

## RELAÇÕES ENTRE PRODUTIVIDADE DE SORGO FORRAGEIRO E ATRIBUTOS FÍSICOS E TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA DE UM LATOSSOLO DO CERRADO<sup>1</sup>

Fernanda Carvalho Basso<sup>2</sup>, Marcelo Andreotti<sup>2</sup>, Morel de Passos e Carvalho<sup>2</sup>, Bruno Nascimento Lodo<sup>2</sup>

### ABSTRACT

RELATIONS AMONG FORAGE SORGHUM YIELD AND PHYSICAL ATTRIBUTES AND ORGANIC MATTER CONTENT OF A LATOSOL IN THE BRAZILIAN SAVANNAH

The soil physical attributes and organic matter influence plant growth and development by limiting root growth and crop yield. Aiming to study the spatial and linear correlations among forage sorghum yield and soil physical properties and organic matter, an experiment was carried out in a Distroferric Red Latosol, in Selvíria, Mato Grosso do Sul State, Brazil, in the 2005 crop season. Thus, the forage sorghum fresh and dry matter yield, microporosity, macroporosity, total porosity, soil bulk density, and organic matter content were analyzed, at three depths (0.00-0.10 m, 0.10-0.20 m, and 0.20-0.30 m). The samples were collected in a geostatistical grid, with a total of 124 points, in an area of 4,000 m<sup>2</sup>. The sorghum fresh and dry matter yield showed high variability, while, for the soil properties, it was low. The plant attributes, macroporosity (in the first layers), microporosity, total porosity, and bulk density, in the first and third layers, followed well-defined spatial standards, reaching from 17.9 m to 84.2 m, while the other attributes showed pure nugget effect. The simple linear correlation among the plant attributes was high and positive, while among the plant and soil attributes it was low and significant, with positive interactions for macroporosity and total porosity, as well as negative for soil bulk density, in the first layer. The bulk density in the soil surface layer was an excellent indicator of soil physical quality, for the estimation of dry matter yield.

KEY-WORDS: Spacial variability; macroporosity, microporosity, total porosity; bulk density.

### RESUMO

Os atributos físicos e a matéria orgânica do solo influenciam no crescimento e desenvolvimento vegetal, limitando o crescimento de raízes e a produtividade das culturas. Objetivando-se estudar a variabilidade espacial e correlações lineares entre a produtividade do sorgo forrageiro e os atributos físicos e matéria orgânica do solo, realizou-se um experimento em Latossolo Vermelho distroférico, no município de Selvíria (MS), na safra de 2005. Para tanto, estimou-se a produtividade de matéria fresca e seca do sorgo forrageiro, a microporosidade, macroporosidade, porosidade total, densidade e teor de matéria orgânica do solo, em três profundidades (0,00-0,10 m; 0,10-0,20 m; e 0,20-0,30 m). As amostras foram coletadas em uma malha geoestatística, com total de 124 pontos, em área de 4.000 m<sup>2</sup>. As produtividades de matéria fresca e seca apresentaram elevada variabilidade, enquanto, para os atributos do solo, em geral, a variabilidade foi baixa. Os atributos da planta, a macroporosidade (nas primeiras camadas), microporosidade, porosidade total e densidade total, na primeira e terceira camadas, seguiram padrões espaciais bem definidos, com alcances estabelecidos entre 17,9 m e 84,2 m, enquanto os demais atributos apresentaram efeito pepita puro. A correlação linear simples entre os atributos da planta foi alta e positiva, enquanto, entre os atributos da planta com os do solo, foi baixa e significativa, com interações positivas para macroporosidade e porosidade total, bem como negativa para densidade do solo, na primeira camada. A densidade do solo, na menor profundidade, foi um excelente indicador da qualidade física do solo, para a estimativa da produtividade de matéria seca.

PALAVRAS-CHAVES: Variabilidade espacial; macroporosidade; microporosidade; porosidade total; densidade do solo.

### INTRODUÇÃO

O sorgo é uma das opções para cultivo em sucessão, em áreas de Cerrado, visando tanto à produção de massa usual na alimentação animal quanto de grãos, ou com palha residual para o sistema plantio direto. Sua importância na sucessão, em

condições de Cerrado, advém de sua tolerância ao déficit hídrico, neste período de cultivo. Além disto, o sorgo suporta temperaturas elevadas, apresenta média tolerância à acidez do solo e se desenvolve bem em zonas secas e quentes, apresentando boa produção de massa seca (Rodrigues Filho et al. 2006).

1. Trabalho recebido em set./2009 e aceito para publicação em jan./2011 (nº registro: PAT 7099/ DOI 10.5216/pat.v41i1.7099).

2. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. E-mails: fcarvalhobasso@yahoo.com.br, dreotti@agr.feis.unesp.br, morel@agr.feis.unesp.br, brunolodo@yahoo.com.br.

No Brasil, a expansão da área cultivada com sorgo, como planta forrageira, tem sido lenta, principalmente pelas práticas incorretas de cultivo, o que compromete a sua produtividade e qualidade. Fatores como compactação e baixa fertilidade dos solos, adubações inadequadas e escolha de sementes dificultam maior expressão do potencial de produção da cultura (Rodrigues Filho et al. 2006).

Para um bom desenvolvimento, as plantas não dependem apenas dos atributos químicos e biológicos do solo, mas, também, dos físicos. A densidade do solo possui estreita relação com outros atributos, tais como a porosidade total, macroporosidade, microporosidade, permeabilidade, condutividade hidráulica e a resistência à penetração, os quais são de suma importância para o desenvolvimento da planta (Kiehl 1979, Camargo & Alleoni 1997, Carvalho et al. 1999, Mello Filho et al. 2006).

A compactação do solo é entendida como o aumento da sua densidade, resultante da complexa interação entre os processos físicos, químicos e biológicos diretamente relacionados com sua massa/volume (Kochhann et al. 2000). A compactação do solo é variável, em um mesmo tipo solo, espacial e volumetricamente, conforme a variação da estrutura e da textura. Também, tende a aumentar, com a profundidade do perfil, sobretudo pela diminuição do teor de matéria orgânica. Desta forma, foram relatados valores gerais para este atributo (1,40-1,80 kg dm<sup>-3</sup>). Por outro lado, em solos de textura arenosa, seus valores foram de 1,20-1,40 kg dm<sup>-3</sup>, ao passo que, nos de textura argilosa, entre 1,00 kg dm<sup>-3</sup> e 1,25 kg dm<sup>-3</sup> (Kiehl 1979, Camargo & Alleoni 1997, Reichardt & Timm 2004). Contudo, em relação aos níveis críticos da densidade do solo, valores em torno de 1,55 kg dm<sup>-3</sup>, para solos franco-argilosos e argilosos, e de 1,85 kg dm<sup>-3</sup>, para solos arenosos, podem afetar o crescimento das raízes e, conseqüentemente, a produtividade vegetal (Bowen 1981).

As propriedades físicas do solo desempenham importante papel no desenvolvimento das plantas. Neste sentido, a variabilidade espacial deve ser bem conhecida, visando a minimizar os erros na amostragem e no manejo do solo. O solo apresenta heterogeneidade, tanto vertical como horizontal, pois os sistemas conservacionistas de manejo criam nele um ambiente diferente daquele encontrado no sistema convencional, resultante dos efeitos dos resíduos superficiais e da reduzida movimentação sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas.

Portanto, o mapeamento dos seus atributos físicos, em uma área agrícola qualquer, é de fundamental importância, tanto para a recomendação de práticas de manejo como para a avaliação dos efeitos da agricultura sobre a qualidade ambiental.

Diversos estudos relatam que a variabilidade das propriedades físicas do solo apresenta correlação ou dependência geoestatística (Carvalho et al. 2002, Carvalho et al. 2003, Santos et al. 2005, Megda et al. 2008, Roque et al. 2008, Schaffrath et al. 2008). Assim, a análise da variabilidade do solo, por meio de técnicas geoestatísticas, pode indicar alternativas de manejo para reduzir os efeitos da variabilidade do solo sobre a produção das culturas (Carvalho et al. 2002, Santos et al. 2006).

Dessa maneira, objetivou-se avaliar a variabilidade e caracterizar a dependência espacial entre atributos físicos e teor de matéria orgânica do solo, com relação à produtividade de matéria fresca e seca do sorgo forrageiro, assim como estudar as correlações lineares e espaciais entre tais atributos, visando-se a identificar qual deles interfere na produtividade agrícola, para Latossolo Vermelho distroférico do Cerrado.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no ano agrícola de 2005, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão - Setor de Produção Vegetal da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, da Universidade Estadual Paulista (Unesp) (22°23'S e 51°27'W). Foram estudadas a variabilidade e a dependência espacial entre a microporosidade (MI), macroporosidade (MA), porosidade total (PT), densidade (DS) e teor de matéria orgânica (MO), com relação à produtividade de matéria fresca (SMF) e seca (SMS) do sorgo forrageiro, em sistema plantio direto, em Latossolo Vermelho distroférico (Embrapa 2006).

A planta teste pesquisada foi o sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), semeado em sistema plantio direto, sob irrigação por aspersão (pivô central), em sucessão ao cultivo de soja, em meados de julho de 2005. Utilizou-se a cultivar BR 700, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, no espaçamento 0,50 m entre linhas e densidade de 7 sementes por metro linear, recebendo, como adubação de semeadura, 150 kg da fórmula 8-28-16, com base na análise do solo, que relacionou o seguinte: pH em CaCl<sub>2</sub> = 4,6; matéria orgânica = 28,0 g dm<sup>-3</sup>;

P = 24 mg dm<sup>-3</sup>; V = 42%; e K, Ca, Mg, H+Al, Al, SB e CTC de, respectivamente, 4,2 mmolc dm<sup>-3</sup>; 17,0 mmolc dm<sup>-3</sup>; 9,0 mmolc dm<sup>-3</sup>; 42,0 mmolc dm<sup>-3</sup>; 3,0 mmolc dm<sup>-3</sup>; 30,6 mmolc dm<sup>-3</sup>; e 72,6 mmolc dm<sup>-3</sup>.

Na coleta dos atributos do solo e da planta, foi instalada uma malha geoestatística constituída de 124 pontos amostrais, distribuídos em área de 4.000 m<sup>2</sup> (40 m x 100 m). Utilizou-se um teodolito, no estaqueamento dos pontos amostrais da malha experimental. O espaçamento utilizado entre os pontos amostrais, na grande malha, foi de 10 m. Foram alocadas por sorteio, dentro da grande malha, submalhas de refinamento da distância entre os pontos, visando-se a detalhar o estudo da dependência espacial dos atributos, para condições do espaçamento entre pontos menores do que 10 m. Cada submalha ficou posicionada entre quatro pontos da grande malha, constituindo-se de um ponto no seu centro e mais quatro estabelecidos no sentido dos eixos cartesianos (submalha de 5 m) e dois pontos entre cada par (submalha de 1,67 m).

Desta forma, as áreas úteis utilizadas na coleta de dados, tanto do solo quanto da planta, ficaram estabelecidas no entorno de cada ponto amostral. Para coleta da planta, na grande malha, utilizaram-se 4 linhas de semeadura do sorgo forrageiro (1,80 m de largura por 1,80 m de comprimento, no sentido da linha), totalizando 3,24 m<sup>2</sup>. Nas malhas de refinamento, dispostas no eixo *x*, utilizaram-se três linhas de semeadura do sorgo forrageiro (1,35 m de largura por 1,35 m de comprimento, no sentido da linha), totalizando 1,82 m<sup>2</sup>.

Os cinco atributos do solo foram estudados em três profundidades (0,00-0,10 m; 0,10-0,20 m; e 0,20-0,30 m), sendo assim caracterizados: microporosidade (MI1, MI2, MI3); macroporosidade (MA1, MA2, MA3); porosidade total (PT1, PT2, PT3); densidade (DS1, DS2, DS3); e teor de matéria orgânica (MO1, MO2, MO3). Em relação aos atributos da planta, estudou-se a produtividade de matéria fresca e seca. Todos os atributos foram obtidos após a colheita do sorgo.

Os atributos do solo foram calculados em função de amostras coletadas no entorno da estaca que determinou o ponto amostral no campo. As amostras de solo, para determinação dos atributos físicos, foram originadas de monólitos com estrutura indeformada. Com a utilização de um trado de caneca, foram obtidas amostras deformadas de solo, para determinar o teor de MO. A DS foi determinada pelo método do anel volumétrico (Embrapa 1997),

relacionada em kg dm<sup>-3</sup>. A MI, MA e PT foram determinadas pelo método da mesa de tensão (Embrapa 1997), relacionada em m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. A matéria orgânica resultou da expressão MO = C x 1,724, em que MO é o teor de matéria orgânica do solo (g dm<sup>-3</sup>) e C o teor de carbono orgânico (g dm<sup>-3</sup>) determinado pelo método colorimétrico (Raij et al. 1987).

A produtividade de matéria fresca das plantas foi obtida em função de amostras originadas no entorno do ponto amostral estaqueado (3,24 m<sup>2</sup> ou 1,82 m<sup>2</sup>). Tais amostras foram originadas da coleta das plantas, quando o sorgo forrageiro apresentava o estágio de grão farináceo a duro. Após a secagem das plantas, realizada em estufa de circulação forçada de ar, a 65°C, até massa constante, foi determinada a percentagem de matéria seca e posterior transformação dos dados em produtividade de matéria seca, em kg ha<sup>-1</sup>.

Realizou-se a análise descritiva inicial dos atributos com a utilização do *software* estatístico SAS (Schlotzhaver & Littell 1997), sendo calculados a média, mediana, valores mínimo e máximo, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose e assimetria, assim como efetuada a análise de distribuição de frequência dos dados. Posteriormente, realizou-se a identificação de *outliers*, de acordo com o gráfico de ramos e folhas. Desta forma, efetuou-se a substituição destes valores pelo valor médio dos circunvizinhos contidos na malha geoestatística, conforme Cambardella et al. (1994). Para testar a hipótese de normalidade, ou de lognormalidade, dos atributos, realizou-se o teste de Shapiro & Wilk (1965), a 1%.

Os atributos precedidos da letra “*I*” tiveram seus valores representados pelos logaritmos decimais; os atributos com tendência, cuja legenda de valores apresentou o resíduo dos dados originais, foram discriminados como “*r*”; e, para os atributos com distribuição de frequência do tipo lognormal, primeiramente multiplicou-se seu valor por 1.000 e, posteriormente, foi calculado o respectivo logaritmo decimal e adicionada a letra “*kl*”. Portanto, na interpretação dos mapas de krigagem dos atributos que resultaram em distribuição lognormal, cuja legenda de valores mapeados apresentou o logaritmo dos dados originais, procedeu-se à retrotransformação, conforme preconizado por Deutsch & Journel (1997).

Foi montada a matriz de correlação, objetivando-se efetuar as correlações lineares simples para as combinações, duas a duas, entre todos os atributos estudados (solo e planta). Assim, procurou-se sele-

cionar aqueles de maior correlação linear, sendo, portanto, candidatos a apresentarem semivariograma cruzado e a consequente cokrigagem. Também, conjuntamente para todas as camadas estudadas do solo, foi efetuada a regressão linear múltipla, entre a variável dependente da planta (SMF e SMS) e as independentes do solo (atributos do solo), objetivando-se selecionar aquelas que, nos devidos casos, proporcionariam as melhores relações entre causa e efeito, avaliadas pelo aumento do coeficiente de determinação. Para tanto, foi utilizado o pacote computacional SAS, por intermédio do *step wise*.

Para cada atributo, foi analisada a dependência espacial, pelo cálculo do semivariograma, com base nos pressupostos de estacionaridade da hipótese intrínseca, com o pacote computacional Gamma Design Software (GS<sup>+</sup> 2004). Foram ajustados semivariogramas simples a todos os atributos estudados. Posteriormente, ajustaram-se semivariogramas cruzados entre os atributos. O objetivo foi definir os pares de melhor representatividade, isto é, qual atributo tido como variável secundária apresentou melhor correlação espacial explicativa do atributo tido como variável primária. Portanto, os ajustes dos semivariogramas (simples e cruzados), em função de seus modelos, foram efetuados pela seleção inicial da menor soma dos quadrados dos desvios (SQR), maior coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e maior avaliador da dependência espacial (ADE). A decisão final do modelo que representou o ajuste foi realizada por meio da validação cruzada, assim como, também, para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionou a melhor rede de krigagem e/ou cokrigagem. Para cada atributo, foram relacionados o efeito pepita (Co), o alcance (Ao) e o patamar (Co+C<sub>o</sub>). A análise do avaliador da dependência espacial (ADE) foi efetuada conforme a expressão  $ADE = [C/(C+Co)] \cdot 100$  (GS<sup>+</sup> 2004), onde ADE é o avaliador da dependência espacial, C a variância estrutural e C+C<sub>o</sub> o patamar. A interpretação proposta para o ADE foi a seguinte: a)  $ADE \leq 25\%$  (variável espacial fracamente dependente); b)  $25\% < ADE \leq 75\%$  (variável espacial moderadamente dependente); e c)  $ADE > 75\%$  (variável espacial fortemente dependente).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise descritiva inicial da produtividade da matéria fresca (SMF) e seca (SMS) do sorgo forrageiro e dos atributos do solo está apresentada na

Tabela 1. De acordo com Gomes (2000), a variabilidade de qualquer atributo pode ser classificada segundo a magnitude do seu coeficiente de variação (CV). Se o CV for inferior a 10%, considera-se de baixa variabilidade, de 10% a 20% média, de 20% a 30% alta e maior que 30% muito alta. Assim, a precisão de um experimento está diretamente relacionada com o CV, ou seja, quanto menor o CV, maior a precisão do atributo estudado. Desta forma, analisando-se a SMF e a SMS, ambas apresentaram alta variabilidade do CV (27,7% e 29,6%, respectivamente).

A macroporosidade (MA) apresentou baixo CV, nas duas primeiras camadas, sendo 6,9% na primeira e 6,3% na segunda, enquanto, na terceira camada, o CV foi médio (20,9%). Megda et al. (2008) obtiveram valores médios de 27,6%, na terceira camada, concordando com os resultados da presente pesquisa. Os baixos valores obtidos nas camadas superficiais foram devidos à transformação logarítmica dos dados, uma vez que, para a análise geoestatística, é conveniente que os dados possuam distribuição normal.

O CV foi baixo para a microporosidade (MI), nas três profundidades estudadas (4,1% nas duas primeiras camadas e 3,7% na terceira), concordando com Souza et al. (2001) e Megda et al. (2008), que encontraram valores entre 4,6% e 5,9% e 5,5% e 6,6%, respectivamente, também em sistema plantio direto.

A porosidade total (PT) e a densidade do solo (DS) também apresentaram baixa variabilidade nas três profundidades (5,7%; 4,8%; e 4,3%, para PT, e 4,4%; 4,4%; e 3,9%, para DS), concordando com Santos et al. (2006), em que o CV variou de 6,9% a 7,8%, para PT, e 5,6% a 6,1%, para DS.

A matéria orgânica (MO) apresentou média variabilidade do CV, na camada superficial (15,3%). Entretanto, nas camadas mais profundas, houve baixa variabilidade (5,4% e 6,1%), devido à transformação logarítmica dos dados. Freddi (2003) obteve valores entre 14,2% e 16,4%, na camada superficial, tanto para o sistema plantio direto quanto para o sistema convencional, respectivamente.

Os valores médios da macroporosidade, nas três camadas, ficaram abaixo do preconizado por Kiehl (1979) ( $0,100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Assim, pôde-se considerar que o solo apresentou-se compactado. A microporosidade apresentou valores médios de  $0,357 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (MI1),  $0,355 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (MI2) e  $0,370 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (MI3), semelhantes aos obtidos por Megda et al. (2008), que variaram de  $0,339 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  a  $0,359 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , com o aumento da pro-



Tabela 1. Análise descritiva inicial de alguns atributos da produtividade do sorgo forrageiro e Latossolo Vermelho distroférico da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão - FE/Unesp (Selvíria, MS, 2005).

Atributo <sup>(a)</sup>	Medidas estatísticas descritivas									
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente			Probabilidade do teste <sup>(b)</sup>	
			Mínima	Máximo		Varição (%)	Curtose	Assimetria	Pr < w	DF
<i>Atributos da planta</i>										
SMF (kg ha <sup>-1</sup> )	23116	22602	10030	40107	6412	27,7	-0,286	0,211	0,385	NO
SMS (kg ha <sup>-1</sup> )	11093	11081	4648	21350	3280	29,6	0,236	0,373	0,178	NO
<i>Macroporosidade</i>										
kl_MA1 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>(c)</sup>	0,075	0,073	0,031	0,153	0,130	6,9	-0,213	0,007	0,792	LN
kl_MA2 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,082	0,082	0,041	0,177	0,120	6,3	0,470	-0,128	0,233	LN
MA3 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,080	0,079	0,040	0,123	0,017	20,9	-0,252	0,049	0,956	NO
<i>Microporosidade</i>										
MI1 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,357	0,358	0,315	0,390	0,015	4,1	0,191	-0,346	0,336	NO
MI2 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,355	0,356	0,315	0,385	0,015	4,1	0,429	-0,748	5,0.10 <sup>-4</sup>	IN
MI3 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,370	0,370	0,334	0,401	0,014	3,7	0,159	-0,367	0,048	TN
<i>Porosidade total</i>										
PT1 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,435	0,433	0,372	0,509	0,025	5,7	0,435	0,293	0,346	NO
PT2 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,440	0,438	0,392	0,510	0,021	4,8	0,854	0,444	0,113	NO
PT3 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,449	0,452	0,390	0,493	0,019	4,3	0,452	-0,463	0,074	NO
<i>Densidade do solo</i>										
DS1 (kg dm <sup>-3</sup> )	1,505	1,516	1,300	1,679	0,067	4,4	0,037	-0,370	0,212	NO
DS2 (kg dm <sup>-3</sup> )	1,483	1,478	1,310	1,671	0,066	4,4	0,282	0,339	0,458	NO
DS3 (kg dm <sup>-3</sup> )	1,447	1,444	1,275	1,625	0,057	3,9	0,598	0,039	0,957	NO
<i>Matéria orgânica</i>										
MO1 (g dm <sup>-3</sup> )	38,4	37,6	24,2	51,4	5,9	15,3	-0,655	0,120	0,095	NO
l_MO2 (g dm <sup>-3</sup> ) <sup>(d)</sup>	31,4	30,6	19,3	49,8	8,1.10 <sup>-2</sup>	5,4	0,358	0,296	0,022	TL
l_MO3 (g dm <sup>-3</sup> )	26,1	25,4	15,8	42,0	8,7.10 <sup>-2</sup>	6,1	0,147	-0,114	0,267	LN

<sup>(a)</sup> SMF = produtividade da matéria fresca do sorgo; SMS = produtividade da matéria seca do sorgo; e MA, MI, PT, DS e MO, de 1 a 3, são, respectivamente, a macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade e teor de matéria orgânica, em profundidades do solo. <sup>(b)</sup> DF = distribuição de frequência, sendo NO, LN, TN, TL e IN, respectivamente, do tipo normal, lognormal, tendendo a normal, tendendo a lognormal e indeterminado. <sup>(c)</sup> valores x\* da média, mediana, mínimo e máximo, retrotransformados por x\* = (10<sup>logx</sup>)/1.000. <sup>(d)</sup> valores x\* da média, mediana, mínimo e máximo, retrotransformados por x\* = 10<sup>logx</sup>. Atributos precedidos de "l" e "kl" tiveram, respectivamente, valores representados pelos logaritmos decimais e logaritmos decimais/1.000.

fundidade. A porosidade total apresentou valores crescentes, com o aumento da profundidade (0,435 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>; 0,440 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>; e 0,449 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), semelhantes aos obtidos por Souza et al. (2001), onde a variação foi de 0,403-0,460 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Por outro lado, os valores médios da densidade do solo diminuíram em profundidade (1,505 kg dm<sup>-3</sup>; 1,483 kg dm<sup>-3</sup>; e 1,447 kg dm<sup>-3</sup>), configurando um ambiente de elevada compactação superficial, comum no sistema plantio direto.

Os teores de matéria orgânica do solo foram de 38,4 g dm<sup>-3</sup> (MO1); 31,4 g dm<sup>-3</sup> (MO2); e 26,1 g dm<sup>-3</sup> (MO3) (Tabela 1). Os valores encontrados estão próximos à faixa considerada adequada para solos argilosos (31-60 g dm<sup>-3</sup>), conforme Raij et al. (1997).

A SMF do sorgo forrageiro foi de 23.116 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 1), superior à encontrada por Silva et al.

(2006), que, avaliando o mesmo híbrido (BR700), em condições de safrinha, obtiveram produtividade de matéria fresca de 17.857 kg ha<sup>-1</sup>. O valor médio da SMS foi de 11.093 kg ha<sup>-1</sup>, superior ao encontrado por Silva et al. (2007), em condições de safrinha, no Cerrado (5.040 kg ha<sup>-1</sup>).

O sorgo apresentou relativa resistência ao considerável estado de compactação do solo, uma vez que a densidade do solo foi, substancialmente, elevada e a macroporosidade reduzida, nas camadas avaliadas, onde se concentra, normalmente, a maior parte do sistema radicular. Por outro lado, há que se considerar que a cultura estava sob irrigação por aspersão (pivô central), em situação ideal de umidade, o que pode ter suavizado o efeito da compactação sobre a produtividade.

Na Tabela 2, é apresentada a matriz de correlação linear simples entre a produtividade da forragem do sorgo e os atributos do solo. Assim, o par SMF *versus* SMS apresentou correlação alta e positiva, de elevada significância estatística ( $SMS = -112,706 + 0,485.SMF$ ,  $r = 0,948^{**}$ ). Tal fato evidenciou que, havendo aumento da produtividade da matéria fresca do sorgo, ocorrerá o mesmo com a matéria seca. Portanto, nas condições da presente pesquisa, pode-se estimar a matéria seca do sorgo a partir dos dados de sua matéria fresca, simplificando e auxiliando trabalhos afins.

Em relação aos atributos do solo, verificou-se que, na camada superficial (MA1, PT1 e DS1), ocorreram correlações significativas com a produtividade do sorgo forrageiro (SMF e SMS) (Tabela 2). Entretanto, tais correlações foram baixas, provavelmente devido ao elevado número de observações. Desta forma, constatou-se correlação positiva entre a SMF e a SMS, com o aumento da MA1 e PT1 ( $SMF = 2,657.10^3 + 1,091.10^4.MA1$ ,  $r = 0,221^{**}$ ;  $SMS = -1,099.10^3 + 6,502.10^3.MA1$ ,  $r = 0,257^{**}$ ;  $SMF = 5,899.10^3 + 3,947.10^4.PT1$ ,  $r = 168^{**}$ ; e  $SMS = 8,107.10^2 + 2,357.10^4.PT1$ ,  $r = 0,197^{**}$ ).

Contudo, para a densidade do solo, a correlação foi negativa, evidenciando que, com o aumento da

compactação superficial, houve redução na produtividade de forragem ( $SMF = 5,477.10^4 - 2,102.10^4.DS1$ ,  $r = 0,218^{**}$ ;  $SMS = 2,903.10^4 - 1,191.10^4.DS1$ ,  $r = 0,242^{**}$ ). Tais resultados corroboraram os obtidos por Centurion & Demattê (1985) e Albuquerque et al. (1995), os quais afirmaram que o aumento da densidade do solo, normalmente causada pela compactação que o maquinário imprime, acarretará aumento da resistência à penetração e da microporosidade, concomitantemente ao decréscimo da macroporosidade e da porosidade total, implicando em menor produtividade vegetal. Além disto, como o presente trabalho foi conduzido sob sistema de plantio direto, a elevada compactação superficial do solo foi semelhante à encontrada em literatura correlata (Streck et al. 2004).

A análise geoestatística (Tabela 3 e Figura 1) evidenciou que o SMF, SMS,  $kl\_MA1$ ,  $kl\_MA2$ ,  $MI1$ ,  $r\_MI3$ ,  $PT1$ ,  $r\_PT3$ ,  $DS1$  e  $DS3$  apresentaram dependência espacial, ao passo que, na MA3,  $r\_MI2$ ,  $PT2$ ,  $DS2$ ,  $MO1$ ,  $l\_MO2$  e  $l\_MO3$ , houve efeito pepita puro. Onde foram ajustados semivariogramas (Figura 1), tanto os valores dos atributos da planta quanto os do solo evidenciaram que suas distribuições no espaço não foram aleatórias, uma vez que suas classes de dependência espacial, analisadas pelo

Tabela 2. Matriz de correlação linear simples entre a produtividade da forragem do sorgo e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférrico da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão - FE/Unesp (Selvíria, MS, 2005).

Atributos <sup>(a)</sup>	Coeficiente de correlação <sup>(b)</sup>															
	SMF	SMS	$kl\_MA1$ <sup>(c)</sup>	$kl\_MA2$	MA3	MI1	MI2	MI3	PT1	PT2	PT3	DS1	DS2	DS3	MO1	$l\_MO2$
SMS	0,948**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$kl\_MA1$	0,221**	0,257**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$kl\_MA2$	0,034 <sup>ns</sup>	0,116 <sup>ns</sup>	0,231**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MA3	-0,064 <sup>ns</sup>	-0,082 <sup>ns</sup>	0,090 <sup>ns</sup>	0,219**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MI1	-0,067 <sup>ns</sup>	-0,071 <sup>ns</sup>	-0,124 <sup>ns</sup>	-0,199**	-0,118 <sup>ns</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MI2	-0,077 <sup>ns</sup>	-0,127*	-0,074 <sup>ns</sup>	-0,453**	-0,089 <sup>ns</sup>	0,573**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MI3	-0,003 <sup>ns</sup>	-0,006 <sup>ns</sup>	0,019 <sup>ns</sup>	-0,109 <sup>ns</sup>	-0,212**	0,418**	0,427**	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PT1	0,168**	0,197**	0,777**	0,058 <sup>ns</sup>	-0,012 <sup>ns</sup>	0,507**	0,289**	0,270**	-	-	-	-	-	-	-	-
PT2	-0,004 <sup>ns</sup>	0,087 <sup>ns</sup>	0,224**	0,819**	0,126 <sup>ns</sup>	0,194**	0,071 <sup>ns</sup>	0,148**	0,303**	-	-	-	-	-	-	-
PT3	-0,060 <sup>ns</sup>	-0,079 <sup>ns</sup>	0,090 <sup>ns</sup>	0,122 <sup>ns</sup>	0,750**	0,175**	0,207**	0,487**	0,167**	0,211**	-	-	-	-	-	-
DS1	-0,218**	-0,242**	-0,644**	-0,065 <sup>ns</sup>	0,080 <sup>ns</sup>	-0,012 <sup>ns</sup>	-0,085 <sup>ns</sup>	-0,078 <sup>ns</sup>	-0,598**	-0,158**	0,024 <sup>ns</sup>	-	-	-	-	-
DS2	-0,018 <sup>ns</sup>	-0,093 <sup>ns</sup>	-0,140*	-0,776**	-0,099 <sup>ns</sup>	0,063 <sup>ns</sup>	0,224**	0,018 <sup>ns</sup>	-0,073 <sup>ns</sup>	-0,735**	-0,076 <sup>ns</sup>	0,202**	-	-	-	-
DS3	0,082 <sup>ns</sup>	0,133*	-0,052 <sup>ns</sup>	-0,086 <sup>ns</sup>	-0,570**	0,091 <sup>ns</sup>	0,000 <sup>ns</sup>	-0,100 <sup>ns</sup>	0,034 <sup>ns</sup>	-0,027 <sup>ns</sup>	-0,577**	0,091 <sup>ns</sup>	0,134*	-	-	-
MO1	0,039 <sup>ns</sup>	0,059 <sup>ns</sup>	-0,027 <sup>ns</sup>	-0,027 <sup>ns</sup>	0,070 <sup>ns</sup>	0,043 <sup>ns</sup>	0,089 <sup>ns</sup>	-0,001 <sup>ns</sup>	-0,003 <sup>ns</sup>	0,015 <sup>ns</sup>	0,060 <sup>ns</sup>	0,071 <sup>ns</sup>	0,021 <sup>ns</sup>	-0,039 <sup>ns</sup>	-	-
$l\_MO2$	-0,038 <sup>ns</sup>	-0,094 <sup>ns</sup>	0,085 <sup>ns</sup>	-0,073 <sup>ns</sup>	0,160**	0,000 <sup>ns</sup>	0,058 <sup>ns</sup>	0,035 <sup>ns</sup>	0,050 <sup>ns</sup>	-0,074 <sup>ns</sup>	0,168**	0,076 <sup>ns</sup>	0,111 <sup>ns</sup>	-0,137*	0,508**	-
$l\_MO3$	0,086 <sup>ns</sup>	0,051 <sup>ns</sup>	0,066 <sup>ns</sup>	0,051 <sup>ns</sup>	0,203**	-0,106 <sup>ns</sup>	-0,020 <sup>ns</sup>	-0,076 <sup>ns</sup>	-0,006 <sup>ns</sup>	0,009 <sup>ns</sup>	0,132*	0,001 <sup>ns</sup>	-0,017 <sup>ns</sup>	-0,104 <sup>ns</sup>	0,475**	0,642**

<sup>(a)</sup> SMF = produtividade da matéria fresca do sorgo; SMS = produtividade da matéria seca do sorgo; e MA, MI, PT, DS e MO, de 1 a 3, são, respectivamente, a macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade e o teor de matéria orgânica, em profundidades do solo. <sup>(b)</sup> \* significativo a 5% de probabilidade; \*\* significativo a 1% de probabilidade; e <sup>ns</sup> não significativo. <sup>(c)</sup> Atributos precedidos de "P" e "kl" tiveram, respectivamente, valores representados pelos logaritmos decimais e logaritmos decimais/1.000.

Tabela 3. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para alguns atributos da produtividade do sorgo forrageiro e de um Latossolo Vermelho distroférico da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão - FE/Unesp (Selvíria, MS, 2005).

Atributo <sup>(a)</sup>	Parâmetros								Classe de dependência espacial
	Modelo <sup>(b)</sup>	Efeito pepita (C <sub>0</sub> )	Patamar (C <sub>0</sub> +C)	Variância estrutural (C)	Alcance (m) (A <sub>0</sub> )	r <sup>2</sup>	SQR <sup>(c)</sup>	ADE <sup>(d)</sup>	
<i>Atributos da planta</i>									
SMF (kg ha <sup>-1</sup> )	esf.	1,04.10 <sup>7</sup>	9,50.10 <sup>6</sup>	9,20.10 <sup>5</sup>	57,0	0,908	6,23.10 <sup>13</sup>	72,6	moderada
SMS (kg ha <sup>-1</sup> )	esf.	3,31.10 <sup>6</sup>	1,08.10 <sup>7</sup>	7,45.10 <sup>6</sup>	84,2	0,874	1,55.10 <sup>13</sup>	69,2	moderada
<i>Macroporosidade</i>									
Kl_MA1 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>(e)</sup>	exp.	2,95.10 <sup>-3</sup>	1,39.10 <sup>-2</sup>	1,10.10 <sup>-2</sup>	29,7	0,827	1,90.10 <sup>-5</sup>	78,8	alta
kl_MA2 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	gau.	4,01.10 <sup>-3</sup>	1,01.10 <sup>-2</sup>	6,11.10 <sup>-3</sup>	26,0	0,698	1,56.10 <sup>-5</sup>	60,4	moderada
MA3 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	epp	3,57.10 <sup>-4</sup>	3,57.10 <sup>-4</sup>	-	-	-	-	-	-
<i>Microporosidade</i>									
MI1 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	esf.	5,00.10 <sup>-6</sup>	1,55.10 <sup>-4</sup>	1,50.10 <sup>-4</sup>	17,9	0,895	2,30.10 <sup>-9</sup>	96,8	alta
R_MI2 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>(e)</sup>	epp	1,12.10 <sup>-4</sup>	1,12.10 <sup>-4</sup>	-	-	-	-	-	-
r_MI3 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	exp.	4,60.10 <sup>-5</sup>	1,60.10 <sup>-4</sup>	1,14.10 <sup>-4</sup>	77,7	0,739	6,98.10 <sup>-9</sup>	71,3	moderada
<i>Porosidade total</i>									
PT1 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	exp.	1,71.10 <sup>-4</sup>	5,60.10 <sup>-4</sup>	3,89.10 <sup>-4</sup>	52,8	0,495	1,86.10 <sup>-7</sup>	69,5	moderada
PT2 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	epp	6,60.10 <sup>-4</sup>	6,60.10 <sup>-4</sup>	-	-	-	-	-	-
r_PT3 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	gau.	1,36.10 <sup>-4</sup>	2,83.10 <sup>-4</sup>	1,47.10 <sup>-4</sup>	63,2	0,716	2,10.10 <sup>-8</sup>	51,9	moderada
<i>Densidade do solo</i>									
DS1 (kg dm <sup>-3</sup> )	esf.	1,06.10 <sup>-3</sup>	4,31.10 <sup>-3</sup>	3,25.10 <sup>-3</sup>	44,9	0,643	1,10.10 <sup>-5</sup>	75,4	alta
DS2 (kg dm <sup>-3</sup> )	epp	5,21.10 <sup>-3</sup>	5,21.10 <sup>-3</sup>	-	-	-	-	-	-
DS3 (kg dm <sup>-3</sup> )	esf.	8,28.10 <sup>-4</sup>	2,54.10 <sup>-3</sup>	1,71.10 <sup>-3</sup>	19,1	0,726	9,58.10 <sup>-7</sup>	67,4	moderada
<i>Matéria orgânica do solo</i>									
MO1 (g dm <sup>-3</sup> )	epp	3,49.10 <sup>1</sup>	3,49.10 <sup>1</sup>	-	-	-	-	-	-
L_MO2 (g dm <sup>-3</sup> ) <sup>(e)</sup>	epp	6,34.10 <sup>-3</sup>	6,34.10 <sup>-3</sup>	-	-	-	-	-	-
l_MO3 (g dm <sup>-3</sup> )	epp	7,47.10 <sup>-3</sup>	7,47.10 <sup>-3</sup>	-	-	-	-	-	-

<sup>(a)</sup> SMF = produtividade da matéria fresca do sorgo; SMS = produtividade da matéria seca do sorgo; e MA, MI, PT, DS e MO, de 1 a 3, são, respectivamente, a macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade e o teor de matéria orgânica, em profundidades do solo; <sup>(b)</sup> exp. = exponencial; gau. = gaussiano; esf. = esférico; e epp = efeito pepita puro. <sup>(c)</sup> SQR = soma dos quadrados dos resíduos. <sup>(d)</sup> ADE = avaliador da dependência espacial. <sup>(e)</sup> atributos precedidos de "P", "kl" e "r" tiveram, respectivamente, valores representados pelos logaritmos decimais, logaritmos decimais/1.000 e pelos resíduos.

avaliador da dependência espacial - ADE (Robertson 1998), variaram entre 51,9% (moderada para r\_PT3) e 96,8% (alta para MI1) (Tabela 3), ficando, este fato, em consonância com Carvalho et al. (2002), Santos et al. (2005), Veronese Júnior et al. (2006) e Megda et al. (2008).

Verifica-se que 72,6% da variação total da produtividade de matéria fresca e 69,2% da matéria seca do sorgo forrageiro foram explicados pela dependência espacial. Por outro lado, os efeitos atribuídos ao acaso, referentes aos efeitos pepita da SMF e SMS, foram de 27,4% e 30,8%, respectivamente (Tabela 3).

Para todos os atributos estudados, os modelos ajustados foram o esférico, exponencial e o gaussiano (Tabela 3), concordando com Megda et al. (2008), entretanto, discordando, em parte, de Carvalho et al. (2002), que utilizaram o modelo gaussiano, assim como de Souza et al. (2001), Corá et al. (2004),

Santos et al. (2005) e Veronese Júnior et al. (2006), que aplicaram os modelos esférico e exponencial. Em geral, os valores de alcance da dependência espacial ficaram com magnitudes muito semelhantes às de Souza et al. (2001), Corá et al. (2004), Santos et al. (2005) e Veronese Júnior et al. (2006).

Na Figura 1, estão os mapas de krigagem simples da produtividade de matéria fresca e seca do sorgo forrageiro e dos atributos do solo. Verificou-se excelente correlação espacial entre os atributos da planta (SMF *versus* SMS), apresentando, também, elevada correlação linear simples e positiva (r<sup>2</sup> = 0,948\*\*).

No âmbito da cokrigagem, houve correlação espacial significativa apenas para a SMS, em função da DS1 (Figura 2), onde o coeficiente de determinação espacial foi de 0,912, ou seja, pode-se estimar, espacialmente, a produtividade da forragem

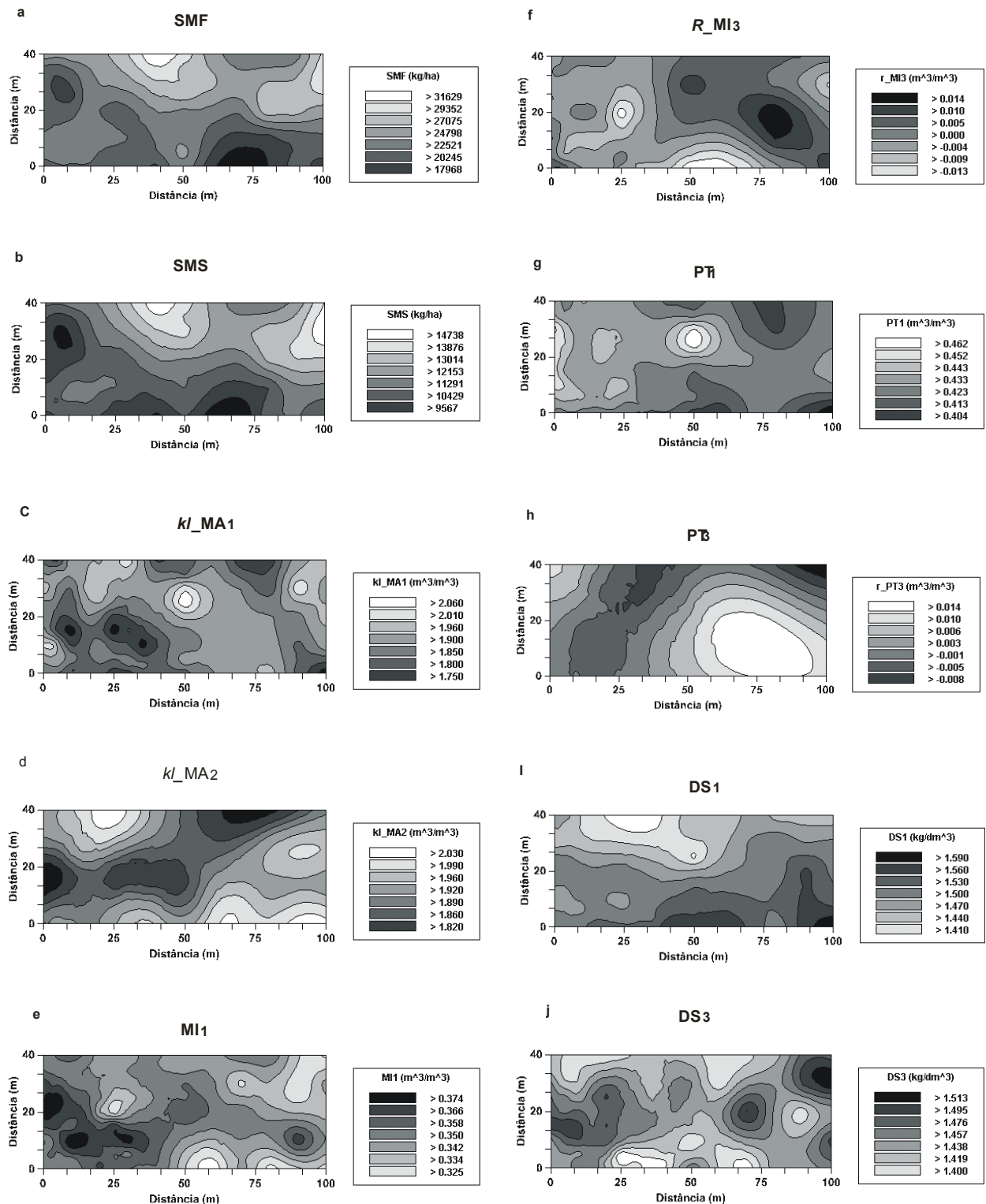


Figura 1. Mapas de krigagem simples da produtividade do sorgo forrageiro e de alguns atributos de um Latossolo Vermelho distroférrico da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão - FE/Unesp (Selvíria, MS, 2005). <sup>(a)</sup> SMF = produtividade da matéria fresca do sorgo. <sup>(b)</sup> SMS = produtividade da matéria seca do sorgo. <sup>(c)</sup>  $kl\_MA1$  = macroporosidade na camada 0,00-0,10 m. <sup>(d)</sup>  $kl\_MA2$  = macroporosidade na camada 0,10-0,20 m. <sup>(e)</sup> MI1 = microporosidade na camada 0,00-0,10 m. <sup>(f)</sup>  $r\_MI3$  = microporosidade na camada 0,20-0,30 m. <sup>(g)</sup> PT1 = porosidade total na camada 0,00-0,10 m. <sup>(h)</sup> PT3 = porosidade total na camada 0,20-0,30 m. <sup>(i)</sup> DS1 = densidade total na camada 0,00-0,10 m. <sup>(j)</sup> Densidade na camada 0,20-0,30 m. Atributos precedidos de “ $kl$ ” e “ $r$ ” tiveram, respectivamente, valores representados pelos logaritmos decimais/1.000 e pelos resíduos.



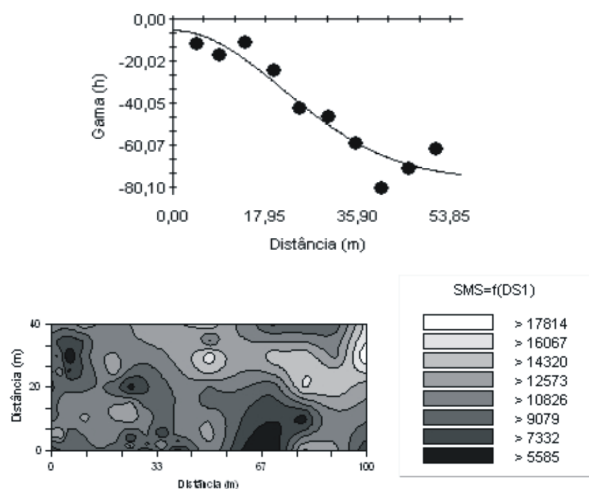


Figura 2. Semivariograma cruzado e mapa de cokrigagem da produtividade de matéria seca (SMS), em função da densidade do solo, na camada 0,00-0,10 m (DS1), de um Latossolo Vermelho distroférico (Selvíria, MS, 2005).

de sorgo, a partir da krigagem da DS1, com 91,2% de probabilidade. Portanto, a análise da Figura 1 evidenciou que, nos locais onde a DS1 variou entre  $1,590 \text{ kg dm}^{-3}$  e  $1,470 \text{ kg dm}^{-3}$  (regiões SW, S e SE), a SMS variou de  $9.567 \text{ kg ha}^{-1}$  a  $13.014 \text{ kg ha}^{-1}$ , e, nos locais onde a DS1 variou entre  $1,470 \text{ kg dm}^{-3}$  e  $1,410 \text{ kg dm}^{-3}$  (regiões NW, N e NO), a SMS variou de  $13.014 \text{ kg ha}^{-1}$  a  $14.738 \text{ kg ha}^{-1}$ . Tal fato sugeriu ser a DS1 um excelente indicador da qualidade física do solo, na estimativa da produtividade de matéria seca do sorgo forrageiro, em sistema de plantio direto sob irrigação por aspersão, em solo de Cerrado. Embora tenha havido baixa correlação linear entre tais atributos, esta correlação foi significativa ( $r = 0,242^{**}$ ). Desta forma, pode-se inferir que a simples descompactação da camada superficial do solo poderia aumentar, significativamente, a produtividade de massa seca do sorgo forrageiro.

## CONCLUSÕES

1. A variabilidade da produtividade do sorgo forrageiro foi elevada, enquanto, para os atributos do solo, em geral, a variabilidade foi baixa, indicando a heterogeneidade do dossel e homogeneidade do solo, proporcionadas pelo sistema plantio direto.
2. A correlação linear entre os atributos da planta e a macroporosidade, porosidade total e densidade na camada superficial do solo foi baixa, embora

significativa. Especialmente, a produtividade da matéria seca do sorgo forrageiro variou inversamente à densidade do solo, na camada 0,00-0,10 m.

3. A densidade na camada superficial do solo apresentou-se como excelente indicador da qualidade física do solo, quando destinada à estimativa da produtividade da matéria seca do sorgo forrageiro, sob sistema plantio direto, em solo de Cerrado.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J. A. et al. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 19, n. 1, p. 115-119, 1995.
- BOWEN, H. D. Alleviating mechanical impedance. In: ARKIN, G. F.; TAYLOR, H. M. (Orgs.). *Modifying the root environment to reduce crop stress*. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1981. p. 21-57.
- CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. *Compactação do solo e desenvolvimento das plantas*. Piracicaba: ESALQ, 1997.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- CARVALHO, E. J. M.; FIGUEIREDO, M. S.; COSTA, L. M. Comportamento físico hídrico de um Podzólico Vermelho-Amarelo câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 34, n. 2, p. 257-265, 1999.
- CARVALHO, M. P.; SORATTO, R. P.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial dos atributos físicos em um Latossolo Vermelho distroférico sob preparo convencional em Selvíria (MS). *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 24, n. 4, p. 1353-1361, 2002.
- CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial dos 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.
- CENTURION, J. F.; DEMATTÊ, J. L. I. Efeito de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob Cerrado cultivado com soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 9, n. 2, p. 263-266, 1985.
- CORÁ, J. E. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, 2004.
- DEUTSCH, C. V.; JOURNAL, A. G. *Geostatistical software library and user's guide*: GSLIB. New York: Oxford University Press, 1997.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise do solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006.
- FREDDI, O. S. *Variabilidade espacial da produtividade do feijão (Phaseolus vulgaris L.) e de atributos químicos de um Latossolo Vermelho distroférico de Selvíria (MS) sob preparo convencional e plantio direto*. 2003. 154 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)–Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.
- GOMES, F. P. *Curso de estatística experimental*. 14. ed. Piracicaba: Degaspari, 2000.
- GS<sup>+</sup>: geostatistics for environmental sciences. 7. ed. Plainwell: Gamma Design, 2004.
- KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; BERTON, A. L. *Compactação e descompactação de solos*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000.
- KIEHL, E. J. *Manual de edafologia: relações solo-planta*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979.
- MEGDA, M. M. et al. Correlação linear e espacial entre a produtividade de feijão e a porosidade de um Latossolo Vermelho de Selvíria (MS). *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 781-788, 2008.
- MELO FILHO, J. F. et al. Análise estatística exploratória e variabilidade da densidade do solo em um perfil de Latossolo Amarelo coeso dos Tabuleiros Costeiros da Bahia. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 30, n. 2, p. 199-205, 2006.
- RAIJ, B. V. et al. *Análise química do solo para fins de fertilidade*. Campinas: Fundação Cargill, 1987.
- RAIJ, B. V. et al. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1997.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. Barueri: Manole, 2004.
- ROBERTSON, G. P. *GS<sup>+</sup>: geostatistics for the environmental sciences*. Plainwell: Gamma Design, 1998.
- RODRIGUES FILHO, O. et al. Produção e composição bromatológica de quatro híbridos de sorgo forrageiro [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] submetidos a três doses de nitrogênio. *Ciência Animal Brasileira*, Goiânia, v. 7, n. 1, p. 37-48, 2006.
- ROQUE, M. W. et al. Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1827-1835, 2008.
- SANTOS, P. A. et al. 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. 2, p. 287-295, 2005.
- SANTOS, M. L. et al. 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 Agronomy*, Maringá, v. 28, n. 3, p. 313-321, 2006.
- SCHAFFRATH, V. R. et al. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1369-1377, 2008.
- SCHLOTZHAVER, S. D.; LITTELL, R. C. *SAS: system for elementary statistical analysis*. 2. ed. Cary: SAS Institute, 1997.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. *Biometrika*, London, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.
- SILVA, A. G.; BARROS, A. S.; TEIXEIRA, I. R. Avaliação agronômica de cultivares de sorgo forrageiro no sudoeste do Estado de Goiás em 2005. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, Sete lagoas, v. 6, n. 1, p. 116-127, 2007.
- SILVA, A. G. et al. Avaliação do rendimento de forragem de cultivares de sorgo forrageiro sob diferentes condições termo-fotoperiódicas. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 53, n. 307, p. 292-301, 2006.
- SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob semeadura direta em Selvíria (MS). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 699-707, 2001.
- STRECK, C. A. et al. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, 2004.
- VERONESE JÚNIOR, V. et al. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian ferralsol. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 85, n. 1, p. 166-177, 2006.