

# CORRELAÇÃO LINEAR E ESPACIAL ENTRE A RESISTÊNCIA DO SOLO AO PENETRÔMETRO E A PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO IRRIGADO<sup>(1)</sup>

Márcio William Roque<sup>(2)</sup>, Edson Eiji Matsura<sup>(3)</sup>, Zigomar Menezes de Souza<sup>(3)</sup>, Douglas Roberto Bizari<sup>(4)</sup> & Anderson Luiz de Souza<sup>(4)</sup>

## RESUMO

A resistência do solo ao penetrômetro exerce grande influência sobre o crescimento e desenvolvimento vegetal, uma vez que o crescimento das raízes, assim como o rendimento das culturas, varia de forma inversamente proporcional ao seu valor. Dessa forma, a análise da variabilidade espacial da resistência do solo ao penetrômetro e da produtividade, por meio da geoestatística, pode indicar alternativas de manejo para reduzir os efeitos da variabilidade do solo sobre a produtividade e também melhorar a estimativa de respostas das culturas sob determinadas práticas de manejo. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi relacionar e caracterizar a variabilidade espacial da resistência do solo ao penetrômetro (RP) e a produtividade do feijoeiro irrigado em sistema de semeadura direta, em duas safras consecutivas. O experimento foi realizado em Latossolo Vermelho distroférico típico, no campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp, no município de Campinas-SP, cujas coordenadas geográficas são: 22 ° 48 ' 57 " de latitude sul, 47 ° 03 ' 33 " de longitude oeste e altitude média de 640 m. As avaliações foram realizadas em uma malha regular de amostragem de 3 x 3 m, totalizando 60 pontos amostrais por parcela. A análise da dependência espacial foi avaliada pela geoestatística, e os parâmetros dos semivariogramas utilizados para construir mapas de isolinhas, por meio do interpolador de krigagem do programa Surfer 8.0. A regressão linear simples entre mapas (pixel-a-pixel) mostrou correlação negativa entre os valores de RP e a produtividade; no entanto, a produtividade do feijoeiro irrigado apresentou baixa correlação com a resistência do solo ao penetrômetro em sistema semeadura direta nas duas safras.

**Termos de indexação:** variabilidade espacial, krigagem, compactação do solo, manejo do solo.

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, financiado pela FAPESP. Recebido para publicação em novembro de 2007 e aprovado em julho de 2008.

<sup>(2)</sup> Professor Adjunto do Departamento de Solos e Engenharia Rural da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária (FAMEV), Universidade Federal do Mato Grosso – UFMT. Av. Fernando Corrêa da Costa s/n, Bairro Coxipó, CEP 78060-900. Cuiabá (MG). E-mail: roque@ufmt.br

<sup>(3)</sup> Professor do Departamento do Conselho de Planejamento e Gestão da Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas – FEAGRI/UNICAMP. Cidade Universitária Zeferino Vaz, Caixa Postal 6011, CEP 13083-875 Campinas (SP). E-mails: matsura@agr.unicamp.br; zigomarms@agr.unicamp.br

<sup>(4)</sup> Doutorando em Engenharia Agrícola, FEAGRI/UNICAMP. E-mails: douglas.bizari@agr.unicamp.br; anderson@agr.unicamp.br

**SUMMARY: LINEAR AND SPATIAL CORRELATION BETWEEN THE SOIL PENETRATION RESISTANCE AND IRRIGATED BEAN YIELD**

*Soil penetration resistance exercises major influence on crop development, root growth and crop productivity, which is inversely proportional to that soil attribute. In this way, the analysis of spatial variability of soil penetration resistance and crop yield based on geostatistics can indicate alternative management practices, not only to reduce the effects of soil variability on crop yield, but also to improve the estimated crop response under certain management practices. This study aimed to correlate soil penetration resistance (RP) and spatial yield variability in irrigated no-till snapbean cultivation in two consecutive cycles. The experiment was carried out on a typical dystrophic Red Latosol (Oxisol), in an experimental field of the FEAGRI/UNICAMP, in Campinas-SP (lat 22 ° 48 ' 57 " S, long 47 ° 03 ' 33 " W, mean altitude of 640 m asl). The evaluations were performed in a regular sampling grid of 3 x 3 m, totaling 60 points per treatment. Spatial dependence was evaluated by geostatistical techniques as well as semivariogram parameters to generate isoline maps, by means of kriging interpolation, using program Surfer 8.0. The simple linear regression between maps (pixel-to-pixel) detected an inverse correlation between RP and crop yield, whereas the bean yield was loosely correlated with soil penetration resistance under irrigated no-till system in the studied growing seasons.*

*Index terms: spatial variability, kriging, soil compaction, soil management.*

## INTRODUÇÃO

A compactação é uma alteração estrutural que promove a reorganização das partículas e de seus agregados, podendo limitar a absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular, resultando em decréscimo da produtividade das culturas (Stone et al., 2002). O sistema semeadura direta provoca compactação na camada superficial do solo, principalmente nos primeiros 17 cm, por estar associado ao tráfego de máquinas agrícolas e também ao não-revolvimento do solo nesse sistema, conforme relatam os estudos de Tavares Filho et al. (2001) e Assis & Lanças (2005).

Os atributos mais utilizados para avaliar a compactação do solo são a densidade e a resistência dele ao penetrômetro (RP); esta última apresenta boa correlação com o crescimento radicular. O conceito de um valor crítico de densidade do solo no qual o crescimento de raízes é prejudicado tem sido adotado por Thompson et al. (1987) como a melhor propriedade física para caracterizar o crescimento de raízes em solos compactados. Para outros pesquisadores, a densidade do solo não é o fator mais limitante ao crescimento radicular, e sim a resistência que ele oferece ao crescimento das raízes, determinada por um penetrômetro (Voorhees, 1983).

A preferência em utilizar penetrômetros para medir o estado de compactação do solo está na praticidade e

rapidez na obtenção dos resultados. Além disso, esses equipamentos medem a resistência do solo em pequenos incrementos de profundidade, sendo úteis para avaliar camadas de maiores resistências em profundidade. Voorhees et al. (1978), estudando os efeitos do tráfego de máquinas sobre o solo, verificaram que a RP foi mais sensível como indicador da compactação do solo que a densidade. Segundo Carvalho et al. (2006), valores de RP variando entre 1,29 e 2,87 MPa não restringiram a produtividade de grãos da cultura do feijão; todavia, considerando o conceito de intervalo hídrico ótimo, Silva et al. (1994) propõem o valor de 2,0 MPa como limite crítico para o ótimo crescimento do sistema radicular.

A análise da variabilidade do solo por meio da geoestatística pode indicar alternativas de manejo não só para reduzir os efeitos da variabilidade do solo sobre a produção das culturas (Trangmar et al., 1985), como também para aumentar a possibilidade da estimativa de respostas destas sob determinadas práticas culturais (Ovalles & Rey, 1994). Dessa forma, a medida de um atributo em alguns pontos pode revelar grandes variações de valores, pois o solo é o produto da ação de diversos fatores de formação e varia continuamente, principalmente na superfície. Segundo Gonçalves et al. (2001), uma vez quantificada a dependência espacial dos atributos do solo, esta pode ser utilizada para interpolação entre as observações, permitindo o mapeamento do atributo do solo dentro da área, por meio da krigagem. Essa técnica permite a estimativa de valores de forma não tendenciosa e com variância mínima.

Ante a expansão da cultura do feijão no sistema semeadura direta no Estado de São Paulo e a necessidade da determinação de atributos do solo que possam influenciar a produtividade da cultura, o objetivo deste trabalho foi relacionar a variabilidade espacial da resistência do solo ao penetrômetro com a produtividade do feijoeiro irrigado, no sistema de semeadura direta em duas safras consecutivas.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP (FEAGRI/UNICAMP), no município de Campinas-SP, cujas coordenadas geográficas são: 22 ° 48 ' 57 " de latitude sul, 47 ° 03 ' 33 " de longitude oeste e altitude média de 640 m. O clima, pela classificação climática de Köppen, é uma transição entre os tipos Cwa e Cfa, o que indica clima tropical de altitude com inverno seco e verão úmido. A temperatura média do mês mais quente (fevereiro) é superior a 22 °C, e a do mais frio (junho), inferior a 18 °C. A precipitação pluvial média anual é de 1.382 mm, com o período chuvoso entre outubro e março (1.048 mm), o que representa 75 % do total de chuva anual. O período mais seco ocorre de junho a setembro.

O solo do campo experimental pertence à classe do Latossolo Vermelho distroférrico típico (Embrapa, 1999). No presente trabalho foram avaliados a evolução espacial da resistência do solo ao penetrômetro, o teor de água no solo e a inter-relação entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado, cultivado no inverno sob o sistema semeadura direta, durante duas safras consecutivas. A primeira safra foi implantada no dia 14 de julho de 2005, utilizando-se a cultivar IAC Carioca, e a segunda, no dia 24 de junho de 2006, com a cultivar Carioca Precoce. As parcelas experimentais eram de 600 m<sup>2</sup> (30 m de comprimento e 20 m de largura), sendo manejadas no sistema semeadura direta desde 2003. As análises química e granulométrica do solo apresentaram-se muito semelhantes nas duas safras. Os resultados para a safra de 2005 foram: pH (CaCl<sub>2</sub>), 5,3; Ca<sup>2+</sup>, 56 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg<sup>2+</sup>, 16 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; P, 85 mg dm<sup>-3</sup>; K, 5 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; MO, 50 g dm<sup>-3</sup>; areia, 310 g kg<sup>-1</sup>; silte, 158 g kg<sup>-1</sup>; e argila, 532 g kg<sup>-1</sup>. Para a safra de 2006 foram obtidos: pH (CaCl<sub>2</sub>), 4,9; Ca<sup>2+</sup>, 51 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg<sup>2+</sup>, 22 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; P, 93 mg dm<sup>-3</sup>; K, 7 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; MO, 47 g dm<sup>-3</sup>; areia, 293 g kg<sup>-1</sup>; silte, 141 g kg<sup>-1</sup> e argila, 566 g kg<sup>-1</sup>. A resistência do solo ao penetrômetro foi determinada por meio do penetrômetro de impacto (Stolf, 1991), e o teor de água no solo, conforme Embrapa (1997).

A resistência do solo ao penetrômetro e o teor de água foram determinados na camada de 0,00–0,20 m, sendo o primeiro representado pela média dos valores obtidos nessa mesma profundidade. As amostragens foram realizadas em uma malha regular de 3 x 3 m,

totalizando 60 pontos amostrais. A produtividade foi estimada por meio da coleta das três plantas mais próximas de cada ponto amostral, totalizando 180 plantas amostradas.

Os dados foram analisados por meio do programa Minitab Release 14.13 (Minitab, 2004), segundo os procedimentos da estatística descritiva, na qual se efetuou também a análise de distribuição de frequência dos dados, visando testar a hipótese de normalidade pelo teste de Shapiro & Wilk (1965) a 5 %. Foram efetuadas as análises de regressão linear simples entre a variável dependente (produtividade) e a independente (resistência do solo ao penetrômetro), buscando uma inter-relação entre as duas variáveis em estudo.

A análise e a modelagem da estrutura espacial foram avaliadas por meio da técnica da geoestatística, na qual o estimador usual do semivariograma é apresentado por Journel & Huijbregts (1991) como sendo:

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

em que Z(x<sub>i</sub>) é o valor da propriedade Z na localização x<sub>i</sub>, no espaço; e N(h), o número de pares de dados separados pela distância h.

O semivariograma é representado pelo gráfico de  $\hat{\gamma}(h)$  versus h, ou seja, a semivariância do atributo versus a distância (Vieira et al., 1997). Os semivariogramas fornecem estimativas dos parâmetros: efeitos pepita (C<sub>0</sub>), patamar (C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub>) e alcance (a). O efeito pepita (C<sub>0</sub>) é o parâmetro do semivariograma que indica a variabilidade não explicada dos modelos, considerando a distância de amostragem utilizada (Cambardella et al., 1994). O semivariograma apresenta efeito pepita puro quando a semivariância  $\hat{\gamma}(h)$  for igual para todos os valores de h. O patamar (C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub>) é o valor da semivariância em que a curva se estabiliza sobre um valor constante, sendo representado pelo ponto em que toda a semivariância da amostra é de influência aleatória (Trangmar et al., 1985). À medida que h aumenta,  $\hat{\gamma}(h)$  também aumenta a um valor máximo, até se estabilizar. Este valor no qual  $\hat{\gamma}(h)$  se estabiliza é o patamar, sendo aproximadamente igual à variância dos dados (Vieira et al., 1997). O alcance (a) da dependência espacial representa a distância, na qual os pontos amostrais estão correlacionados entre si. Portanto, os pontos localizados numa área de raio igual ao alcance possuem mais semelhança entre si que aqueles localizados fora dela (Vieira et al., 1997).

Os ajustes do modelo do semivariograma foram realizados conforme Vieira et al. (1983), por meio do programa GS<sup>+</sup> (Robertson, 1998). Para analisar o grau de dependência espacial das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), que considera semivariogramas com dependência espacial forte aqueles com efeito pepita ≤ 25 % do patamar; moderada, entre 25 e 75 %; e fraca, > 75 %.

Com os semivariogramas ajustados, foi utilizado o programa Surfer 8.0 (Golden Software, 1997) na interpolação por krigagem, gerando mapas de isolinhas (contorno) da distribuição espacial das variáveis na área em estudo. Os mapas gerados no Surfer 8.0 foram exportados para o programa Idrisi Kilimanjaro (versão 14.2) (Eastman, 2003), para cálculo das áreas que cada classe do atributo estudado representaria em relação à área total. Também foram realizadas as análises espaciais (regressões lineares simples entre mapas), uma vez que esse programa realiza as regressões dos mapas sem a perda da posição espacial dos dados, o que não ocorre com programas de estatística convencional.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição de frequência dos dados de resistência do solo ao penetrômetro e do teor de água no solo foi avaliada por meio da estatística descritiva (Quadro 1). Os valores médios da resistência do solo ao penetrômetro foram de 2,79 e 5,32 MPa, respectivamente para as safras de 2005 e 2006, ou seja, superiores a 2,0 MPa, mencionado por Silva et al. (1994) como restritivo ao crescimento radicular e limitante ao rendimento das principais culturas. Apesar de o valor médio do teor de água no solo ter sido superior na safra de 2006, os valores de resistência do solo ao penetrômetro observados neste mesmo ano foram superiores aos obtidos na safra de 2005. Como o sistema semeadura direta foi implantado somente no ano de 2003, ou seja, ainda em fase de estabilização,

e pelo fato de o revolvimento do solo ter sido realizado apenas na linha de semeadura, pode ter ocorrido durante o ano agrícola aumento da compactação do solo. Assim, pesquisas com maiores períodos de duração devem ser realizadas para melhores esclarecimentos com relação a esse aspecto. Em trabalho realizado por Assis & Lanças (2005), o sistema semeadura direta com um ano de instalação apresentou menores valores de resistência do solo ao penetrômetro nas camadas de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 30 cm, quando comparado com os sistemas instalados há quatro e cinco anos; naquele com 12 anos de implantação, os valores de RP foram mais próximos dos encontrados no sistema com apenas um ano de instalação.

A amplitude dos valores de resistência do solo ao penetrômetro na safra de 2005 abrangeu os valores obtidos por Gonçalves et al. (1998) e Souza et al. (2001), os quais variaram de 0,5 a 1,2 MPa e de 2,2 a 2,6 MPa, respectivamente. Na safra de 2006, os valores de resistência do solo ao penetrômetro ultrapassaram substancialmente os obtidos por esses autores. O valor médio de produção para a safra de 2005 também foi superior ao da safra de 2006.

Pelos limites de coeficiente de variação (CV) propostos por Warrick & Nielsen (1980), verifica-se que os valores do teor de água no solo e dos demais atributos apresentaram baixa e média variabilidade, respectivamente. Valores semelhantes de CV foram obtidos nos trabalhos de Santos et al. (2005), Carvalho et al. (2006) e Freddi et al. (2006), ao estudarem a correlação da produtividade com a resistência do solo ao penetrômetro sob diferentes sistemas de manejo do solo.

**Quadro 1. Estatística descritiva para teor de água no solo, resistência do solo ao penetrômetro (RP) e produtividade para os pontos localizados na malha de amostragem**

Característica	Teor de água		RP		Produtividade	
	2005	2006	2005	2006	2005	2006
	———— % ————		———— MPa ————		———— g/planta ————	
Nº amostras	60	60	60	60	60	60
Média	28,71	29,90	2,79	5,32	18,09	14,62
Mediana	28,32	29,97	2,73	4,61	18,40	13,68
Mínimo	24,13	24,04	0,24	2,05	2,87	7,35
Máximo	33,65	37,82	5,89	11,47	33,07	22,54
Quartil inferior	27,33	27,89	1,76	3,57	12,07	12,09
Quartil superior	29,58	31,91	3,58	6,82	24,26	17,07
Variância	3,88	8,50	1,63	5,12	63,43	13,19
Assimetria	0,500	0,040	0,470	0,807	0,017	0,666
Curtose	-0,570	-0,063	-0,009	0,085	-0,780	-0,224
CV (%) <sup>(1)</sup>	7	10	46	43	44	25
Limite inferior	23,95	21,87	0	0	0	4,63
Limite superior	32,96	37,94	6,31	11,70	42,54	24,53
SW (p-valor) <sup>(2)</sup>	0,041*	> 0,100	> 0,100	< 0,010 *	> 0,100	< 0,010 *

<sup>(1)</sup> CV: coeficiente de variação. <sup>(2)</sup> SW: valores de probabilidade de Shapiro-Wilk; p-valor < 0,05 (\*) não-normalidade dos dados.

Os valores obtidos fora dos limites inferiores e superiores foram considerados “outliers”, conforme Libardi et al. (1996). Assim, possibilitou-se identificar quais os dados dentro da malha amostral foram substituídos pela média dos seus vizinhos. Conforme Isaaks & Srivastava (1989), essa técnica é conhecida como janelas móveis, que permite a identificação visual de possíveis tendências na região de estudo. Observa-se que as distribuições da resistência do solo ao penetrômetro e produtividade (safra de 2005) e teor de água do solo (safra de 2006) assumem comportamento próximo da linha reta, indicando normalidade na distribuição dos dados (Figura 1).

Nota-se que os dados do teor de água no solo (safra de 2005), resistência do solo ao penetrômetro e produtividade (safra de 2006) apresentaram valores de assimetria e curtose distantes de 0, além de maior discrepância entre a média e a mediana, indicando a não-normalidade para esses dados, o que foi confirmado pelo teste de Shapiro & Wilk (1965) a 5 %.

Segundo Gonçalves et al. (2001), para a estimativa por krigagem, a normalidade dos dados é interessante na avaliação da dependência espacial, porém mais importante que isso é sua utilização para verificar a não-tendência dos dados, conforme mostra o presente estudo. Dessa forma, a análise geoestatística constatou que os atributos estudados apresentaram dependência espacial, o que foi comprovado pelos parâmetros dos semivariogramas ajustados aos modelos esférico e exponencial para as safras de 2005 e 2006 (Figura 2). Assim, os valores do teor de água no solo, resistência do solo ao penetrômetro e produtividade do feijoeiro para as safras estudadas mostraram que a distribuição

não é aleatória no espaço, uma vez que o grau de dependência espacial (GDE) é forte (4 %) para produtividade na safra de 2006 e moderado para os demais atributos nas safras de 2005 e 2006.

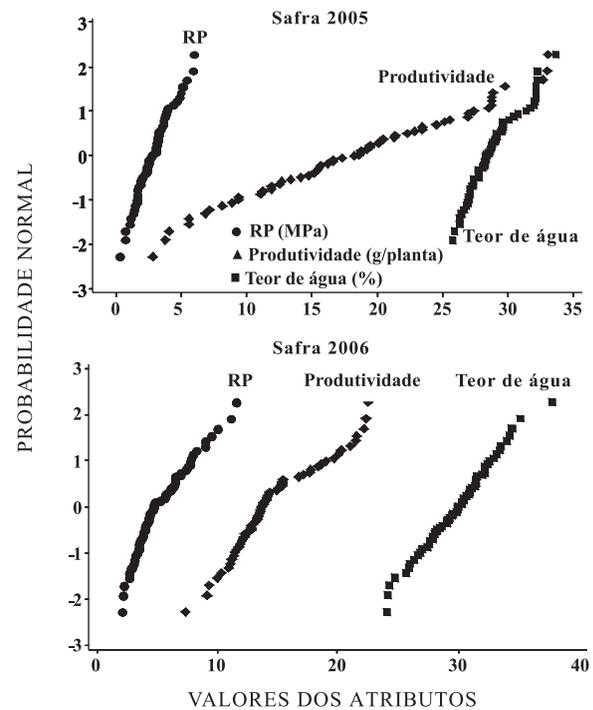


Figura 1. Probabilidade normal para as distribuições dos atributos em estudo no plantio direto irrigado, nas safras de 2005 e 2006.

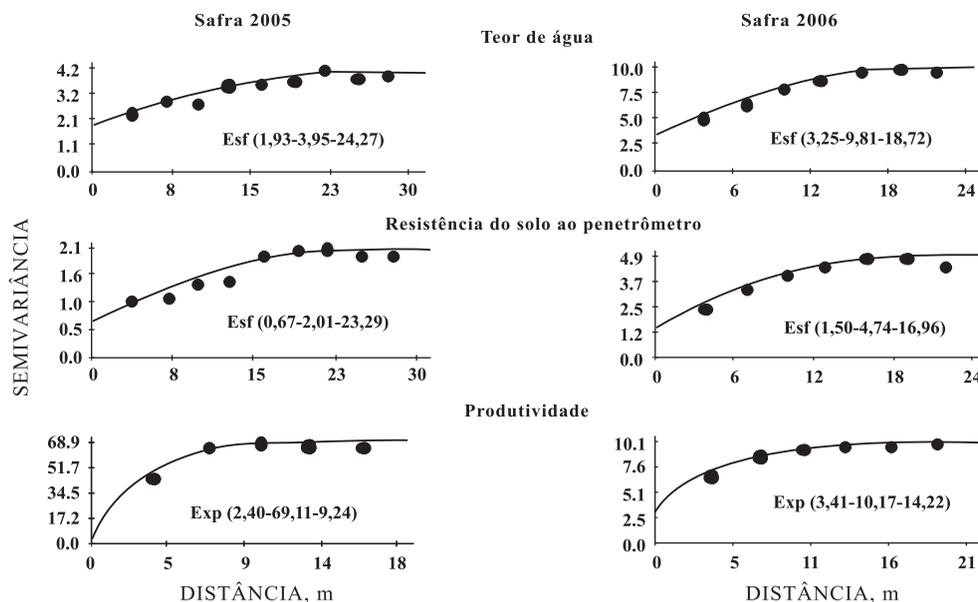


Figura 2. Semivariogramas dos atributos: teor de água no solo, resistência do solo ao penetrômetro e produtividade da cultura do feijoeiro no sistema semeadura direta irrigado para as safras de 2005 e 2006. Esf e Exp ( $C_0$ ;  $C_0+C_1$ ; a), Esf: modelo esférico; Exp: modelo exponencial;  $C_0$ : efeito pepita;  $C_0+C_1$ : patamar; a: alcance.

Por meio do programa GS<sup>+</sup> (Robertson, 1998), foi utilizada a ferramenta validação cruzada, a fim de validar os modelos dos semivariogramas ajustados para realização da krigagem (Quadro 2).

Um ajuste perfeito teria um coeficiente de regressão igual a 1 e a linha do melhor ajuste coincidiria com o modelo perfeito, isto é, com o coeficiente linear (a) igual a 0 e o angular (b) igual a 1 (Robertson, 1998). Dessa forma, os parâmetros das regressões (Quadro 2) foram satisfatórios, uma vez que os coeficientes lineares (a) e angulares (b) dos ajustes efetuados variaram de -0,139 a 0,238, e 0,917 a 1,008, respectivamente – todos significativos a 95 % pelo teste F. Os valores dos coeficientes lineares e angulares foram semelhantes aos obtidos por Carvalho et al. (2006), na qual os ajustes efetuados variaram entre 0,028 e 0,288, para o coeficiente a, e entre 0,884 e 0,986, para o coeficiente b. Com relação ao coeficiente de determinação da regressão ( $R^2$ ), foram encontrados valores baixos (0,24 a 0,39), semelhantes aos obtidos por Santos et al. (2005), Freddi et al. (2006) e Carvalho et al. (2006).

Valores entre 0,18 e 0,68 foram obtidos por Silva et al. (2004) para a validação cruzada de semivariogramas ajustados aos dados de resistência do solo ao penetrômetro sob sistema semeadura direta.

Para visualizar a distribuição espacial dos atributos em estudo na safra de 2005, realizou-se a krigagem e mapas de isolinhas (Figura 3). No quadro 3 é mostrado o percentual que cada atributo estudado representa em relação à área total dos mapas.

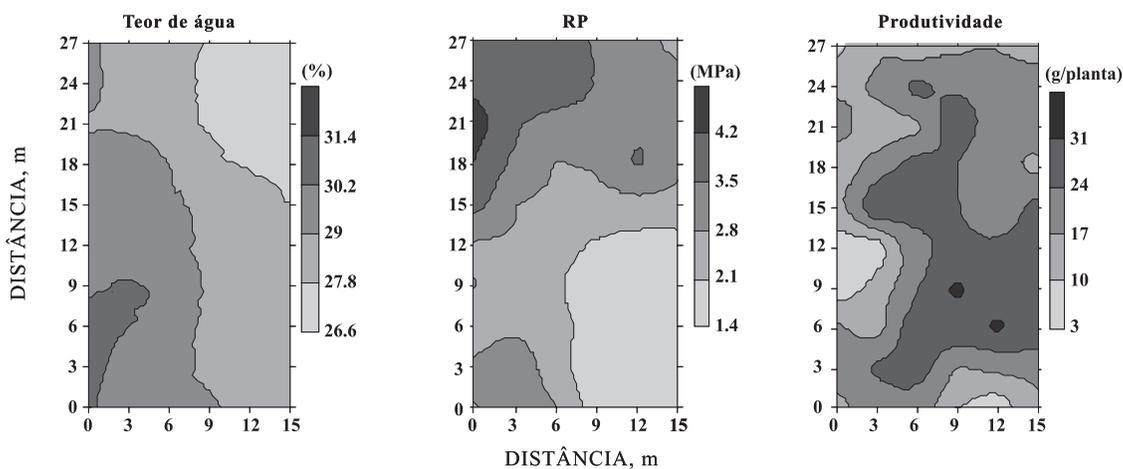
Nota-se que a maior parte da área da parcela encontra-se na classe de 2,8 a 3,5 MPa e que mais de 75 % da área está acima de 2,0 MPa, valor limitante proposto por Silva et al. (1994) para o crescimento radicular das culturas. Constata-se, pelos mapas de krigagem, que as áreas de menores valores de RP foram as que apresentaram os maiores valores de produtividade.

Com relação à safra de 2006 (Quadro 4 e Figura 4) observa-se, pelos mapas de krigagem, que 100 % da área estudada apresentou valores superiores a 2,0 MPa de resistência do solo ao penetrômetro. Mesmo assim,

**Quadro 2. Parâmetros da validação cruzada para os semivariogramas ajustados aos dados obtidos no sistema semeadura direta irrigado - safras de 2005 e 2006**

Atributo do solo	Parâmetro da regressão				Erro absoluto		N° vizinho
	a	b	R <sup>2</sup>	P valor	Média	Variância	
Safrá 2005							
Teor de água	0,238	0,917	0,24	0,000 *	-0,010	2,404	29
RP	0,223	0,921	0,26	0,000 *	-0,040	1,243	14
Produtividade	0,054	0,991	0,30	0,000 *	-0,012	4,187	5
Safrá 2006							
Teor de água	0,018	1,000	0,39	0,000 *	0,107	5,018	39
RP	0,008	0,998	0,38	0,000 *	0,000	2,503	8
Produtividade	-0,139	1,008	0,30	0,000 *	-0,020	6,277	8

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; \*: significativo a 5 % pelo teste F; RP: resistência do solo ao penetrômetro.



**Figura 3. Mapa da distribuição espacial de teor de água do solo, resistência do solo ao penetrômetro (RP) e produtividade do feijoeiro sob sistema semeadura direta – safra de 2005.**

a parcela apresentou produtividade de 1.974 kg ha<sup>-1</sup>, superior à encontrada para a cultura do feijoeiro de inverno no Estado de São Paulo, que é de 1.615 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2007), indicando que as condições impostas por esses atributos não foram limitantes para o seu crescimento e desenvolvimento.

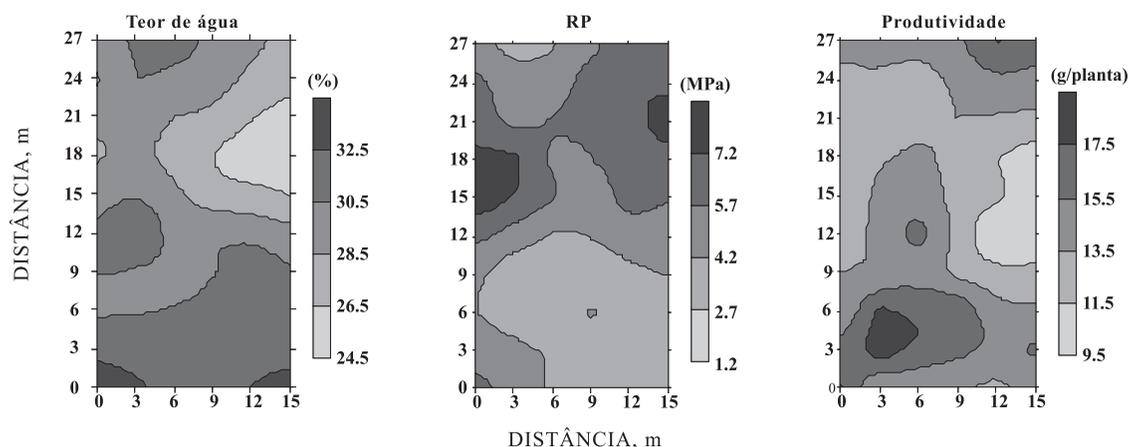
Observa-se (Figura 4) que as áreas com maiores produtividades foram aquelas com maiores teores de água do solo e menores valores de resistência do solo ao penetrômetro. As áreas que apresentaram as menores produtividades também mostraram menores teores de água no solo e altos valores de resistência do solo.

**Quadro 3. Percentagem de área de cada classe para os atributos teor de água do solo, resistência do solo ao penetrômetro (RP) e produtividade do feijoeiro sob sistema semeadura direta - safra de 2005**

Classe de teor de água	Área	Classe de RP	Área	Classe de produtividade	Área
%	%	MPa	%	g/planta	%
26,6–27,8	15,31	1,4–2,1	24,57	3,0–10,0	4,14
27,8–29,0	45,61	2,1–2,8	28,12	10,0–17,0	19,64
29,0–30,2	34,03	2,8–3,5	32,02	17,0–24,0	42,28
30,2–31,4	5,05	3,5–4,2	14,61	24,0–31,0	33,47
31,4–32,6	***	4,2–4,9	0,68	31,0–38,0	0,47

**Quadro 4. Percentagem de área de cada classe para os atributos teor de água do solo, resistência do solo ao penetrômetro e produtividade do feijoeiro sob sistema semeadura direta - safra de 2006**

Classe de teor de água	Área	Classe de RP	Área	Classe de produtividade	Área
%	%	MPa	%	g/planta	%
24,5 – 26,5	6,82	1,2–2,7	***	9,5 – 11,5	7,73
26,5 – 28,5	16,93	2,7–4,2	34,75	11,5 – 13,5	35,00
28,5 – 30,5	38,25	4,2–5,7	31,65	13,5 – 15,5	38,76
30,5 – 32,5	36,11	5,7–7,2	28,92	15,5 – 17,5	15,80
32,5 – 34,5	1,89	7,2–8,7	4,68	17,5 – 19,5	2,71



**Figura 4. Mapa da distribuição espacial de teor de água do solo, resistência do solo ao penetrômetro (RP) e produtividade do feijoeiro sob sistema semeadura direta – safra de 2006.**

solo ao penetrômetro. A variabilidade espacial dos atributos resistência do solo ao penetrômetro e teor de água do solo na safra de 2005 foi menor que a da safra de 2006, o que pode ser constatado pelo alcance dos semivariogramas (Figura 2) e pelos mapas de krigagem (Figuras 3 e 4). Comparando os mapas de krigagem da resistência do solo ao penetrômetro nas duas safras, observa-se que houve aumento da RP na safra de 2006.

O uso dos mapas de krigagem na identificação e espacialização das propriedades físico-químicas do solo e da produtividade de uma determinada área é de grande auxílio na tomada de decisões, pois facilita a identificação de glebas que necessitem de descompactação e possibilita a otimização das aplicações de insumos de maneira diferenciada, em função das diferentes deficiências nutricionais em cada local. Isso não seria possível somente levando-se em conta os valores médios obtidos.

No quadro 5 são apresentadas as equações da regressão linear simples por meio do programa Minitab 14, bem como a análise de regressão linear simples espacial entre mapas (pixel-a-pixel), utilizando o programa Idrisi Kilimanjaro (versão 14.2) (Eastman, 2003). As regressões obtidas para o sistema semeadura direta nas duas safras não foram significativas pelo teste F a 95 % e apresentaram valores de coeficiente de determinação muito baixo. Entretanto, nota-se que, para as duas safras estudadas, a variável resistência do solo ao penetrômetro correlaciona-se negativamente com a produção de grãos, o que difere dos trabalhos realizados por Santos et al. (2005), Carvalho et al. (2006) e Freddi et al. (2006), nos quais, para algumas profundidades, houve correlações positivas da resistência do solo ao penetrômetro com a produção, não se observando significância para as regressões.

Com relação às regressões de mapas, estas foram significativas, apresentando correlações negativas entre a produtividade e a resistência do solo ao

**Quadro 5. Regressão linear entre a produtividade de grãos em função da resistência do solo ao penetrômetro, no sistema semeadura direta irrigado, nas safras de 2005 e 2006**

Safras	Equação	R <sup>2</sup>
	Equação simples	%
2005	Produtividade = 18,5–0,145 RP	0,1 <sup>ns</sup>
2006	Produtividade = 14,9–0,052 RP	0,1 <sup>ns</sup>
	Equação -mapas	
2005	Produtividade = 35,42–2,235 RP	7,06*
2006	Produtividade = 15,6–0,497 RP	13,69*

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; \*: significativo a 5 %; ns: não-significativo.

penetrômetro. O maior valor obtido para o R<sup>2</sup> foi na regressão da safra de 2006, o que permite constatar que a resistência do solo ao penetrômetro explicou 13,69 % das variações da produtividade. As demais variações podem ser atribuídas a outros fatores, não avaliados no presente ensaio. Ortiz et al. (2006), estudando as relações espaciais entre o potencial produtivo da cultura do eucalipto e atributos do solo e do relevo, obtiveram, por meio da regressão pixel-a-pixel, coeficiente de correlação de até - 0,64, o que representa um R<sup>2</sup> de 0,41. Pelo exposto, nota-se que a regressão entre mapas levando-se em conta a espacialização dos atributos alcança maiores valores de R<sup>2</sup>, quando comparada com a regressão simples.

## CONCLUSÕES

1. Grande parte da área nas duas safras apresentou limites de resistência do solo ao penetrômetro acima do nível crítico citado em literatura, porém com produtividade superior à média do Estado de São Paulo, indicando que, para o sistema semeadura direta sob irrigação em Latossolo Vermelho distroférrico típico, os valores limitantes à resistência do solo ao penetrômetro são superiores a 2 MPa.

2. A produtividade do feijoeiro apresentou baixa correlação com a resistência do solo ao penetrômetro na área de estudo.

## LITERATURA CITADA

- ASSIS, R.L. & LANÇAS, K.P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférrico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. R. Bras. Ci. Solo, 29:515-522, 2005.
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F. & KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1501-1511, 1994.
- CARVALHO, G.J.; CARVALHO, M.P.; FREDDI, O.S. & MARTINS, M.V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 10:765-771, 2006.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Levantamento de grãos na safra 2006/07. Disponível em: [http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/1safragraos2006\\_07.pdf](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/1safragraos2006_07.pdf). Acesso em 09 fev. de 2007.
- EASTMAN, R.J. Guide to GIS and Image Processing. Idrisi Production. Worcester, 2003. v.1. 306p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMPRESA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- FREDDI, O.S.; CARVALHO, M.P.; VERONESI JÚNIOR, V. & CARVALHO, G.J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. Eng. Agric., 26:113-121, 2006.
- GOLDEN SOFTWARE, INC. Surfer for Windows-User guide. Golden, Golden Software, 1997. 340p.
- GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V. & MATA, J.D.V. Análise exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. Acta Sci., 23:1149-1157, 2001.
- GONÇALVES, A.C.A.; MATA, J.D.V.; VIEIRA, S.R. & FOLEGATTI, M.V. Variabilidade espacial de produtividade e de resistência à penetração em área irrigada, sob dois sistemas de preparo. In: AVANCES EN EL MANEJO DEL SUELO Y AGUA EM LA INGENIERÍA RURAL LATINOAMERICANA, 18., La Plata, 1998. Resumos. La Plata, UNLP, 1998. p.113-119.
- ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. An introduction to applied geostatistic. New York, Oxford University Press, 1989. 561p.
- JOURNAL, A.G. & HUIJBREGTS, C.J. Mining geostatistics. London, Academic Press, 1991. 600p.
- LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O. & TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. R. Bras. Ci. Solo, 20:1-12, 1996.
- MINITAB, Inc. Minitab statistical software™, Release 14.13. Copyright©1972 – 2004.
- ORTIZ, J.L.; VETTORAZZI, C.A.; COUTO, H.T.Z. & GONÇALVES, J.L.M. Relações espaciais entre o potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo. Sci. For., 72:67-79, 2006.
- OVALLES, F. & REY, J. Variabilidad interna de unidades de fertilidad em suelos de la depresión del Lago de Valencia. Agron. Trop., 44:41-65, 1994.
- ROBERTSON, G.P. GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide. Plainwell, Gamma Design Software, 1998. 152p.
- SANTOS, P.A.; CARVALHO, M.P.; FREDDI, O.S.; KITAMURA, A.E.; FREITAG, E.E. & VANZELA, L.S. Correlação linear e espacial entre o rendimento de grãos do feijoeiro e a resistência mecânica à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico. R. Bras. Ci. Solo, 29:287-295, 2005.
- SHAPIRO, S.S. & WILK, M.B. An analysis of variance test for normality: Complete samples. Biometrika., 52:591-611, 1965.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1775-1781, 1994.
- SILVA, V.R.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. Ci. Rural, 34:399-406, 2004.
- SOUZA, Z.M.; SILVA, M.L.S.; GUIMARÃES, G.L.; CAMPOS, D.T.S.; CARVALHO, M.P. & PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). R. Bras. Ci. Solo, 25:699-707, 2001.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. R. Bras. Ci. Solo, 15:229-235, 1991.
- STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M. & MOREIRA, A.A.J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: Efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 6:207-212, 2002.
- TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.C.; GUIMARÃES, M.F. & FONSECA, I.C.B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays* L.) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. R. Bras. Ci. Solo, 25:725-730, 2001.
- THOMPSON, P.J.; JANSEN, I.J. & HOOKS, C.L. Penetrometer resistance and bulk density as parameters for predicting root system performance in mine soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 51:1288-1293, 1987.
- TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S. & UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Adv. Agron., 38:45-94, 1985.
- VIEIRA S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. Hilgardia, 51:1-75, 1983.
- VIEIRA, S.R.; TILLOTSON, P.M.; BIGGAR, J.W. & NIELSEN, D.R. Scaling of semivariograms and the kriging estimation of field-measured properties. R. Bras. Ci. Solo, 21:525-533, 1997.
- VOORHEES, W.B.; SENST, C.G. & NELSON, W.W. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the Northern Corn Belt. Soil Sci. Soc. Am. J., 42:334-349, 1978.
- VOORHEES, W.B. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. Soil Sci. Soc. Am. J., 47:129-133, 1983.
- WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, Academic Press, 1980. p.319-344.