

PRODUTIVIDADE DA SOJA E RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO DO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO NO CERRADO BRASILEIRO¹

Flávio Carlos Dalchiavon², Morel de Passos e Carvalho², Débora Cristiane Nogueira², Daniele Romano², Fabiana Lima Abrantes², Juliana Teodora de Assis², Mário Sérgio de Oliveira²

ABSTRACT

SOYBEAN YIELD AND MECHANICAL RESISTANCE TO SOIL PENETRATION UNDER NO-TILLAGE IN THE BRAZILIAN SAVANNAH

The mechanical resistance to soil penetration can be a negative influence to soybean root growth, greatly affecting its yield. In the agricultural year 2008/2009, in Selvíria, Mato Grosso do Sul State, in the Brazilian Savannah, the soybean yield was analyzed in relation to the mechanical resistance to soil penetration, in a Dystropherric Red Latosol (Typic Acrustox) under no-tillage. The main purpose was to select, among the soil attributes, the one that best presented spatial and linear correlation to explain the soybean yield variability. A geostatistical grid was installed to collect the soil and plant data, with 120 sampling points, in an area of 8.34 ha and homogeneous slope of 0.055 m m⁻¹. Thus, in order to support future researches concerning precision agriculture, based on the same soil's attributes used for this study, the values for spatial dependence range should be placed between 38.1 m and 114.7 m. From the linear point of view, the mechanical resistance to soil penetration, when evaluated in the 0.10-0.20 m layer, showed good inverse exponential correlation with the soybean yield. However, from the spatial point of view, the number of pods per plant showed to be a good indicator for soybean yield.

KEY-WORDS: *Glycine max*, soybean production components; precision agriculture; soil management; cone index.

INTRODUÇÃO

Desde sua introdução no Brasil, a soja (*Glycine max* (L.) Merrill) tem se constituído em *commodity* de grande importância para a balança comercial brasileira. De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (2009), a produção nacional, na safra 2008/2009, totalizou 57,12 milhões de toneladas, sendo que a região Centro-Sul participou com 90,0% desta, ou seja, 51,53 milhões de toneladas. A área

RESUMO

A resistência mecânica à penetração do solo pode influenciar, negativamente, o crescimento radicular da soja, afetando, sobremaneira, sua produtividade. No ano agrícola 2008/2009, no município de Selvíria (MS), no Cerrado brasileiro, foi analisada a produtividade da soja, em função da resistência mecânica à penetração de um Latossolo Vermelho distroférrico, no sistema de semeadura direta. O objetivo foi selecionar, entre os atributos pesquisados do solo, aquele com a melhor correlação, linear e espacial, para explicar a variabilidade da produtividade da soja. Foi instalada uma malha geostatística, para a coleta de dados do solo e da planta, com 120 pontos amostrais, em área de 8,34 ha e declive homogêneo de 0,055 m m⁻¹. Dessa forma, visando-se a auxiliar futuros trabalhos voltados à agricultura de precisão, os quais venham a utilizar os mesmos atributos do presente estudo, os valores dos alcances da dependência espacial a serem empregados deverão estar compreendidos entre 38,1 m e 114,7 m. Do ponto de vista linear, a resistência mecânica à penetração do solo, quando avaliada na camada 0,10-0,20 m, apresentou boa correlação exponencial inversa com a produtividade de grãos de soja. Entretanto, do ponto de vista espacial, o número de vagens por planta apresentou-se como bom indicador da produtividade de grãos de soja.

PALAVRAS-CHAVE: *Glycine max*, componentes de produção da soja; agricultura de precisão; manejo do solo; índice de cone.

plantada com a leguminosa ocupou 21,73 milhões de hectares, com produtividade média estimada em 2.629 kg ha⁻¹.

O sistema de semeadura direta constitui-se na implantação de culturas agrícolas em solo sem revolvimento e protegido por cobertura morta (Fidelis et al. 2003). A utilização deste sistema tem sido associada ao maior controle da erosão, ao aumento da porosidade total do solo e à maior conservação de água do solo, resultando em aumento da disponibilidade

1. Trabalho recebido em dez./2009 e aceito para publicação em jan./2011 (n° registro: PAT 8351/ DOI 10.5216/pat.v41i1.8351).
2. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, Ilha Solteira, SP, Brasil. E-mails: fcdalchiavon@hotmail.com, morel@agr.feis.unesp.br, debora_nogueira11@yahoo.com.br, romanoagro@hotmail.com, fabianaabrantess@hotmail.com, juliana.teodora@hotmail.com, mariosergiogyn@gmail.com.

de água às plantas, amenizando efeitos de estiagens e, conseqüentemente, assegurando possibilidade de maior rendimento das culturas (Soratto 2002).

A compactação do solo pode reduzir a penetração das raízes (Bengough et al. 2001) e alterar o equilíbrio na proporção de gases do solo e a disponibilidade de água e nutrientes às plantas (Stirzaker et al. 1996). Em consequência, o funcionamento bioquímico da planta é alterado, restringindo, entre outros fatores, a taxa fotossintética, o crescimento da parte aérea (Turner 1997) e a produção da cultura (Beutler & Centurion 2004). Um dos parâmetros utilizados para se avaliar a compactação do solo é a resistência mecânica à penetração, pois se correlaciona inversamente com o crescimento radicular, sendo eficiente na identificação da compactação, quando acompanhada da umidade do solo (Freddi et al. 2006).

Os níveis críticos de resistência mecânica do solo, para o crescimento radicular das plantas, variam com o tipo de solo e a espécie cultivada (Martins et al. 2009). Assim, recomenda-se sua avaliação quando o teor de água do solo estiver próximo ao valor da capacidade de campo. Entretanto, quando obtida no momento em que a umidade do solo aproxima-se de 2/3 da microporosidade (solo friável/macio) (Reichert et al. 2007, Rosa Filho 2008), a maioria dos trabalhos tem adotado a seguinte classificação de resistência à penetração (RP), estabelecida por Arshad et al. (1996): a) extremamente baixa: $RP < 0,01$ MPa; b) muito baixa: $0,01 \leq RP < 0,1$ MPa; c) baixa: $0,1 \leq RP < 1,0$ MPa; d) moderada: $1,0 \leq RP < 2,0$ MPa; e) alta: $2,0 \leq RP < 4,0$ MPa; f) muito alta: $4,0 \leq RP < 8,0$ MPa; e g) extremamente alta: $RP > 8,0$ MPa.

À luz da estatística clássica, normalmente, ao se analisarem os atributos do solo, as consequências da heterogeneidade espacial sobre a representatividade dos valores médios são ignoradas. No entanto, o método geoestatístico, além de analisar a dependência espacial destes valores, ainda proporciona meios para que sejam efetuados os respectivos mapeamentos, por meio da krigagem e/ou da cokrigagem. Desta forma, a extensão multivariada da krigagem, conhecida como cokrigagem, é utilizada quando, entre dois atributos quaisquer, do solo e/ou da planta, ocorrer dependência espacial, tanto para cada um deles, como entre eles. Além disto, exclusivamente em relação à variável primária, que normalmente é subamostrada, esta técnica possibilita efetuar a estimativa dos seus valores não amostrados. A cokrigagem pode ser mais

precisa do que a krigagem de um atributo simples, quando o semivariograma cruzado apresentar dependência entre dois atributos quaisquer (Trangmar et al. 1985). Portanto, conforme preceitos de Coelho (2003), este procedimento permite determinar se um atributo apresenta ou não estrutura espacial e, uma vez conhecido o modelo da dependência espacial, é possível mapear a área estudada. Desta forma, são estabelecidas zonas específicas de manejo, que são fundamentais à aplicação de insumos com taxas variadas e/ou à execução de uma prática qualquer de manejo/conservação do solo (por exemplo, descompactação de zonas compactadas), condições necessárias à agricultura de precisão.

O semivariograma é um gráfico que caracteriza a estrutura da variância do atributo estudado como variável regionalizada da planta e/ou do solo, em função da distância no terreno. O alcance da dependência espacial é o principal parâmetro fornecido pela geoestatística, representando a distância dentro da qual os valores de um determinado atributo são iguais entre si. Por outro lado, tais valores passam a assumir magnitudes distintas, maiores ou menores, a partir do seu valor. Seu conhecimento é de extrema importância à agricultura de precisão, uma vez que os programas computacionais o utilizam para, em função da inteligência artificial que o geoprocessamento desempenha via satélite, poder monitorar o maquinário agrícola, quando da aplicação de insumos ou utilização de determinadas práticas de manejo, com taxas variáveis (Coelho 2003).

Devido tanto ao recém-surgimento como à inquestionável importância prática da agricultura de precisão, ultimamente, no Brasil, os estudos geoestatísticos dos atributos físicos do solo com a produtividade da soja vêm se intensificando (Johann et al. 2004, Zanette et al. 2007, Faraco et al. 2008, Marins et al. 2008, Rosa Filho et al. 2009). Assim, em relação à produtividade da soja, resistência mecânica à penetração e à umidade gravimétrica, os alcances da dependência espacial observados pelos referidos autores variaram da seguinte maneira: a) 28,0-877,0 m, para a produtividade da soja; b) 23,7-1.383,0 m, para a resistência à penetração; e c) 5,2-674,0 m, para a umidade gravimétrica.

Diante do exposto, com vistas a se determinar alguns preceitos da agricultura de precisão para as condições de Cerrado, em Selvíria (MS), o presente trabalho objetivou analisar as correlações, lineares e espaciais, dos componentes de produção e da produtivi-

vidade da soja com a resistência mecânica à penetração de um Latossolo, sob sistema de semeadura direta.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na área experimental da Fazenda de Ensino e Pesquisa - Setor de Produção Vegetal, da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/Unesp), localizada no município de Selvíria (MS), entre as latitudes 20°20'54"S e 20°21'03"S, longitudes 51°24'23"W e 51°24'29"W e altitude média de 300 m, no ano agrícola 2008/2009. O clima é classificado como Aw, segundo preceitos de Köppen, referidos por Vianello & Alves (2004), caracterizado como tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno. Durante todo o ciclo da cultura, a precipitação pluvial, a umidade média diária relativa do ar e a temperatura média diária foram, respectivamente, de 746,4 mm, 80,5% e 25,9°C.

O solo no qual a malha experimental foi instalada é um Latossolo Vermelho distroférico típico muito argiloso, A moderado (Typic Acrustox), com declive homogêneo de 0,055 m m⁻¹ (5,5%) (Embrapa 2006). A composição granulométrica, na camada 0-0,30 m, é de 220 g kg⁻¹, 120 g kg⁻¹ e 660 g kg⁻¹, respectivamente, para as frações areia, silte e argila. No ano agrícola 1998/1999, o solo foi preparado com arado de aivecas. Contudo, há dez anos vem sendo cultivado, no sistema de semeadura direta, com rotação de culturas (1- soja, 2- milho e 3- algodão), sucedida por culturas invernais (1- aveia preta, 2- feijão e 3- trigo).

A soja (*Glycine max* L. Merrill) foi semeada no dia 02/12/2008 (cultivar BRS-68 Vencedora), sendo seu cultivo conduzido segundo as indicações técnicas para as principais culturas econômicas do Estado de São Paulo (Fahl et al. 1998). O espaçamento entre linhas foi de 0,45 m, com população final de 16 plantas por metro, na linha de semeadura. Na adubação de semeadura, foram utilizados 300 kg ha⁻¹ da formulação 04-20-20.

Foram definidas as direções x e y do sistema de coordenadas cartesianas, em lançante estabelecido por três faixas de terraços agrícolas. Para tanto, foi utilizado, para o georrefenciamento dos pontos amostrais, um aparelho GPS com precisão de 1,0-3,0 m. A área pesquisada compreendeu 83.421 m² (8,34 ha), com as coordenadas cartesianas y = 299 m e x = 279 m equivalendo às coordenadas UTM de latitudes 7.749.933S-7.749.634S e longi-

tudes 457.645W-457.366W. A distribuição dos 120 pontos amostrais estudados foi efetuada aleatoriamente pela área pesquisada, de forma que a distância entre eles ficasse homogeneamente distribuída, isto é, nem muito próximos e/ou muito distantes. Desta forma, em média, cada ponto amostral ficou compreendido em área de 695,18 m² (26,37 m x 26,37 m). Os atributos do solo e da planta pesquisados foram todos individualmente coletados no entorno de cada ponto amostral da malha experimental, tido como área útil. Em tal área, todos os 120 pontos foram alocados nas entrelinhas de semeadura, de forma que cada ponto ficasse no meio de duas delas (0,90 m). O comprimento de 1,00 m foi estabelecido no sentido de tais linhas. Assim, a área útil de cada ponto amostral foi de 0,90 m².

Os atributos pesquisados do solo foram a resistência mecânica à penetração (RP) e a umidade gravimétrica (UG), coletadas em abril de 2009. As três profundidades de coleta foram 0-0,10 m; 0,10-0,20 m; e 0,20-0,30 m. Portanto, a relação dos seis atributos do solo foi a seguinte: RP1, RP2, RP3, UG1, UG2 e UG3. Já os atributos da planta foram: a) produtividade de grãos obtida (PGO), b) produtividade de grãos calculada (PGC), c) número de vagens por planta (NVP), d) número de grãos por vagem (NGV), e) número de grãos por planta (NGP), f) massa de mil grãos (MMG), g) massa de grãos por planta (MGP) e h) população de plantas (POP). A colheita das plantas, assim como a coleta dos atributos do solo, foi realizada em 01/04/2009.

As amostras deformadas de solo, coletadas com trado de caneco com 0,10 m de diâmetro e 0,20 m de altura, foram utilizadas para determinar a UG, expressa em kg kg⁻¹ (Embrapa 1997). Os dados da RP foram obtidos com o penetrômetro de impactos e calculados segundo a expressão $RP = \{5,581 + 6,891 \cdot [N/(P-A) \cdot 10]\} \cdot 0,0981$ (Souza et al. 2001), onde RP é a resistência mecânica do solo à penetração (MPa); N o número de impactos efetuados com o martelo do penetrômetro para a obtenção da leitura no sabre; e A e P são, respectivamente, as leituras de penetração no solo antes e depois da realização dos impactos (cm). Os cálculos foram efetuados no Laboratório de Análises Físicas do Solo da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/Unesp).

Para as avaliações referentes aos componentes da produção e à produtividade, no momento da colheita, 10 plantas na área útil de cada ponto amostral foram levadas ao Laboratório de Análises

de Sementes, para as seguintes determinações: NVP (número total de vagens/número total de plantas); NGV (número total de grãos/número total de vagens); NGP (número total de grãos/número total de plantas); MMG (g) (determinada mediante coleta ao acaso e pesagem de uma amostra de 1.000 grãos de cada uma das 120 parcelas amostrais, com a umidade corrigida para 13% (base úmida)); MGP (g) (NGP x MMG/1.000); POP (avaliada em campo, contando-se as plantas contidas em duas linhas de 1 metro, em cada ponto amostral, estimando-se o resultado em número de plantas por hectare); PGO (kg ha⁻¹) (teve como área útil 2 linhas de semeadura por 1 metro de comprimento, onde as plantas foram colhidas e, após secagem, submetidas a trilha manual e, em seguida, determinou-se a massa destes grãos, sendo os dados transformados em kg ha⁻¹ (13% base úmida)); e PGC (kg ha⁻¹) (MGP (g) x POP/1.000).

Para cada atributo estudado, efetuou-se a análise descritiva clássica, com auxílio do *software* estatístico SAS (Schlotzhaver & Littell 1997), em que foram calculados a média, mediana, valores mínimos e máximos, desvio-padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria e distribuição de frequência. Posteriormente, realizou-se a identificação dos *outliers*, efetuando-se a substituição dos seus valores pelo valor médio dos circunvizinhos contidos na malha. Para testar a hipótese de normalidade, ou de lognormalidade, realizou-se o teste de Shapiro & Wilk (1965), a 1%.

Foi montada a matriz de correlação, objetivando-se efetuar as correlações lineares simples para as combinações, duas a duas, entre todos os atributos estudados. Assim, selecionaram-se aqueles de maior correlação linear e que, portanto, poderiam apresentar semivariograma cruzado e a consequente cokrigagem.

Isoladamente, para cada atributo, foi analisada sua dependência espacial, pelo cálculo do semivariograma simples. Entretanto, 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).

Os ajustes dos semivariogramas simples e cruzados, em função de seus modelos, foram efetuados, prioritariamente, pela seleção inicial de: a) menor soma dos quadrados dos desvios (RSS); b) maior coeficiente de determinação (r²); e c) maior avaliador da dependência espacial (ADE). A decisão final do

modelo que representou o ajuste foi realizada pela validação cruzada, assim como para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionou a melhor malha de krigagem e/ou cokrigagem, realizadas por meio da krigagem em blocos.

Para cada atributo, foram relacionados o efeito pepita (Co), o alcance (Ao) e o patamar (Co + C). A análise do avaliador da dependência espacial (ADE) foi realizada conforme sugestões de Cambardella et al. (1994), modificadas pelo GS+ (2004), conforme a expressão $ADE = [C/(C + Co)] \cdot 100$, onde ADE é o avaliador da dependência espacial; C a variância estrutural; e C + Co o patamar. A interpretação proposta para o ADE foi a seguinte: $ADE \leq 25\%$ indica variável espacial fracamente dependente; $25\% < ADE \leq 75\%$ indica variável espacial moderadamente dependente; e $ADE > 75\%$ indica variável espacial fortemente dependente. Sabe-se, porém, que a validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas simples e cruzados, que efetuarão, respectivamente, a krigagem e a cokrigagem. Na sua análise, cada ponto contido dentro do domínio espacial é removido individualmente, sendo seu valor estimado como se ele não existisse. Desta forma, pode-se construir um gráfico de valores estimados *versus* valores observados, para todos os pontos. O coeficiente de correlação (r) entre tais valores reflete a eficiência do ajuste dado pela técnica da soma dos quadrados dos desvios, representando a equação de regressão linear em questão. Um ajuste perfeito teria o coeficiente de regressão igual a 1 e a linha do melhor ajuste coincidiria com o modelo perfeito, isto é, com o coeficiente linear igual a zero e o angular igual a 1 (GS+ 2004). Assim, trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos, foram obtidos, por meio da interpolação, os mapas de krigagem e de cokrigagem, para análise da dependência e da interdependência espacial entre os atributos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme a Tabela 1, observou-se que a produtividade de grãos obtida (PGO) e a produtividade de grãos calculada (PGC) apresentaram coeficiente de variação (CV) de 21,8% e 24,1%, com valores médios de 4.639,4 kg ha⁻¹ e 4.895,4 kg ha⁻¹, respectivamente, corroborados por Costa & Thomas (2004), que relataram produtividade média de 4.440 kg ha⁻¹, e Amado et al. (2007a), que obtiveram produtividades variando

de 4.430 kg ha⁻¹ a 4.660 kg ha⁻¹. Entretanto, tais produtividades foram bem superiores às médias, todas no sistema plantio direto, de 3.220 kg ha⁻¹ (Faraco 2006); 2.240 kg ha⁻¹, em Latossolo Vermelho distrófico (Amado et al. 2007b); 3.380 kg ha⁻¹, em área de Cerrado (Silva et al. 2009); e de 3.318 kg ha⁻¹, em Latossolo Vermelho distroférrico (Rosa Filho et al. 2009), assim como à média nacional de 2.629 kg ha⁻¹ (Conab 2009).

Com relação ao número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), número de grãos por planta (NGP), massa de mil grãos (MMG) e massa de grãos por planta (MGP), os valores médios foram de 72,2 g; 2,2 g; 157,6 g; 144,1 g e 23,0 g, com coeficientes de variação de 25%; 8,6%; 25,2%; 9,4%; e 28,7%, respectivamente. Os valores dos componentes de produção garantiram a apreciável produtividade mencionada neste estudo, pois, como se pôde verificar, todos se expressaram satisfatoriamente, em especial o NVP, uma vez que não houve limitação nutricional às plantas e tampouco no conteúdo de água no solo (Tabela 1).

Pires (2002), pesquisando o potencial produtivo da soja no Rio Grande do Sul, em semeadura direta, obteve valores médios de 2,2 g; 40,6 g; 181,0 g; e 14,3 g, com coeficientes de variação de 19,0%; 85,0%; 29,0%; e 93%, para os componentes de produção NGV, NVP, MMG e MGP, respectivamente, e produtividade média de 3.029 kg ha⁻¹, valores, estes, que, com exceção da MMG, são superados pelos resultados deste estudo. Da mesma forma, com base na Tabela 1, para as características NGV e MMG, os valores obtidos são superiores aos relatados por Linzmeyer Júnior (2006), sendo eles 2,0 g e 123,0 g, respectivamente. Moreira et al. (2008) também estudaram as características NVP, NGV, MMG e PGO e observaram valores médios de 52 g; 2,05 g; 205,8 g; e 4.512 kg ha⁻¹, respectivamente. Esta considerável produtividade deve-se ao expressivo valor da MMG verificada em seu estudo.

A respeito dos atributos do solo (Tabela 1), a mediana para resistência mecânica à penetração (RP1) foi de 1,288 MPa, classificando-o como de moderada compactação (Arshad et al. 1996), com dis-

Tabela 1. Análise descritiva inicial de alguns atributos da produtividade de soja e de um Latossolo Vermelho distroférrico (Selvíria, MS, 2008/2009).

Atributo ⁽¹⁾	Medidas estatísticas descritivas									
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente			Probabilidade do teste ⁽²⁾	
			Máximo	Mínimo		Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr < w	DF
<i>Atributos da planta</i>										
PGO (kg ha ⁻¹)	4.639,4	4.568,9	8.303,3	2.250,4	1.010,030	21,8	0,870	0,464	0,148	NO
PGC (kg ha ⁻¹)	4.895,4	4.867,2	4.877,8	2.220,6	1.179,744	24,1	-0,093	0,202	0,837	NO
NVP	72,2	70,9	118,7	29,5	18,037	25,0	-0,290	0,180	0,832	NO
NGV	2,2	2,2	2,7	1,8	0,189	8,6	0,448	-0,149	0,133	LN
NGP	157,6	156,9	264,9	66,1	39,703	25,2	0,172	0,202	0,590	NO
MMG (g)	144,1	143,9	182,7	113,0	13,478	9,4	0,206	0,244	0,601	NO
MGP (g)	23,0	22,9	43,1	10,5	6,595	28,7	-0,113	0,359	0,117	NO
POP	217.500,0	211.111,1	322.222,0	133.333,0	38.318,8	17,6	-0,210	0,279	0,128	NO
<i>Resistência à penetração</i>										
RP1 (MPa)	1,361	1,288	2,782	0,409	0,515	37,9	0,281	-0,467	0,020	TL
RP2 (MPa)	2,134	2,131	3,428	0,907	0,472	22,1	0,168	0,262	0,449	NO
RP3 (MPa)	2,180	2,193	3,278	0,995	0,423	19,4	0,358	0,064	0,633	NO
<i>Umidade gravimétrica</i>										
UG1 (kg kg ⁻¹)	0,192	0,192	0,229	0,156	0,015	7,6	-0,519	-0,017	0,499	NO
UG2 (kg kg ⁻¹)	0,190	0,191	0,216	0,157	0,013	6,6	-0,387	-0,079	0,356	NO
UG3 (kg kg ⁻¹)	0,190	0,190	0,222	0,162	0,014	7,2	-0,469	0,244	0,249	NO

⁽¹⁾ PGO = produtividade de grãos obtida; PGC = produtividade de grãos calculada; NVP = número de vagens por planta; NGV = número de grãos por vagem; NGP = número de grãos por planta; MMG = massa de mil grãos; MGP = massa de grãos por planta; POP = população de plantas; RP e UG, de 1 a 3, são, respectivamente, a resistência mecânica do solo à penetração e a umidade gravimétrica do solo, às profundidades de 0-010 m; 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m. ⁽²⁾ Pr < w = teste de normalidade Shapiro & Wilk; DF = distribuição de frequência, sendo NO, LN e TL, respectivamente, do tipo normal, lognormal e tendendo a lognormal.

tribuição de frequência tendendo a lognormal. Já para RP2 e RP3, com distribuição de frequência normal, os valores médios verificados foram de 2,134 MPa e 2,180 MPa, respectivamente, com variabilidade de 38% (RP1), 22% (RP2) e 19% (RP3), denotando alta compactação em subsuperfície, porém, não a ponto de restringir seriamente o desenvolvimento da cultura. Estes resultados discordam dos encontrados por Silva et al. (2004), que estudaram a variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração, em sistema plantio direto, em Latossolo Vermelho distroférico típico, e obtiveram valores de RP entre 0,20 MPa e 2,80 MPa, em profundidades de 0,05-0,25 m, e CV de 39,6%, à profundidade de 0,05 m. Já Faraco et al. (2008) observaram, nas camadas 0,0-0,10 m; 0,10-0,20 m; e 0,20-0,30 m, valores médios de RP de 2,729 MPa; 2,427 MPa; e 2,101 MPa, com coeficientes de variação de 24,50%; 21,04%; e 25,39%, respectivamente, sendo os valores de compactação mais elevados nos primeiros níveis de profundidade. Estes autores observaram, ainda, que os valores da RP, na camada 0,0-0,10 m, variaram entre 0,671 MPa e 4,269 MPa, resultados, estes, bem superiores aos obtidos no presente trabalho e que, provavelmente, apresentaram sérias restrições ao crescimento radicular da cultura.

A umidade gravimétrica (UG) apresentou baixa variabilidade (6,6% a 7,6%) e distribuição de frequência do tipo normal, para todas as profundidades analisadas, com médias variando de 0,190 kg kg⁻¹ a 0,192 kg kg⁻¹ (Tabela 1). Tal fato está de acordo com Souza et al. (2004), que, trabalhando em Latossolo Vermelho, à profundidade de 0,0-0,20 m, observaram que os resultados de umidade do solo indicaram distribuição normal, com CV de 8,68% e valores da média (0,2152 kg kg⁻¹) e mediana (0,2151 kg kg⁻¹) próximos, mostrando simétrica distribuição de frequência. Desta forma, quando uma variável estatística qualquer possuir distribuição de frequência de tipo normal, a medida de tendência central mais adequada para representá-la deve ser a média. Em contrapartida, tal medida deverá ser representada pela mediana ou pela média geométrica, caso possua distribuição de frequência do tipo lognormal (Spiegel 1985). Portanto, todas as variáveis estudadas, com exceção do NGV e RP1, apresentaram distribuição de frequência do tipo normal, em que os valores médios representarão as medidas de tendência central. Os coeficientes de assimetria positiva ficaram entre 0,064 e 0,464 e, para a negativa, entre -0,467

e -0,017. Para os coeficientes de curtose positiva, os valores ficaram entre 0,168 e 0,870 e, para a negativa, entre -0,519 e -0,093. Desta forma, todos os atributos analisados foram significativos a 5%, pelo teste de normalidade de Shapiro & Wilk (1965), com variação de probabilidade entre 0,020 e 0,837.

Entre os atributos do solo analisados, não foram observadas correlações (direta e indireta) entre os pares de atributos (Tabela 2). A correlação entre a PGO e os atributos do solo apresentou significância exclusivamente para pares PGO x RP2 ($r = -0,219$) e PGO x UG3 ($r = -0,191$). Para os dois pares, as correlações foram inversas, indicando que, com o aumento da RP2 e da UG3, ocorrerá a diminuição da produtividade de soja. Assim, tais dados corroboraram o que foi observado por Rosa Filho et al. (2009), que também verificaram tal comportamento, em relação à RP2 e UG3, mostrando a influência do solo na produtividade da cultura. Por outro lado, também corroboraram o observado por Stone et al. (2002), uma vez que a compactação desencadeia uma alteração estrutural e reorganização das partículas e de seus agregados, aumentando a microporosidade e, por consequência, a UG do solo, causando, também, menor absorção de nutrientes, menor infiltração e redistribuição de água, redução das trocas gasosas e do crescimento e desenvolvimento do sistema radicular, resultando em decréscimo da produtividade das culturas.

Os modelos matemáticos $PGO = f(RP2)$ e $PGO = f(UG3)$, representados nas Figuras 1a e 1b, foram, respectivamente, do tipo exponencial e linear, com coeficientes de correlação de -0,226 e -0,191. O modelo matemático da $PGO = f(RP2)$ diferiu do modelo quadrático obtido por Beutler et al. (2007), porém, concordou com o modelo obtido por Rosa Filho et al. (2009), sendo que ambos também relataram efeito inverso entre causa (RP) e efeito (PGO).

O valor de RP preconizado como crítico para o desenvolvimento radicular normal da maioria das culturas agrícolas é 2,0 MPa (Tormena et al. 1998), devendo-se obter tal RP no momento em que a umidade do solo estiver próxima a 2/3 da microporosidade. Desta forma, pela aplicação da equação contida na Figura 1a, pode-se ressaltar que, em relação ao valor crítico de RP de 2,0 MPa, a PGO teve seus mais elevados valores (5.159-4.594 kg ha⁻¹) quando a RP2 variou entre 0,907 MPa e 2,000 MPa. Em contrapartida, os mais baixos valores (4.594-3.949 kg ha⁻¹) foram observados quando a RP2 variou entre 2,000 MPa

Tabela 2. Matriz de correlação linear simples entre a produtividade de grãos de soja e alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico (Selvíria, MS, 2008/2009).

Atributos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)												
	PGO	PGC	NVP	NGV	NGP	MMG	MGP	POP	RP1	RP2	RP3	UG1	UG2
PGC	0,772**												
NVP	0,651**	0,669**											
NGV	-0,065	-0,013	-0,205*										
NGP	0,573**	0,697**	0,885**	0,140									
MMG	0,369**	0,443**	0,220*	-0,230*	0,099								
MGP	0,614**	0,787**	0,838**	0,042	0,911**	0,383**							
POP	-0,048	-0,017	-0,546**	-0,080	-0,564**	-0,045	-0,545**						
RP1	-0,172	-0,211*	-0,196*	-0,024	-0,165	-0,144	-0,213*	0,104					
RP2	-0,219*	-0,216*	-0,187*	0,025	-0,134	-0,174	-0,150	0,023	0,659**				
RP3	-0,042	-0,062	-0,082	-0,098	-0,058	0,060	-0,032	-0,005	0,294**	0,579**			
UG1	0,051	0,026	0,076	0,001	0,075	-0,111	0,073	-0,037	-0,112	-0,079	0,063		
UG2	-0,071	-0,071	-0,044	-0,105	-0,038	-0,242**	-0,048	0,062	-0,028	-0,016	0,041	0,724**	
UG3	-0,191*	-0,200*	-0,135	-0,102	-0,147	-0,312**	-0,185*	0,088	0,018	0,036	-0,013	0,635**	0,756**

^(a) PGO = produtividade de grãos obtida; PGC = produtividade de grãos calculada; NVP = número de vargens por planta; NGV = número de grãos por vagem; NGP = número de grãos por planta; MMG = massa de mil grãos; MGP = massa de grãos por planta; POP = população de plantas. RP e UG, de 1 a 3, são, respectivamente, a resistência mecânica à penetração e a umidade gravimétrica, coletadas à profundidade de 0-010 m; 0,10-0,20 m; e 0,20-0,30 m. ^(b) * Significativo a 5%; ** Significativo a 1%.

e 3,428 MPa. Neste sentido, Beutler et al. (2007) tiveram sua PGO variando entre 2.946 kg ha⁻¹ e 2.720 kg ha⁻¹, quando os valores de RP variaram entre 0,37 MPa e 2,63 MPa, para um conteúdo de água no solo de 0,22 kg kg⁻¹. Da mesma forma, Rosa Filho et al. (2009) observaram PGO máxima de 4.055 kg kg⁻¹, correspondente à RP do solo de 2,23 MPa, e PGO mínima de 3.475 kg kg⁻¹, equivalente à RP do solo de 5,05 MPa, cujo conteúdo de água no solo era de 0,24 kg kg⁻¹. Portanto, considerando-se os trabalhos citados, os dados da PGO e da RP desta pesquisa (Tabela 1) apresentaram-se da seguinte forma: a PGO média (4.639,4 kg kg⁻¹) foi 1,43 vez superior àquela

relatada por Beutler et al. (2007) e 1,40 vez superior à relatada por Rosa Filho et al. (2009) e a RP média (1,892 MPa) foi 1,46 vez superior àquela relatada por Beutler et al. (2007) e 1,79 vez inferior à relatada por Rosa Filho et al. (2009).

Com base na Tabela 3 e na Figura 2, em relação aos atributos do solo, nenhum apresentou dependência espacial, havendo somente efeito pepita puro. Já os atributos da planta, com exceção do NGV e MMG, que apresentaram efeito pepita puro, todos os demais atributos apresentaram dependência espacial. Verifica-se, nos semivariogramas simples, que o coeficiente de determinação espacial (r^2) decresceu

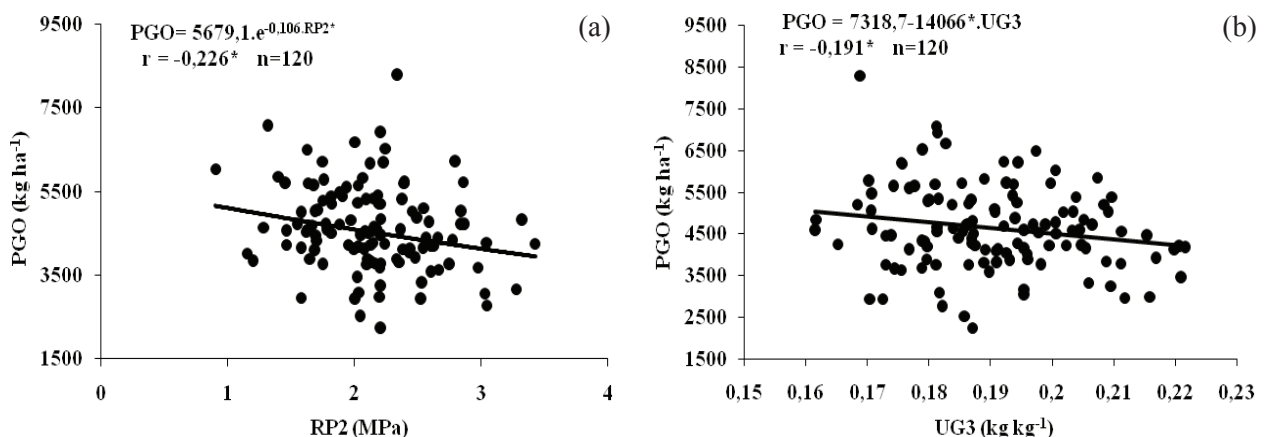


Figura 1. Equações de regressão da produtividade de grão obtida (PGO) da soja, em função da Resistência do Solo à Penetração, à profundidade de 0,10-0,20 m (a), e Umidade Gravimétrica do Solo, à profundidade de 0,20-0,30 m (b), em Latossolo Vermelho distroférico (Selvíria, MS, 2008/2009).

Tabela 3. Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados de alguns atributos da produtividade de soja e de um Latossolo Vermelho Distroférico (Selvíria, MS, 2008/2009).

Atributo ⁽¹⁾	Parâmetros							
	Modelo ⁽²⁾	Efeito Pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ +C)	Alcance (m) (A ₀)	r ²	SQR ⁽³⁾	ADE ⁽⁴⁾	Classe de dependência espacial
<i>γ (h) simples dos atributos da planta</i>								
PGO (kg ha ⁻¹)	exp (66)	8,200.10 ⁴	7,412.10 ⁵	38,1	0,774	2,410.10 ¹⁰	88,9	Alta
PGC (kg ha ⁻¹)	exp (77)	5,680.10 ⁵	1,396.10 ⁶	96,0	0,847	7,250.10 ¹⁰	59,3	Moderada
NVP	esf (222)	1,055.10 ²	3,004.10 ²	99,5	0,889	2,793	64,9	Moderada
NGP	esf (234)	5,810.10 ²	1,289.10 ³	97,1	0,837	5,261.10 ⁴	54,9	Moderada
MGP (g)	esf (267)	1,744.10	4,454.10	114,7	0,928	3,850.10	60,8	Moderada
POP	exp (44)	5,380.10 ⁸	1,400.10 ⁸	112,5	0,697	1,320.10 ¹⁷	52,8	Moderada
<i>γ (h) cruzados entre os atributos da planta</i>								
PGO=f(PGC) (kg ha ⁻¹)	exp (68)	2,800.10 ⁴	6,290.10 ⁵	35,7	0,799	1,490.10 ¹⁰	95,5	Alta
PGO=f(NGP) (kg ha ⁻¹)	exp (56)	3,500.10 ³	1,392.10 ⁴	93,0	0,597	4,180.10 ⁷	74,9	Moderada
PGO=f(NVP) (kg ha ⁻¹)	esf (183)	2,600.10 ³	9,720.10 ³	102,3	0,845	5,871.10 ³	73,3	Moderada
PGO=f(MGP) (kg ha ⁻¹)	esf (311)	1,587.10 ³	3,545.10 ³	99,6	0,784	5,304.10 ⁵	55,2	Moderada
NGP=f(NVP)	esf (240)	1,400.10 ²	4,938.10 ²	103,8	0,928	4,782.10 ³	71,6	Moderada

⁽¹⁾ PGO = produtividade de grãos obtida; PGC = produtividade de grãos calculada; NVP = número de vagens por planta; NGP = número de grãos por planta; MGP = massa de grãos por planta; e POP = população de plantas. ⁽²⁾ exp = exponencial; esf = esférico. ⁽³⁾ SQR = soma dos quadrados dos resíduos. ⁽⁴⁾ ADE = avaliador da dependência espacial.

na seguinte ordem: MGP (0,928), NVP (0,889), PGC (0,847), NGP (0,837), PGO (0,774) e POP (0,697). Assim, em relação aos dois primeiros, que tiveram elevados coeficientes de determinação espacial, observou-se que, para o MGP, seu r² (0,928) indicou ser o atributo de melhor ajuste semivariográfico. Em relação ao ADE, o valor observado (60,8%) foi moderado, com alcance de 114,7 m, com um ajuste do modelo esférico, discordando de Pires (2002), que ajustou o modelo exponencial. Para o NVP, seu r² (0,889) indicou ser tal atributo o segundo de melhor ajuste semivariográfico. O ADE observado (64,9%) foi moderado, com o alcance de 99,5 m e um ajuste esférico, corroborado por Pires (2002).

A relação decrescente dos alcances apresentados na Tabela 3 foi MGP (114,7 m), POP (112,5 m), NVP (99,5 m), NGP (97,1 m), PGC (96,0 m) e PGO (38,1 m). Então, em auxílio a trabalhos futuros, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos que alimentarão os pacotes computacionais empregados na agricultura de precisão, em geral, não deverão ser menores do que 38,1 m, por representarem a distância dentro da qual os valores de um determinado atributo são iguais entre si.

A Figura 2 apresenta os mapas de krigagem simples das produtividades (PGO e PGC) e de al-

guns componentes de produção da soja (NVP, NGP, MGP e POP). Em todas as seis krigagens, pode-se observar que, nas regiões centro-leste, leste, sudeste e sul ocorreram os mais elevados valores da PGO (4.816-6.145 kg ha⁻¹), PGC (5.242-6.524 kg ha⁻¹), NVP (74-91), NGP (162-194) e MGP (24-31g). Entretanto, para a POP, nestas mesmas regiões, ocorreram os menores valores (184.921-210.295). Em contrapartida, ocorreu o inverso nas regiões nordeste, norte, noroeste, oeste e sudoeste, isto é, os mais baixos valores da PGO (3.043-4.372 kg ha⁻¹), PGC (3.533-4.815 kg ha⁻¹), NVP (50-68), NGP (120-151) e MGP (15-22g). Da mesma forma, para a POP, nestas regiões, ocorreram os mais elevados valores da densidade populacional (218.753-244.127). Portanto, a PGO e a PGC apresentaram uma distribuição espacial dos seus valores de forma direta, com relação àqueles da NVP, NGP e MGP. Contudo, em relação à POP, tal distribuição foi inversa. Especificamente tratando-se da análise da distribuição espacial da produtividade de soja (PGO e PGC) com a densidade populacional (POP), os dados do presente estudo corroboraram aqueles de Shimada et al. (2000), que observaram correlação inversa entre a produtividade de grãos e a densidade populacional da soja.

A cokrigagem entre a PGO e NVP (Tabela 3 e Figuras 3a e 3b) evidenciou que 84,5% da va-

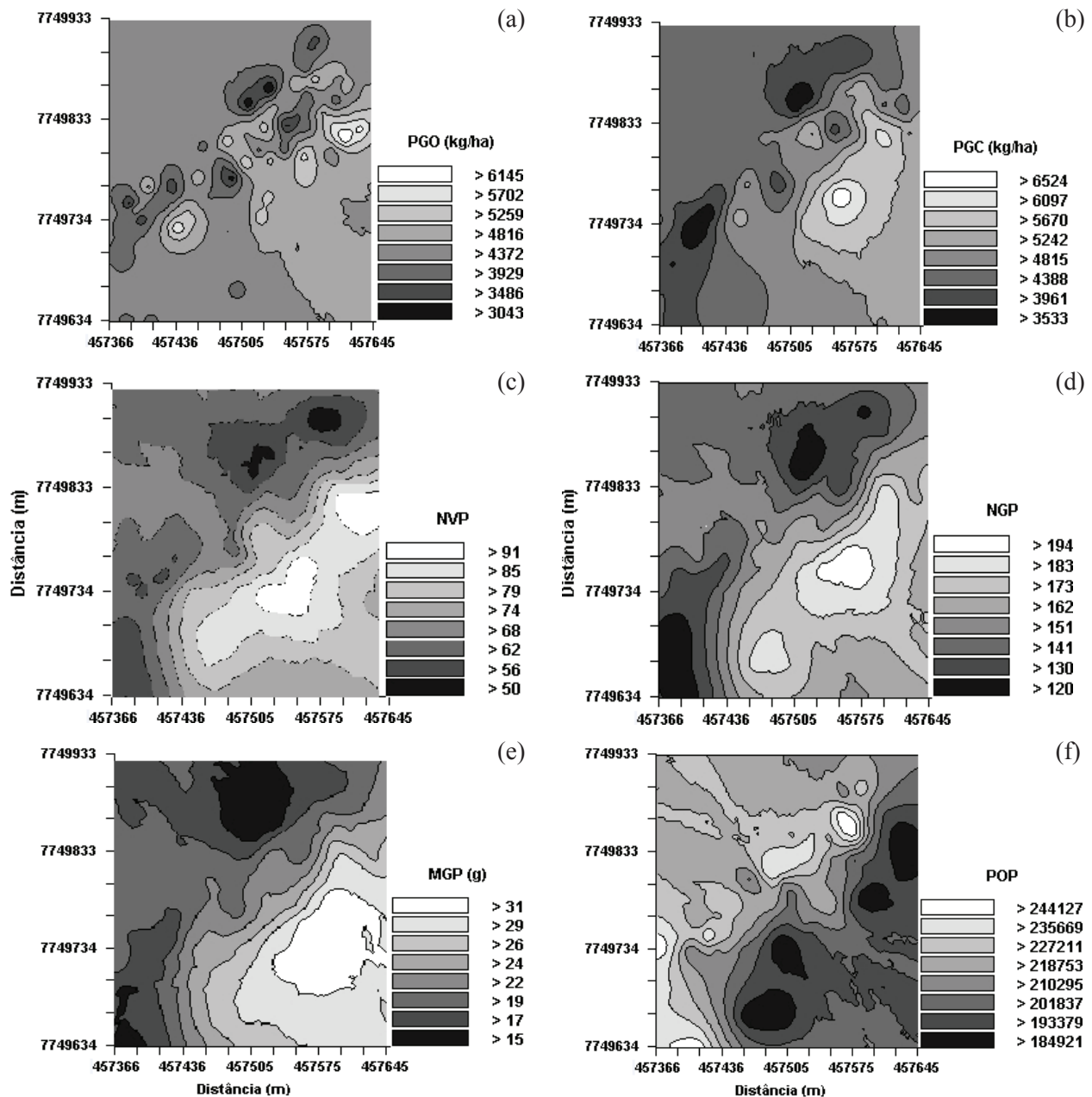


Figura 2. Mapas de krigagem simples das produtividades e de alguns atributos da soja (Selvíria, MS, 2008/2009).

riabilidade espacial da PGO foram explicadas pela variabilidade espacial da NVP. Assim, pôde-se constatar que, onde ocorreram os maiores valores da NVP (Figura 2c), foram mapeados os maiores valores da PGO (Figuras 2a e 3b), sendo o inverso verdadeiro. Portanto, do ponto de vista espacial da área pesquisada, nos sítios em que a cultivar de soja BRS-68 Vencedora apresentar número de vagens por planta (NVP) entre 74 e 91, a produtividade esperada de grãos de soja estará

compreendida entre 4.531 kg ha⁻¹ e 6.276 kg ha⁻¹. Por outro lado, naqueles onde o número de vagens por planta (NVP) estiver entre 50 e 68, a produtividade esperada de grãos de soja estará compreendida entre 2.204 kg ha⁻¹ e 3.949 kg ha⁻¹. Portanto, sob os pontos de vista espacial, prático e agrônomo, pôde-se constatar que o número de vagens por planta (NVP) apresentou-se como bom indicador da produtividade de grãos de soja (PGO e PGC).

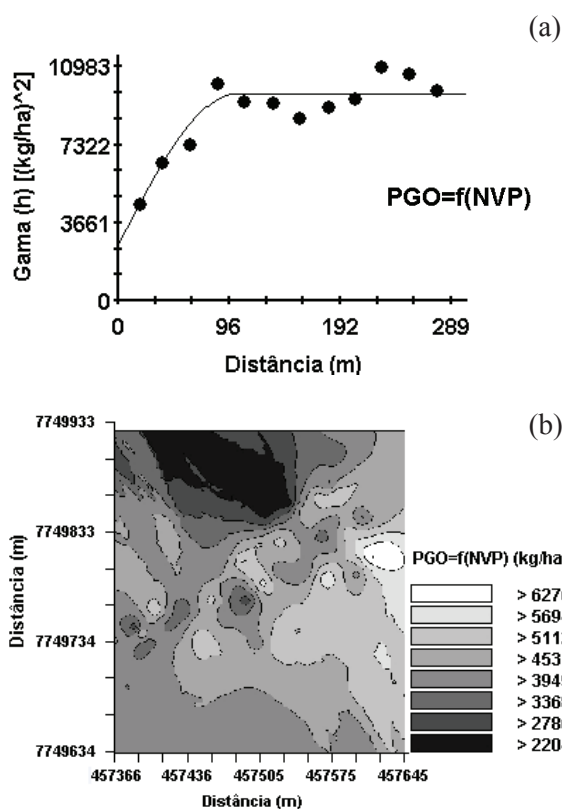


Figura 3. Semivariograma cruzado (a) e mapa de cokrigagem da produtividade de soja (b) (Selvíria, MS, 2008/2009).

CONCLUSÕES

1. Visando-se a auxiliar futuros trabalhos voltados à agricultura de precisão, os quais venham a utilizar os mesmos atributos que os do presente estudo, os valores dos alcances da dependência espacial a serem empregados deverão estar compreendidos entre 38,1 m e 114,7 m.
2. Do ponto de vista linear, a resistência mecânica à penetração do solo, quando avaliada na camada 0,10-0,20 m, apresentou boa correlação exponencial inversa com a produtividade de grãos de soja, dada por $PGO = 5.679 \times \exp^{-0,106 \times RP^2}$. Entretanto, do ponto de vista espacial, o número de vagens por planta apresentou-se como bom indicador da produtividade de grãos de soja.

REFERÊNCIAS

AMADO, T. J. C. et al. A safra recorde analisada pelos mapas de rendimento no RS. *Revista Plantio Direto*, Passo fundo, n. 101, p. 18-23, 2007a.

AMADO, T. J. C. et al. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 42, n. 8, p. 1101-1110, 2007b.

ARSHAD, M. A. et al. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 123-141.

BENGOUGH, A. G. et al. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. *Soil and environmental analysis: physical methods*. 2. ed. Edinburgh: Marcel Dekker, 2001. p. 377-403.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 39, n. 6, p. 581-588, jun. 2004.

BEUTLER, A. N. et al. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1223-1232, 2007.

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.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e da cultura. In: CURI, N. et al. (Ed.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. p. 249-290.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). *Acompanhamento da safra brasileira: grãos - décimo primeiro levantamento*, agosto 2009. Brasília, DF: Conab, 2009.

COSTA, J. A.; THOMAS, A. L. Potencial de rendimento da soja. *Revista Plantio Direto*, Passo fundo, n. 82, p. 28-32, 2004.

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). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006.

FAHL, J. I. et al. *Instruções agrícolas para as principais culturas*. 6. ed. rev. atual. Campinas: Instituto Agrônomo, 1998.

- FARACO, M. A. *Qualidade do ajuste de modelos geoestatísticos utilizados na agricultura de precisão*. 2006. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)—Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.
- FARACO, M. A. et al. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 463-476, 2008.
- FIDELIS, R. R. et al. Alguns aspectos do plantio direto para a cultura da soja. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 19, n. 1, p. 23-31, jan./abr. 2003.
- FREDDI, O. S. et al. 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.
- GS+. *Geostatistics for environmental sciences*. 7. ed. Michigan: Gamma Design Software, 2004.
- JOHANN, J. A. et al. 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.
- LINZMEYER JÚNIOR, R. *Influência de retardante vegetal e densidade de plantas no crescimento, componentes da produção, produtividade e acamamento na soja*. 2006. 51 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)—Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2006.
- MARINS, A. C. et al. Estimadores new1 e new2 no estudo da dependência espacial da produtividade da soja e atributos físicos do solo em uma área comercial. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v. 16, n. 2, p. 133-143, abr./jun. 2008.
- MARTINS, M. V. et al. Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringá, v. 31, n. 1, p. 147-154, 2009.
- MOREIRA, A. A. et al. Cultivo da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) submetido à adubação foliar com cálcio. *Perquirere*, Patos de Minas, n. 5, jun. 2008. Disponível em: <http://www.unipam.edu.br/perquirere/file/file/2008_ca/cultivo_da_solja.pdf>. Acesso em: dez. 2009.
- PIRES, J. L. F. *Estimativa do potencial produtivo da soja e variabilidade espacial de área de produção*. 2002. 160 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia)—Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- REICHERT, J. M. et al. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). *Tópicos em ciência do solo*. 7. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 49-135.
- ROSA FILHO, G. *Produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto*. 2008. 89 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção)—Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.
- ROSA FILHO, G. et al. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 283-293, 2009.
- 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*, Oxford, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, 1965.
- SHIMADA, M. et al. Componentes do rendimento e desenvolvimento do feijoeiro comum de porte ereto sob diferentes densidades populacionais. *Bragantia*, Campinas, v. 59, n. 2, p. 181-187, 2000.
- SILVA, V. R. et al. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 399-406, mar./abr. 2004.
- SILVA, J. M. et al. Variabilidade espacial da produtividade da soja sob dois sistemas de cultivo no Cerrado. *Engenharia Ambiental*, Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 2, p. 397-409, mai/ago. 2009.
- SORATTO, R. P. *Resposta do feijoeiro ao preparo do solo, manejo da água e parcelamento da adubação nitrogenada*. 2002. 72 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)—Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.
- SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 699-707, 2001.
- SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 937-944, 2004.
- SPIEGEL, M. R. *Estatística*. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.
- STIRZAKER, R. J. et al. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 185, n. 1, p. 151-162, 1996.

- STONE, L. F. et al. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: Efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 207-212, 2002.
- TORMENA, C. A. et al. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998.
- TRANGMAR, B. B. et al. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 38, n. 1, p. 45-94, 1985.
- TURNER, N. C. Further progress in crop water relations. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 58, n. 1, p. 293-325, 1997.
- VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. *Meteorologia básica e aplicações*. Viçosa: Ed. da UFV, 2004.
- ZANETTE, S. V. et al. 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.