi normal, cujo valor médio de $14.842 \text{ kg ha}^{-1}$ foi muito semelhante ao encontrado por BORGHI (2001), que foi de $14.780 \text{ kg ha}^{-1}$, quando utilizado o preparo convencional, o cultivo mínimo e o plantio direto, com três densidades de semeadura distintas. Da mesma forma, tal valor ficou estabelecido na faixa de produtividade de massa seca apresentada por CRUZ et al. (2001), que variou entre 4.590 e $22.180 \text{ kg ha}^{-1}$, para distintas cultivares de milho. Porém, foi superior àquela indicada por FAHL et al. (1998) para o Estado de São Paulo (8 a 12 t ha^{-1}), muito provavelmente devido à irrigação utilizada, uma vez que se tratava de milho *safrinha* outonal.

Na Tabela 1, a variabilidade dos atributos do solo foi muito alta para a MA, em todas as camadas, concordando com as pesquisas de SOUZA et al. (2001, 2004), CARVALHO et al. (2002, 2003), MESQUITA et al. (2003) e SECCO et al. (2005). Por outro lado, as variabilidades dos dados da MI e da PT foram baixas em todos os casos, com exceção da MII e da PT1, que foram médias. Tal fato ficou perfeitamente de acordo com SOUZA et al. (2001, 2004), CARVALHO et al. (2002, 2003), MESQUITA et al. (2003), JOHANN et al. (2004), GREGO & VIEIRA (2005), SECCO et al. (2005) e SANTOS et al. (2006), nos quais tais variabilidades ora foram baixas ora médias.

TABELA 1. Análise descritiva da produtividade de forragem do milho e da porosidade de um Latossolo Vermelho distrófico. **Descriptive analysis of corn forage yield and porosity of a Distrophic Red Latosol.**

Atributo ^(a)	Medidas Estatísticas Descritivas									
	Média	Mediana	Valor		Desvio- -Padrão	Variação (%)	Coeficiente		Probabilidade do teste ^(b)	
			Mínimo	Máximo			Curtose	Assimetria	PR<W	DF
MSF kg ha ⁻¹	14.841	15.049	8.949	23.198	2.424	16,3	0,615	0,008	0,369	NO
Produtividade de Forragem										
Macroporosidade										
MA1 m ³ m ⁻³	0,123	0,098	0,017	0,339	0,078	63,0	-0,458	0,672	1,0 10 ⁻⁴	IN
MA2 m ³ m ⁻³	0,040	0,039	0,003	0,088	0,017	41,7	-0,125	0,487	0,033	TN
MA3 m ³ m ⁻³	0,046	0,044	0,003	0,095	0,017	37,9	0,730	0,179	0,008	IN
Microporosidade										
MI1 m ³ m ⁻³	0,244	0,245	0,158	0,313	0,031	12,7	-0,005	-0,298	0,421	NO
MI2 m ³ m ⁻³	0,250	0,252	0,187	0,316	0,020	8,0	0,979	-0,056	0,335	NO
MI3 m ³ m ⁻³	0,253	0,254	0,206	0,286	0,016	6,4	0,376	-0,451	0,050	NO
Porosidade Total										
PT1 m ³ m ⁻³	0,367	0,354	0,254	0,530	0,063	17,1	-0,656	0,544	1,0 10 ⁻⁴	IN
PT2 m ³ m ⁻³	0,291	0,289	0,254	0,334	0,016	5,6	0,183	0,425	0,104	NO
PT3 m ³ m ⁻³	0,299	0,300	0,241	0,341	0,020	6,6	0,165	-0,441	0,092	NO

^(a)MSF - produtividade de massa seca da forragem; MA, MI e PT - macroporosidade, microporosidade, porosidade total, respectivamente, sendo 1 (0,00-0,10 m), 2 (0,10-0,20) e 3 (0,20-0,30) suas respectivas profundidades; ^(b) DF - distribuição de frequência, respectivamente sendo No, TN e IN, respectivamente, do tipo normal, tendendo à normal e indefinida.

A distribuição de frequência da MA foi indefinida para a MA1 e a MA3, e tendendo a normal para a MA2. Por outro lado, a MI apresentou distribuição de frequência normal para todas as camadas, enquanto para a PT, foi indefinida (PT1) e normal (PT2 e PT3). Os valores médios da MA foram de 0,123 m³ m⁻³ (MA1), 0,040 m³ m⁻³ (MA2) e de 0,046 m³ m⁻³ (MA3), seguindo tendência decrescente em profundidade no perfil do solo, de forma a concordar com os trabalhos de SOUZA et al. (2001, 2004), CARVALHO et al. (2002) e de SECCO et al. (2005). Tais valores também indicaram que a segunda e a terceira camadas se encontraram razoavelmente compactadas, uma vez que seus valores ficaram muito abaixo do valor crítico ideal de 0,10 m³ m⁻³ para a macroporosidade, conforme preconizado por BAVER et al. (1973), MEDINA (1975) e KIEHL (1979), como limitadores da produtividade agrícola. Também, puderam tais valores ter reduzido substancialmente a produtividade vegetal, que foi de 14.842 kg ha⁻¹, uma vez que havia o potencial para a produção de até 22.180 kg ha⁻¹, conforme CRUZ et al. (2001) (Tabela 1).

A MI em profundidade resultou nos valores de 0,244 m³ m⁻³ (MI1), 0,250 m³ m⁻³ (MI2) e 0,253 m³ m⁻³ (MI3). Dessa forma, esses dados indicaram tendência crescente em profundidade, inversamente ao que foi notado para a macroporosidade, uma vez que são atributos interdependentes, isto é, com a diminuição da MA, normalmente ocorre aumento da MI, ficando de acordo com SOUZA et al. (2001, 2004), CARVALHO et al. (2002) e SECCO et al. (2005), que também apresentaram valores crescentes da microporosidade com o aprofundamento no perfil do solo. Também, a porosidade total resultou em valores de 0,367 m³ m⁻³ (PT1), 0,291 m³ m⁻³ (PT2), e de 0,299 m³ m⁻³ (PT3), apresentando, também, a exemplo da macroporosidade, tendência decrescente no perfil do solo, corroborando o fato do aumento da compactação nas duas camadas mais profundas do solo. Tal fato está de acordo com os dados de SOUZA et al. (2001, 2004), CARVALHO et al. (2002), SECCO et al. (2005) e SANTOS et al. (2006) (Tabela 1).

Na Tabela 2, a correlação entre a MSF e os atributos do solo apresentou significância exclusivamente para os pares: 1) MSF x MA1 (r = 0,137*); 2) MSF x MI2 (r = -0,157**); 3) MSF x PT1 (r = 0,199**), e 4) MSF x PT2 (r = -0,183**). No par MSF x MA1, foi verificada correlação positiva, indicando que, quando há aumento da MA1, há tendência de aumento da MSF. Tal fato apresentou-se de forma teoricamente coerente, uma vez que, na Tabela 1, o valor médio da MA1 foi

de $0,123 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, superior ao limite crítico de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, tido como limitador da produtividade agrícola, conforme KHIEL (1979) e BAVER et al. (1975).

Assim, o aumento da macroporosidade proporcionará melhor aeração do sistema radicular, implicando, conseqüentemente, aumento da MSF. Por outro lado, no par MSF x MI2, houve correlação inversa, indicando que, com o aumento da MI2, ocorrerá diminuição da MSF, provavelmente desencadeado pelo fato de que haja aumento da compactação do solo, vindo a diminuir, por conseqüência, a produtividade agrícola.

Para o terceiro e quarto pares (MSF x PT1 e MSF x PT2) (Tabela 2), ocorreu inversão da relação entre causa e efeito, isto é, a MSF variou positivamente com a PT1 e negativamente com a PT2. Dessa forma, a correlação positiva entre a MSF x PT1 indicou, especificamente, para a primeira camada do solo, que, quanto maior for sua porosidade total, tão maior poderá ser a respiração celular das raízes e, conseqüentemente a produtividade vegetal, ficando tal fato de acordo com SANTOS et al. (2006). Por outro lado, a correlação negativa entre a MSF x PT2 indicou, especificamente para a segunda camada do solo, provável falta de contato da raiz com o solo, o que pode ter limitado a produtividade vegetal pela diminuição direta da absorção iônica via interceptação radicular, conforme observado por HANKANSSON et al. (1998).

TABELA 2. Matriz de correlação linear simples entre a produtividade de forragem do milho com a porosidade de um Latossolo Vermelho distrófico. **Matrix of simple linear correlation between the corn forage yield with the porosity of a Distrophic Red Latosol.**

Atributos ^(a)	Coeficiente de Correlação ^(b)								
	MSF	MA1	MA2	MA3	MI1	MI2	MI3	PT1	PT2
MA1	0,137*	-	-	-	-	-	-	-	-
MA2	0,011	0,479**	-	-	-	-	-	-	-
MA3	0,017	0,177**	0,500**	-	-	-	-	-	-
MI1	0,060	-0,626**	-0,522**	-0,359**	-	-	-	-	-
MI2	-0,157**	-0,429**	-0,562**	-0,387**	0,458**	-	-	-	-
MI3	-0,123	-0,496**	-0,477**	-0,266**	0,402**	0,514**	-	-	-
PT1	0,199**	0,923**	0,332**	0,040	-0,277**	-0,302**	-0,413**	-	-
PT2	-0,183**	0,071	0,447**	0,188**	-0,088	0,396**	-0,006	0,044	-
PT3	-0,068	-0,314**	-0,049	0,536**	0,148**	0,142*	0,571**	-0,313**	0,136*

^(a) MSF - produtividade de massa seca da forragem; MA, MI e PT - macroporosidade, microporosidade e porosidade total, respectivamente, sendo 1 (0,00-0,10 m); 2 (0,10-0,20) e 3 (0,20-0,30) suas respectivas profundidades; ^(b) * significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade.

No geral, as correlações entre os pares de atributos do solo (Tabela 2) apresentaram-se, quando analisados dois atributos quaisquer, dentro da mesma profundidade, com o sinal positivo (correlação direta) ou negativo (correlação indireta) para todas aquelas estabelecidas nas três profundidades. Os de correlação direta, com os respectivos valores extremos do coeficiente de correlação, foram o MA x PT (0,923 a -0,447). Já os de correlação indireta foram o MA x MI (-0,626 a -0,266). Entretanto, as correlações entre os pares de atributos do solo também se apresentaram, quando analisados dois atributos quaisquer nas três profundidades, ora com sinal positivo (correlação direta) ora com negativo (correlação indireta), de forma aleatória nas três profundidades. Tais pares foram entre MI x PT (-0,277 a 0,571), de forma a concordar com ARGENTON et al. (2005), que obtiveram, para esse mesmo atributo, pares com correlações variando entre 0,180 e -0,140.

Assim, foram relatadas as equações de regressão com maior expressividade, especificamente aquelas estabelecidas entre a MSF em função das do solo, presentes na Tabela 1. Portanto, os modelos apresentados em seguida foram para os pares de atributos que proporcionaram correlações

significativas, assim como apresentaram coeficientes adjuntos das variáveis independentes de forma estatisticamente significativos:

$$MSF = 2,213 \cdot 10^4 \exp^{(MI2 - 1,655^{**})} \quad (r = -0,196^{**}) \quad (2)$$

$$MSF = 1,203 \cdot 10^4 + 7,654 \cdot 10^3 \cdot PT1 \quad (r = 0,199^{**}) \quad (3)$$

$$MSF = 7,121 \cdot 10^3 \cdot PT2^{-5,824 \cdot 10^{-1}} \quad (r = -0,192^{**}) \quad (4)$$

em que,

MSF - produtividade de massa seca da forragem do milho, em kg ha⁻¹;

MI2 - microporosidade do solo na camada de 0,10-0,20 m, em m³ m⁻³, e,

PT1 e PT2 - porosidade total do solo nas camadas de 0,00 - 0,10 e 0,10 - 0,20 m, em m³ m⁻³.

Assim, a MSF apresentou baixas correlações, embora significativas, com MI2, PT1 e PT2, respectivamente, representadas pelas eqs. (2), (3) e (4). Dessa forma, com o aumento da MI2 haverá diminuição da MSF [eq.(2)], de acordo com FREDDI (2007), que observou a mesma tendência para a microporosidade do solo, quando correlacionada com a produtividade de grãos de milho, cujo coeficiente de correlação foi de -0,570.

Na Tabela 3, em relação à eficiência do ajuste semivariográfico, a relação decrescente dos dez semivariogramas simples, analisada por meio da grandeza do coeficiente de determinação espacial (r²), foi a seguinte: 1) MI2 (0,912); 2) MA1 (0,911); 3) MI3 (0,876); 4) MI1 (0,863); 5) MA3 (0,805); 6) MSF (0,770); 7) MA2 (0,770); 8) PT2 (0,756); 9) PT1 (0,709) e 10) PT3 (0,445).

TABELA 3. Parâmetros dos semivariogramas (simples e cruzados) ajustados para produtividade de forragem do milho e a porosidade de um Latossolo Vermelho distrófico.
Semivariogram parameters (simple and cross) of the corn forage yield and porosity of a Distrophic Red Latosol.

Parâmetros								
Atributo ^(a)	Modelo ^(b)	Efeito Pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ +C)	Alcance (m) (A ₀)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)	Classe de dependência espacial
γ(h) simples dos atributos								
MSF kg ha ⁻¹	exp	1,250 10 ⁶	4,715 10 ⁶	12,0	0,770	1,667 10 ¹²	73,5	moderada
MA1 m ³ m ⁻³	exp	1,000 10 ⁻⁵	5,940 10 ⁻³	18,0	0,911	2,040 10 ⁻⁶	99,8	alta
MA2 m ³ m ⁻³	esf	8,900 10 ⁻⁵	2,930 10 ⁻⁴	18,0	0,770	1,157 10 ⁻⁸	69,6	moderada
MA3 m ³ m ⁻³	exp	5,400 10 ⁻⁵	2,410 10 ⁻⁴	31,1	0,805	7,589 10 ⁻⁹	77,6	alta
MI1 m ³ m ⁻³	gau	1,840 10 ⁻⁴	9,880 10 ⁻⁴	27,5	0,863	1,398 10 ⁻⁷	81,4	alta
MI2 m ³ m ⁻³	esf	7,000 10 ⁻⁵	3,020 10 ⁻⁴	19,1	0,912	4,608 10 ⁻⁹	76,8	alta
MI3 m ³ m ⁻³	esf	7,100 10 ⁻⁵	2,680 10 ⁻⁴	20,0	0,876	4,005 10 ⁻⁹	73,5	moderada
PT1 m ³ m ⁻³	exp	1,200 10 ⁻⁴	3,630 10 ⁻³	13,8	0,709	2,749 10 ⁻⁶	96,7	alta
PT2 m ³ m ⁻³	esf	3,300 10 ⁻⁵	1,870 10 ⁻⁴	6,6	0,756	3,181 10 ⁻⁹	82,4	alta
PT3 m ³ m ⁻³	gau	1,700 10 ⁻⁴	3,700 10 ⁻⁴	8,7	0,445	2,916 10 ⁻⁸	54,1	moderada
γ(h) cruzado entre a MSF e os atributos do solo								
MSF=f (MA2)	esf	1,000 10 ⁻³	0,257 10 ¹	19,2	0,544	5,590 10 ¹	99,9	alta
MSF=f (MI2)	gau	-1,000 10 ⁻²	-1,739 10 ⁻¹	17,99	0,890	4,04 10 ¹	99,9	alta
MSF=f (MI3)	gau	-1,000 10 ⁻²	-0,816 10 ¹	20,82	0,636	1,33 10 ²	99,9	alta
MSF=f (PT1)	gau	1,000 10 ⁻²	2,729 10 ¹	15,41	0,536	1,049 10 ³	99,9	alta

^(a)MSF - produtividade de massa seca da forragem; MA - macroporosidade; MI - microporosidade; PT - porosidade total; ^(b) exp - exponencial; gau - gaussiano; esf - esférico; ^(c) SQR - soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE - avaliador da dependência espacial.

Assim, os atributos do solo apresentaram apreciáveis ajustes semivariográficos, uma vez que seus coeficientes de determinação espacial variaram entre 0,912 (MI2) e 0,445 (PT3).

Em relação à MSF, seu coeficiente foi de 0,770. Dessa forma, ficaram muito próximos dos de SOUZA et al. (2004), quando, trabalhando num Latossolo Vermelho eutroférico, encontraram a faixa entre 0,870 - 0,920. A amplitude de variação do alcance da dependência espacial dentre todos

foi na faixa de 6,6 - 31,1 m, respectivamente, para o PT2 e a MA3, ficando abaixo da faixa de 8,4 e 80,0 m, encontrada para os referidos atributos, nas condições de alguns Latossolos Vermelhos distróficos brasileiros (SOUZA et al., 2001, 2004; CARVALHO et al., 2002, 2003; GREGO & VIEIRA, 2005). Especificamente em relação ao alcance da MSF (Tabela 3), o valor ficou acima dos valores de 6,1 e 8,5 m obtidos por ABREU et al. (2003) e SANTOS et al. (2005), quando, respectivamente, pesquisaram a produtividade de trigo, num Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, e a de feijão, num Latossolo Vermelho distrófico. Por outro lado, ficou abaixo dos de CARVALHO et al. (2006), FREDDI et al. (2006) e SANTOS et al. (2006), os quais, trabalhando com a produtividade de feijão e de milho num Latossolo Vermelho distroférico, tiveram alcances variando entre 15,3 e 41,3 m.

Em relação aos parâmetros dos semivariogramas cruzados, ajustados entre a MSF e os atributos do solo (Tabela 3), o melhor deles, no geral, foi estabelecido para o atributo $MSF=f(MI2)$, uma vez que seu coeficiente de determinação espacial foi o maior (0,890), como também a elevada dependência espacial de 99,9%. As cokrigagens entre os atributos ficaram estabelecidas na seguinte ordem decrescente: 1) $MSF=f(MI2)$; 2) $MSF=f(MI3)$; 3) $MSF=f(MA2)$, e 4) $MSF=f(PT1)$, cujos coeficientes de determinação espacial (r^2) foram, respectivamente, 0,890; 0,636; 0,544 e 0,536, assim como com o elevado avaliador da dependência espacial (99,9%).

Na Figura 1, estão apresentados os mapas de krigagem simples da MSF (a) e dos três melhores ajustes semivariográficos dos atributos do solo contidos na Tabela 3, quais sejam: MI2 (b); MA1 (c) e MI3 (d). Dessa forma, foi observada correlação espacial inversa entre a MI2 e a MI3 com a MSF. Portanto, nos sítios onde tanto a MI2 quanto a MI3 apresentaram seus maiores valores, variando de 0,240 a 0,267 $m^3 m^{-3}$ (Figura 1b,d), a MSF decresceu, apresentando valores entre 11.663-14.468 $kg ha^{-1}$. Já naqueles onde a MI2 e a MI3 apresentaram seus menores valores (0,216-0,240 $m^3 m^{-3}$), a MSF assumiu seus maiores valores (14.468-17.272 $kg ha^{-1}$). Em contrapartida, foi observada correlação espacial direta entre a MA1 e a MSF. Assim, nos sítios onde a MA1 decresceu, ocorreu o mesmo com a MSF, sendo perfeitamente verdadeiro o inverso desse fato.

Dos semivariogramas cruzados observados no presente trabalho (Tabela 3), obtidos exclusivamente entre a MSF (variável primária) com os atributos do solo (variáveis secundárias), o $MSF=f(MI2)$ foi o único que apresentou *lags* apenas num único quadrante (Figura 1e), tornando-se o melhor entre todos os ajustados. Dessa forma, todos os semivariogramas cruzados restantes, a saber: $MSF=f(MA2)$, $MSF=f(MI3)$ e $MSF=f(PT1)$, apresentaram *lags* tanto no primeiro quanto no quarto quadrantes. Com base nisso, é que, exclusivamente do ponto de vista espacial da área experimental trabalhada, a MI2 apresentou-se como o melhor atributo indicador da qualidade física do solo estudado, quando destinado à produtividade de massa seca da forragem de milho para as condições da Fazenda Bonança, de Pereira Barreto - SP.

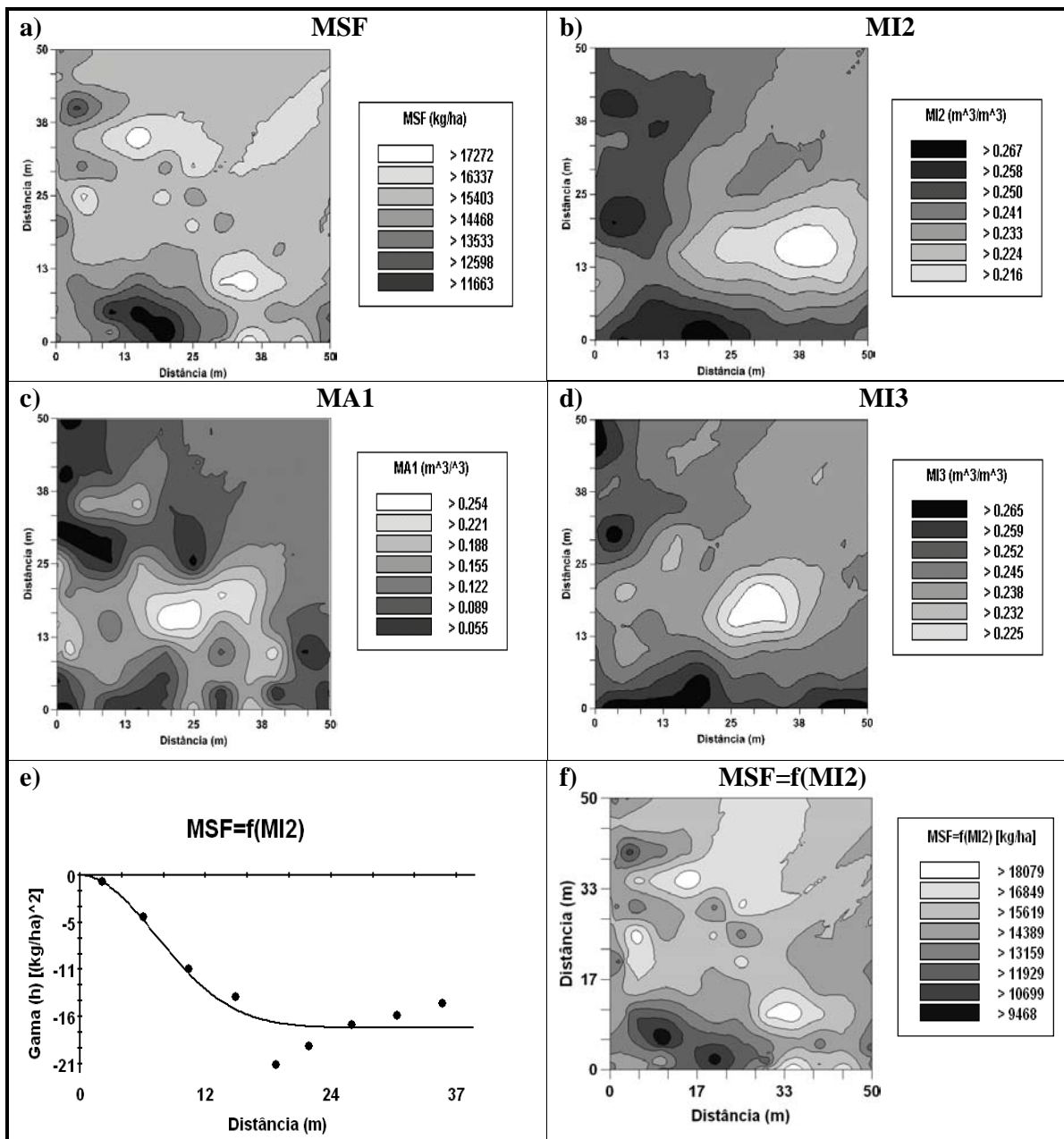


FIGURA 1. Mapas de krigagem simples (MSF, MI2, MA1, MI3), semivariograma cruzado e mapa de cokrigagem da $MSF=f(MI2)$ num Latossolo Vermelho Distrófico. **Simple kriging maps (CFY, MI2, MA1, MI3), cross semivariogram and cokriging map of $CFY=f(MI2)$ in a Distrophic Red Latosol.**

CONCLUSÕES

Linear e espacialmente falando, a microporosidade do solo, obtida na camada 0,10-0,20 m, apresentou-se como o melhor atributo avaliador da qualidade física do solo, quando destinado à produtividade de forragem do milho. Assim, nos sítios onde a referida microporosidade revelou os menores valores (0,210-0,240 m³ m⁻³), a produtividade de forragem do milho assumiu as maiores cifras (14.400-17.200 kg ha⁻¹). Em contrapartida, nos maiores (0,240-0,270 m³ m⁻³), houve as menores produtividades de forragem do milho (11.600-14.400 kg ha⁻¹).

REFERÊNCIAS

- ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.33, n.2, p.275-282, 2003.
- AMARO FILHO, J.; NEGREIROS, R.F.D.; ASSIS, JÚNIOR, R.N.; MOTA, J.C.A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho em Mossoró - RN. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.31, n.3, p.415-422, 2007.
- ANDRADE, A.R.S.; GUERRINI, I.A.; GARCIA, C.J.B.; KATEZ, I.; GUERRA, H.O.C. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. *Ciência Agrotécnica*, Lavras, v.29, n.2, p.322-329, 2005.
- ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.29, p.425-435, 2005.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. *Física del suelos*. Mexico: Hispano-americana, 1973. 529 p.
- BERNER, P.G.M.; VIEIRA, S.R.; LIMA, E.; ANJOS, L.H.C. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um Cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. *R. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, v.31, n.5, p.837-844, 2007.
- BORGHI, E. *Comportamento da cultura do milho (Zea mays L.) em diferentes sistemas de manejo do solo, população de plantas e adubação*. 2001. 97 f. (Trabalho de Graduação) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2001.
- 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 American Journal*, Madison, v.58, p.1.501-1.511, 1994.
- CARVALHO, G.J.; CARVALHO, M.P.; FREDDI, O.S.; MARTINS, M.V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.10, n.3, p.765-771, 2006.
- CARVALHO, M.P.; SORATTO, R.P.; FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional em Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. *Acta Scientiarum*, Maringá, v.24, n.5, p.1.353-1.361, 2002.
- CARVALHO, M.P.; TAKEDA, E.Y.; FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.27, n.4, p.695-703, 2003.
- CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A.; RODRIGUES, J.A.S.; FERREIRA, J.J. (Eds.). *Produção e utilização de silagem de milho e sorgo*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001. 544 p.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Manual de métodos de análise do solo*. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. numeração capitulada.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.
- FAHL, J.I.; CAMARGO, M.B.P.; PIZZINATTO, M.A.; BETTI, J.A.; MELO, A.M.T.; de MARIA, I.C.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). *Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas*. 6.ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1998. 396 p. (Boletim, 200)
- FANCELLI, A.L. *Plantas alimentícias: Guia para aula estudos e discussão*. Piracicaba: Departamento de Agricultura, 1986. 131 p.

FREDDI, O.S. *Avaliação do intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho cultivado com milho*. 2007. 105 f. (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2007.

FREDDI, O.S.; CARVALHO, M.P.; VERONESI JR. V.; CARVALHO, G.J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.26, n.1, p.113-121, 2006.

GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.29, n.2, p.169-177, 2005.

GS⁺: *Geostatistics for environmental sciences*. 7th ed. Michigan, Plainwell: Gamma Desing Software, 2004. 159 p.

HAKANSSON, I.; STENBERG, M.; RYDBERG, T. Long term experiments with different depths of moldboard plough in Sweden. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.46, n.3-4, p.209-230, 1998.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. *Applied geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

JOHANN, J.A.; OPAZO, M.A.U.; SOUZA, E.G.; ROCHA, J.V. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascavel - PR. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.8, n. 2/3, p.212-219, 2004.

KIEHL, E.J. *Manual de edafologia: relações solo-planta*. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1979. 264 p.

MEDINA, H.P. Constituição física. In: MONIZ, A. C. (Org.). *Elementos de pedologia*. Rio de Janeiro: Livro Técnicos e Científicos, 1975. p.11-20.

MEGDA, M.M.; CARVALHO, M.P.; VIEIRA, M.X.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, E.C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de feijão e a porosidade de um Latossolo Vermelho de Selvíria - MS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.32, n.2, p.781-788, 2008.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O.; CORRENTE, J.E. Caracterização estatística de variáveis físicas do solo. *Acta Scientiarum*, Maringá, v.25, n.1, p.35-44, 2003.

NUSSIO, L.G. Cultura de milho para produção de silagem de alto valor alimentício. In: SIMPÓSIO SOBRE NUTRIÇÃO DE BOVINOS, 4., 1991, Piracicaba. *Anais...*

NUSSIO, L.G.; CAMPOS, F.P.; DIAS, F.N. Importância da qualidade da porção vegetativa no valor alimentício da silagem de milho. In: SIMPÓSIO SOBRE PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DE FORRAGENS CONSERVADAS, 2001, Maringá. *Anais...* Maringá: UEM/CCA/DZO, 2001.

SANTOS, M.L.; CARVALHO, M.P.; RAPASSI, R.M.A.; MURASHI, C.T.; MALLER, A.; MATOS, F.A. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho (*Zea mays, L.*) e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do Cerrado Brasileiro. *Acta Scientiarum*, Maringá, v.28, n.3, p.313-321, 2006.

SANTOS, P.A.; CARVALHO, M.P.; FREDDI, O.S.; KITAMURA, A.E.; FREITAG, E.E.; VANZELA, L.S. Correlação linear e espacial entre o rendimento de grãos do feijoeiro e a resistência mecânica à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.29, n.6, p.287-295, 2005.

SCHLOTZHAVER, S.D.; LITTELL, R.C. *SAS System for elementary statistical analysis*. 2nd ed. Cary: SAS System Institute, 1997. 905 p.

SECCO, D.; ROS, C.O.; SECCO, J.K.; FIORIN, J.E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.29, n.3, p. 407-414, 2005.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, T.G.; BENTO, M.J.C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.8, n.1, p.51-58, 2004.

SOUZA, Z.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. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, n.3, p.699-707, 2001.