

CORRELAÇÃO LINEAR E ESPACIAL ENTRE O RENDIMENTO DE GRÃOS DO FEIJOEIRO E A RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO EM UM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO⁽¹⁾

**Paulo Afonso dos Santos⁽²⁾, Morel de Passos e Carvalho⁽³⁾,
Onã da Silva Freddi⁽²⁾, Aline Emy Kitamura⁽²⁾,
Elisa Eni Freitag⁽²⁾ & Luis Sérgio Vanzela⁽²⁾.**

RESUMO

A resistência mecânica à penetração apresentada pelo solo exerce grande influência sobre o desenvolvimento vegetal, uma vez que o crescimento das raízes, assim como o rendimento das culturas, varia de forma inversamente proporcional ao seu valor. No ano agrícola de 2001/2002, na Fazenda Experimental de Ensino e Pesquisa da Faculdade de Engenharia/UNESP - Campus de Ilha Solteira, foram analisados o rendimento de grãos do feijoeiro (PG) e a resistência mecânica à penetração (R), de um Latossolo Vermelho distrófico. O objetivo foi apurar diretrizes relacionadas com o aumento da produtividade agrícola em questão, estudando a correlação linear e a espacial entre a PG e a R. Foi instalada uma rede geoestatística para a coleta dos dados do solo e da planta, estabelecida com espaçamentos de 5 x 5 m e 2,5 x 2,5 m, que continham 120 pontos amostrais distribuídos numa área de 1.875 m². A correlação linear entre a PG e a R foi praticamente nula, uma vez que, dependendo das profundidades estudadas do solo, apresentou coeficientes de correlação (r) menores do que 0,20. A análise geoestatística apresentou boa estrutura de dependência espacial, tanto para a PG quanto para a R, quando analisadas isoladamente. Entretanto, a análise espacial conjunta de tais atributos apresentou-se inconsistente. Assim, com o aumento da resistência mecânica à penetração, em determinada região do solo ocorreu ora aumento, ora diminuição do rendimento de grãos do feijoeiro.

Termos de indexação: índice de cone, rendimento de grãos, variabilidade espacial, geoestatística.

⁽¹⁾ Trabalho desenvolvido na disciplina de Manejo e Conservação do Solo pertencente ao curso de Pós-Graduação em Sistemas de Produção da Faculdade de Engenharia – UNESP/Campus de Ilha Solteira. Recebido para publicação em dezembro de 2002 e aprovado em dezembro de 2004.

⁽²⁾ Mestrandos da Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP/Campus de Ilha Solteira. Caixa Postal 31, CEP 15385-000. Ilha Solteira (SP).

⁽³⁾ Professor Adjunto, Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos. Faculdade de Engenharia – UNESP/Campus de Ilha Solteira. E-mail: morel@agr.feis.unesp.br

SUMMARY: *SPATIAL AND LINEAR CORRELATION OF COMMON BEAN GRAIN YIELD WITH THE MECHANICAL PENETRATION RESISTANCE IN A DYSTROPHIC RED LATOSOL*

The mechanical penetration resistance of a soil strongly influences plant development since the root growth as well as the crop yield change inversely proportional to its value. The bean grain yield (GY) and the penetration resistance (PR) in a Dystrophic Red Latosol (Rhodic Ustox) located at the Experimental Station of the Faculdade de Engenharia/UNESP in Ilha Solteira county, São Paulo State, Brazil (22 ° 23 ' latitude S; 51 ° 27 ' longitude W), were analyzed in the crop year 2001/2002. The main objective was to work out guidelines related to the increase of the crop yield in question by studying the spatial and linear correlation between GY and PR. A geostatistical grid to collect soil and plant data was installed in a 5 x 5 m and a 2.5 x 2.5 m spacing. One hundred and twenty sample points were arranged across an area of 1,875 m². The linear correlation between GY and PR was practically zero since it presented correlation coefficients (r) below 0.20 in function of the studied soil layers. The geostatistical analysis presented a good spatial dependence structure when analyzed for GY as well as PR. However, the joint spatial analysis of the attributes was inconsistent. Thus, with the increasing mechanical resistance to penetration in a particular soil region there was sometimes an increase and sometimes a reduction of the grain yield.

Index terms: cone index, grain yield, spatial variability, geostatistics.

INTRODUÇÃO

A cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) constitui uma das mais importantes do Brasil, já que o feijão é considerado a principal fonte de proteína das camadas sociais de menor poder aquisitivo. Juntamente com o arroz, milho e mandioca, representa a base da alimentação do seu povo (Muçouçah, 1994). Pode ser cultivado em qualquer época do ano, desde que não existam limitações de temperatura e umidade. A escolha da melhor época de semeadura deve ser feita com base na relativa complexidade estabelecida pelos fatores climáticos e biológicos (Kranz, 1989).

No Brasil, o rendimento médio de grãos é muito baixo, ficando ao redor de 500 kg ha⁻¹ (IBE, 1995). Contudo, em regiões nas quais a agricultura é mais técnica, como é o caso do estado de São Paulo, o rendimento já ultrapassou 1.200 kg ha⁻¹ (Camargo et al., 2001). Trata-se de uma produção significativa, embora pequena, quando comparada às médias de rendimento alcançadas por países desenvolvidos, tal como o Canadá, que supera 1.900 kg ha⁻¹.

Na safra 2001/2002, a produção nacional de feijão alcançou 3,18.10⁹ kg, ocupando uma área de aproximadamente 4,29.10⁶ ha, com destaque para as regiões nordeste, sul e sudeste que produziram, respectivamente, 9,5.10⁸; 9,0.10⁸ e 8,9.10⁸ kg de grãos, com rendimento médio nacional de 630 kg ha⁻¹, considerado baixo, visto que a cultura tem potencial para rendimento superior a 3.500 kg ha⁻¹ (Nehmi et al., 2003).

Um dos problemas decorrentes do preparo convencional, comumente utilizado para culturas anuais como o feijão, é o revolvimento excessivo do solo, resultante do intenso tráfego da maquinaria agrícola. Havendo umidade adequada, esse fato implica sua compactação, caracterizada por apresentar abrupta elevação da densidade na camada imediatamente abaixo da profundidade de trabalho dos implementos, tais como: o arado e a grade, convencionalmente designada por *soleira do implemento*. Nesse sentido, Araújo (1998) afirmou que o preparo inadequado do solo causa a destruição dos agregados, com o conseqüente aumento da compactação. A camada compactada pode ser percebida facilmente, quando se observaram alguns fatos, a saber: redução do tamanho das plantas, coloração anormal da folha, sistema radicular superficial e mal formado, maior rapidez do efeito da estiagem sobre as plantas, empoçamento de água e aumento da erosão.

Quatro fatores físicos do solo necessitam ser considerados, prioritariamente, quando se avalia a resposta das culturas a determinado tipo de preparo do solo, a saber: o teor de água, temperatura, aeração e impedimento mecânico. A compactação do solo pode influenciar todos esses fatores, afetando a planta durante alguma fase do seu ciclo de desenvolvimento (Gamero, 1985). Assim, Bowen & Kratky (1985) afirmaram que, dentre os fatores que afetam a compactação, os mais importantes são o teor de água no solo e a pressão aplicada pela maquinaria agrícola.

A compactação do solo ocorre com o aumento de sua densidade global e com a conseqüente diminuição

da porosidade total e da macroporosidade (Meredith & Patrick Junior, 1961). Segundo Bowen & Kratky (1985), as propriedades mais usadas para avaliar a compactação são a densidade do solo e a resistência mecânica à penetração, demonstrando, esta última, boa correlação com o crescimento radicular, dado que a alongação das raízes varia de forma inversamente proporcional a tal resistência. Conseqüentemente, com a redução do teor de água do solo ocorre um aumento do seu valor, decorrente da maior coesão entre as partículas sólidas do solo (Gerard et al., 1972). Martins (2002), estudando a resistência mecânica à penetração de um Latossolo Vermelho distrófico de acordo com o grau de umidade, nas condições de Selvíria (MS), observou que, após o encharcamento completo do solo, com 4,2 dias de secamento contínuo, o valor da umidade gravimétrica ficou ao redor de 0,2107 kg kg⁻¹, muito próximo da capacidade de campo e equivalendo a uma resistência de 2,0 MPa.

Valores de resistência mecânica à penetração variando de 1,0 a 3,5 MPa (Canarache, 1990; Merotto & Mundstock, 1999), ou de 2,0 a 4,0 MPa, segundo Arshad et al. (1996), podem restringir ou mesmo impedir o crescimento e o desenvolvimento das raízes. Alguns autores, no entanto, têm adotado o valor de 1,0 MPa como crítico, mas não impeditivo ao crescimento das raízes no solo. Assim, Pauletto et al. (1989) constataram que somente seriam consideradas camadas compactadas aquelas cujos valores de resistência mecânica do solo à penetração fossem superiores a 1,72 MPa, alertando também para o fato de que o limite superior de 2,32 MPa impediria o desenvolvimento do sistema radicular das plantas de milho. Entretanto, Tavares Filho et al. (2001) mostraram que tais valores de resistência, quando superiores a 3,5 MPa, não restringiram o desenvolvimento radicular do milho, influenciando apenas sua morfologia. Já para o conceito de intervalo hídrico ótimo, Silva et al. (1994) relacionaram o valor de 2,0 MPa como limite crítico para o ótimo desenvolvimento radicular.

A validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas que efetuarão a krigagem. Na sua análise, cada ponto contido dentro do domínio espacial é removido individualmente, sendo seu valor estimado por meio da krigagem como se ele não existisse. Desta forma, pode-se construir um gráfico de valores estimados *versus* valores medidos para todos os pontos. O coeficiente de correlação (r) representa uma medida da eficiência do ajuste, dado pela técnica da soma dos quadrados dos desvios, representando a equação de regressão linear. Um ajuste perfeito teria um coeficiente de regressão igual a um 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 um (Robertson, 1998).

Gonçalves et al. (1998) estudaram a variabilidade espacial do rendimento do feijoeiro e da resistência

meccânica à penetração do solo numa Terra Roxa Estruturada eutrófica de Maringá (PR), nas condições de preparo com aração e escarificação. As avaliações das variáveis estudadas foram efetuadas antes do preparo do solo e após a colheita da cultura irrigada. Os resultados de penetrometria foram correlacionados com os valores do rendimento de matéria seca e de grãos da cultura do feijão. A correlação espacial entre o rendimento e a resistência foi claramente identificada pelo semivariograma cruzado, assim como pelos mapas de krigagem.

Na análise de duas malhas de dados instaladas em Selvíria (MS), usadas no estudo da variabilidade espacial de alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico semeado com feijão, sob plantio direto (Souza et al., 2001) e sob preparo convencional (Carvalho et al., 2002), com amostragem de solo idêntica nos dois casos, nas profundidades de 0,00-0,05 m e 0,15-0,20 m, verificou-se que a resistência mecânica do solo à penetração e a umidade gravimétrica seguiram a distribuição lognormal na maioria dos casos. A resistência apresentou variabilidade muito alta também na maioria dos casos, ao passo que a umidade apresentou variabilidade média e baixa. Foi observada, ainda, dependência espacial moderada para todos os atributos, com exceção do plantio convencional na profundidade de 0,15 a 0,20 m, que foi alta.

Diante do exposto, a pesquisa objetivou apurar diretrizes relacionadas com o aumento da produtividade agrícola em questão, estudando a correlação linear e a espacial entre o rendimento de grãos do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) e a resistência mecânica à penetração de um Latossolo Vermelho distrófico de Selvíria (MS).

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido na Fazenda de Ensino e Pesquisa da Faculdade de Engenharia - FE/UNESP, Campus de Ilha Solteira, localizada no município de Selvíria (MS), na latitude 22 ° 23 ' S e na longitude 51 ° 27 ' W, com precipitação média anual de 1.300 mm e temperatura média de 23,7 °C. O tipo climático é Aw, segundo a classificação de Köppen, caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno (Demattê, 1980). O solo, classificado segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999), é um Latossolo Vermelho distrófico típico argiloso A moderado hipodistrófico álico caulinitico férrico compactado muito profundo moderadamente ácido -LVd (Demattê, 1980).

Antes do preparo do solo, foram feitas análises de fertilidade e de resistência mecânica do solo à penetração, em 20 pontos aleatórios da área experimental, nas profundidades de 0-0,10; 0,10-

0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m. Para analisar a fertilidade, foi tomada uma amostra composta para cada profundidade, que se originou de 20 amostras simples. A resistência foi calculada, em cada profundidade, cujo valor médio foi originado de 20 pontos. O preparo convencional do solo foi efetuado com uma aração (arado de discos) e duas gradagens, sendo a primeira com a grade aradora e a segunda com a niveladora. Em 06/05/2002, foi semeado o cultivar de feijão IAC Carioca Eté, no espaçamento de 0,50 m entrelinhas e com 16 sementes por metro linear, conforme as recomendações agrônômicas da cultura (Fahl et al., 1998).

A malha experimental, alocada numa área terraceada e irrigada sob pivô central em 18/07/2002, com espaçamento entre pontos 5 x 5 m, constituída de cinco transeções paralelas com 15 pontos amostrais cada, abrangeu 75 pontos. Foram alocadas mais nove malhas de refinamento, cada uma posicionada aleatoriamente entre quatro pontos amostrais da grande malha, com um ponto no centro e mais quatro no sentido dos eixos cartesianos, espaçados em 2,5 m. Assim, o total de pontos amostrais estudados foi de 120.

Foram determinadas a resistência mecânica do solo à penetração (R) e a umidade gravimétrica do solo (U), identificadas, respectivamente, da seguinte forma, conforme as profundidades estudadas: (a) profundidade de 0–0,10 m: R1 e U1; (b) 0,10–0,20 m: R2 e U2; (c) 0,20–0,30 m: R3 e U3, e (d) 0,30–0,40 m: R4 e U4. Os atributos da planta pesquisados foram a produção de palha (PP) e o rendimento de grãos de feijoeiro (PG), colhidos em 09/08/2002. A resistência mecânica à penetração, obtida em 22/07/2002 com o penetrômetro de impacto (Stolf, 1991), foi calculada segundo expressão contida em Souza et al. (2001):

$$RP = \{5,6 + 6,89 [N/(P-A) 10]\} 0,0981 \quad (1)$$

em que RP representou a resistência mecânica do solo à penetração (MPa), N foi o número de impactos efetuados com o martelo do penetrômetro para a

obtenção da leitura e A e P foram as leituras feitas antes e depois dos impactos (cm). Amostras de solo para avaliação da umidade gravimétrica foram coletadas no mesmo momento das avaliações da resistência mecânica. A produção de palha, calculada com a umidade na condição de campo, e o rendimento de grãos do feijoeiro, com a umidade de 13 %, foram obtidos numa área de 4 m², com quatro linhas de plantio.

A análise descritiva inicial foi efetuada no SAS (Schlotzhaver & Little, 1997), ao passo que a geoestatística no GS⁺ (Robertson, 1998). Para testar o tipo de distribuição de frequência dos atributos, foram utilizados os parâmetros referentes ao teste W de Shapiro e Wilk fornecidos pelo SAS. A análise da dependência espacial foi efetuada segundo a expressão contida em Robertson (1998):

$$ADE = [C/(C + C_0)] 100 \quad (2)$$

sendo ADE o estimador da dependência espacial (%); C a variância estrutural e C + C₀ o patamar. Para a confecção do mapa de krigagem, foi utilizado o programa computacional SURFER (Keckler, 1995).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na profundidade de 0–0,20 m, na qual se concentra a maior parte do sistema radicular do feijoeiro, o solo apresentou valores crescentes de resistência mecânica à penetração, atingindo o máximo valor na camada de 0,10–0,20 m, sendo de 4,26 MPa (Quadro 1). Ainda que sua umidade estivesse próxima da capacidade de campo (0,17–0,20 kg kg⁻¹), os valores de resistência mecânica do solo à penetração encontrados (2,18–4,26 MPa) poderiam limitar o rendimento vegetal, conforme preceitos de Canarache (1990), Silva et al. (1994), Arshad et al. (1996) e Meroto & Mundstock (1999).

Quadro 1. Análise de atributos físicos e químicos médios de um Latossolo Vermelho distrófico de Selvíria (MS), realizada antes da semeadura do feijão

Profundidade	R ⁽¹⁾	U ⁽²⁾	pH CaCl ₂	MO	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H + Al	Al ³⁺	SB	CTC	V
m	MPa	kg kg ⁻¹		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmolc dm ⁻³					%		
0-0,10	2,18	0,17	4,9	26	41	6,2	25	13	42	1	44,2	86,2	51
0,10-0,20	4,26	0,20	4,9	26	27	3,4	28	15	38	1	46,4	84,4	55
0,20-0,30	3,37	0,22	5,1	16	7	2,2	19	11	31	1	32,2	63,2	51
0,30-0,40	2,69	0,24	5,2	12	4	1,5	13	9	28	0	23,5	51,5	46

⁽¹⁾ R = resistência mecânica à penetração. ⁽²⁾ U = umidade gravimétrica.

Já em relação à fertilidade do solo, os dados mostraram elevados teores de P, K, Ca e Mg, que, potencialmente, podem ter contribuído para um substancial rendimento da cultura.

A variabilidade de um atributo pode ser classificada, segundo Gomes (1984), de acordo com a magnitude do seu coeficiente de variação. Assim, a variabilidade da resistência mecânica do solo à penetração entre 0–0,20 m, assim como entre 0,30–0,40 m, foi muito alta, enquanto para a profundidade de 0,20–0,30 m foi alta. Os coeficientes de variação desse atributo ficaram entre 28 e 58 %. Já para a umidade, a variabilidade foi média, nas profundidades de 0–0,10 m e 0,30–0,40 m, e baixa nas intermediárias (0,10–0,20 m e 0,20–0,30 m), com coeficientes de variação entre 9 e 12 %.

Outrossim, os atributos da planta apresentaram média variabilidade, com coeficientes de variação ao redor de 18 %. Em relação à distribuição de frequência dos atributos, a resistência mecânica do solo à penetração e a umidade apresentaram, em todas as profundidades, uma distribuição lognormal, com exceção da umidade na profundidade de 0,20–0,30 m que foi normal. Já com relação aos atributos da planta, a distribuição de frequência foi do tipo normal (Quadro 2).

Os valores médios da resistência mecânica à penetração foram de 1,3; 2,9; 3,9 e 3,4 MPa, respectivamente, nas profundidades de 0–0,40 m (Quadro 2). A amplitude destes valores conteve aqueles obtidos por Gonçalves et al. (1998) e Souza et al. (2001), cujos valores variaram de 0,5 a 1,2 MPa e de 2,2 a 2,6 MPa, respectivamente. Entretanto, tal amplitude ficou contida por aquela obtida por Carvalho et al. (2002), cujos valores variaram de 0,9 a 5,1 MPa. Os dois primeiros valores em profundidade da resistência mecânica do solo à penetração (Quadro 2) sofreram substancial diminuição, dada pela ação do implemento utilizado no preparo convencional, quando comparados àqueles das respectivas profundidades e obtidos antes do preparo do solo (Quadro 1), que foram de 2,2 e 4,3 MPa.

Em relação à umidade do solo, seus valores médios em profundidade, além de apresentarem pequena variação, ficaram bastante próximos dos valores da capacidade de campo, conforme determinado por Martins (2002), considerado ideal para a determinação de tal resistência. Igualmente, em relação aos dados médios do rendimento de grãos de feijoeiro, o valor médio obtido de 2.208 kg ha⁻¹ situou-se dentro dos limites do rendimento nacional

Quadro 2. Medidas estatísticas descritivas e distribuição de frequência dos atributos da cultura do feijoeiro e de um Latossolo Vermelho distrófico de Selvíria (MS)

Atributo ⁽¹⁾	Medidas estatísticas descritivas											Distribuição de frequência ⁽²⁾	
	Média	Mediana	Moda	Erro padrão da média	Valor			Desvio-padrão	Variância	Variação (%)	Curtose		Assimetria
					Mín.	Máx.	Amplitude						
Profundidade de 0–0,10 m													
R1 (MPa)	1,272	1,113	0,549	0,067	0,549	4,067	3,518	0,731	0,534	57,453	2,489	1,571	L
U1 (kg kg ⁻¹)	0,201	0,205	0,216	0,002	0,125	0,255	0,130	0,024	5,630.10 ⁻⁴	11,774	0,500	-0,711	L
Profundidade de 0,10–0,20 m													
R2 (MPa)	2,860	2,564	3,116	0,113	0,854	7,038	6,184	1,234	1,523	43,151	1,423	1,041	L
U2 (kg kg ⁻¹)	0,205	0,206	0,202	0,002	0,123	0,263	0,140	0,020	4,140.10 ⁻⁴	9,937	2,353	-0,640	L
Profundidade de 0,20–0,30 m													
R3 (MPa)	3,920	3,788	4,605	0,100	1,837	7,504	5,667	1,090	1,188	27,81	-0,180	0,449	L
U3 (kg kg ⁻¹)	0,201	0,201	0,196	0,002	0,159	0,264	0,105	0,018	3,260.10 ⁻⁴	8,983	0,439	0,185	N
Profundidade de 0,30–0,40 m													
R4 (MPa)	3,413	3,361	3,794	0,117	0,854	7,952	7,098	1,281	1,642	37,542	0,990	0,664	L
U4 (kg kg ⁻¹)	0,201	0,203	0,204	0,002	0,115	0,299	0,184	0,022	4,980.10 ⁻⁴	11,124	4,106	-0,235	L
Planta													
PP (t ha ⁻¹)	1,826	1,831	1,981	0,031	0,998	3,158	2,160	0,335	0,112	18,330	1,240	0,271	N
PG (t ha ⁻¹)	2,208	2,232	1,731	0,035	1,185	3,341	2,156	0,388	0,151	17,591	-0,084	-0,139	N

⁽¹⁾ R = resistência mecânica à penetração, U = umidade gravimétrica, PP = produção de palha, PG = rendimento de grãos. ⁽²⁾ N = distribuição normal, L = distribuição lognormal.

do feijoeiro irrigado, preconizados por Fahl et al. (1998), que são de 1.000 a 3.000 kg ha⁻¹. Também foi superior ao valor médio canadense (FAO, 2003) de 1.890 kg ha⁻¹.

O apreciável rendimento de grãos de 2.208 kg ha⁻¹ (Quadro 2) pôde ser justificado pelos elevados teores de nutrientes do solo pesquisado (Quadro 1), assim como pelo fornecimento adequado de água às plantas, dado pelo sistema de irrigação utilizado. Ainda que, na profundidade de 0,10 a 0,20 m, a resistência do solo à penetração tenha apresentado um valor de 2,9 MPa, restritivo ao crescimento radicular e limitante do rendimento, superando o valor consumado de 2,0 MPa mencionado por Silva et al. (1994), esse valor foi menor do que o limite crítico obtido por Tavares Filho et al. (2001).

Os elevados valores da resistência mecânica à penetração (Quadro 2) indicam a provável correlação entre esse atributo e o rendimento da cultura, uma vez que proporcionariam limitações ao desenvolvimento das raízes do feijoeiro. Entretanto, seus dados mostram que a resistência mecânica à penetração e o rendimento de grãos apresentaram, respectivamente, distribuições de frequência do tipo lognormal e normal. Assim, admitindo que tais variáveis fossem distribuídas de forma aleatória no espaço e que suas distribuições de frequência fossem normais, a análise de regressão entre elas permitiria ajustar um modelo linear.

Entretanto, esse ajuste, especificamente efetuado entre a PG e as R1, R2, R3 e R4, apresentou um coeficiente de correlação não-superior a 0,184, conforme pode ser visto na matriz de correlação, estabelecida para a profundidade de 0,30–0,40 m (Quadro 3). Dessa forma, notou-se uma tendência direta entre essas variáveis, isto é, com o aumento da resistência mecânica ocorreu um aumento do rendimento de grãos, sendo tal tendência não-significativa ($p > 0,05$) e com um coeficiente de

correlação extremamente baixo. Este resultado evidenciou que apenas 3,4 % da variação do rendimento da cultura foram explicados pela variação da resistência à penetração, ficando o restante por outros fatores que não ela, sendo assim de correlação inexistente do ponto de vista prático e agrônomo.

Informações semelhantes foram obtidas por Gonçalves et al. (1998), quando foi estudada a correlação entre a resistência do solo à penetração e o rendimento de grãos do feijoeiro em Maringá (PR). O quadro 3 evidencia valores de correlação linear superiores a 0,500, que provavelmente indicam, ainda que com uma relativa importância agrônomo, haver afinidade entre tais variáveis e, portanto, a provável ocorrência de semivariograma cruzado entre elas, dadas por R1 x R2, R2 x R3, R3 x U4, U1 x U2, U1 x U3, U2 x U3 e PP x PG.

A análise geoestatística evidenciou que todos os atributos estudados apresentaram dependência espacial, comprovados pelos semivariogramas (Quadro 4 e Figura 1). Assim, tanto a resistência mecânica do solo à penetração quanto o rendimento de grãos mostraram que a distribuição destes atributos no espaço não é aleatória, uma vez que suas classes de dependência espacial variaram de 48,4 % (moderada para R4) a 77,2 % (forte para R1). Esses valores foram relativamente superiores àqueles obtidos por Gonçalves et al. (1998) e Souza et al. (2001), os quais foram, respectivamente, de 26 a de 58 % e 50 a 53 %, assim como inferiores aos de Carvalho et al. (2002), que foram de 73 a 90 %.

Portanto, no presente estudo, pôde-se constatar que 73,1 % da variação total do rendimento de grãos foram explicados pela dependência espacial. Por outro lado, o efeito do erro atribuído ao acaso, referente ao efeito pepita, foi de 26,9 %. Para todos os atributos estudados, no geral, os modelos ajustados foram o esférico e o exponencial,

Quadro 3. Matriz de correlação entre os atributos da cultura do feijoeiro e os de um Latossolo Vermelho distrófico de Selvíria (MS)

Atributo ⁽¹⁾	Coeficiente de correlação									
	R1	R2	R3	R4	U1	U2	U3	U4	PP	PG
R1	1,000									
R2	0,557	1,000								
R3	0,260	0,691	1,000							
R4	0,199	0,203	0,119	1,000						
U1	-0,298	-0,420	-0,338	0,159	1,000					
U2	-0,208	-0,351	-0,313	0,122	0,673	1,000				
U3	-0,173	-0,350	-0,281	-0,090	0,570	0,668	1,000			
U4	-0,192	-0,455	-0,503	-0,028	0,406	0,428	0,411	1,000		
PP	-0,041	-0,049	0,017	0,160	0,036	-0,039	-0,092	0,060	1,000	
PG	0,084	0,019	0,122	0,184	0,036	-0,043	-0,047	0,005	0,644	1,000

⁽¹⁾ R₁, R₂, R₃ e R₄ = resistência mecânica à penetração, respectivamente da 1^a à 4^a profundidades do solo; U₁, U₂, U₃ e U₄ = umidade gravimétrica, respectivamente da 1^a à 4^a profundidades do solo; PP = produção de palha, PG = rendimento de grãos.

concordando plenamente com os de Gonçalves et al. (1998) e Souza et al. (2001), e discordando dos de Carvalho et al. (2002), que utilizaram o modelo gaussiano. Com relação ao alcance da dependência espacial, a resistência mecânica apresentou valores entre 2,2 m (R4) e 35,8 m (R2), ao passo que o rendimento de grãos apresentou um valor de 6,1 m. Esses valores foram superiores e mais elásticos que os de Gonçalves et al. (1998), que variaram de 10 a 18 m. Entretanto, foram inferiores aos obtidos por Souza et al. (2001), que variaram de 13,1 a 58,8 m.

No quadro 5, são apresentados os parâmetros da validação cruzada de todos os atributos estudados. A resistência à penetração obtida nos três primeiros níveis, bem como o rendimento de grãos, apresentou satisfatória interpolação por krigagem, uma vez que tanto os seus coeficientes angulares (b), referentes ao modelo linear de ajuste entre os valores observados e estimados, assim como os coeficientes de correlação, ficaram com valores acima de 0,500, aproximando-se de 1. Também seus coeficientes lineares (a) ficaram bastante próximos de zero, com exceção da PG.

Na figura 2, são apresentados os mapas de krigagem da resistência mecânica do solo à penetração, nas duas primeiras profundidades estudadas (R1 e R2), e do rendimento de grãos do feijoeiro, obtidos por meio da interpolação por krigagem. Ainda que o rendimento e a resistência mecânica não tenham variado aleatoriamente, seus padrões espaciais não ficaram perfeitamente bem definidos e inter-relacionados. Isso porque, como

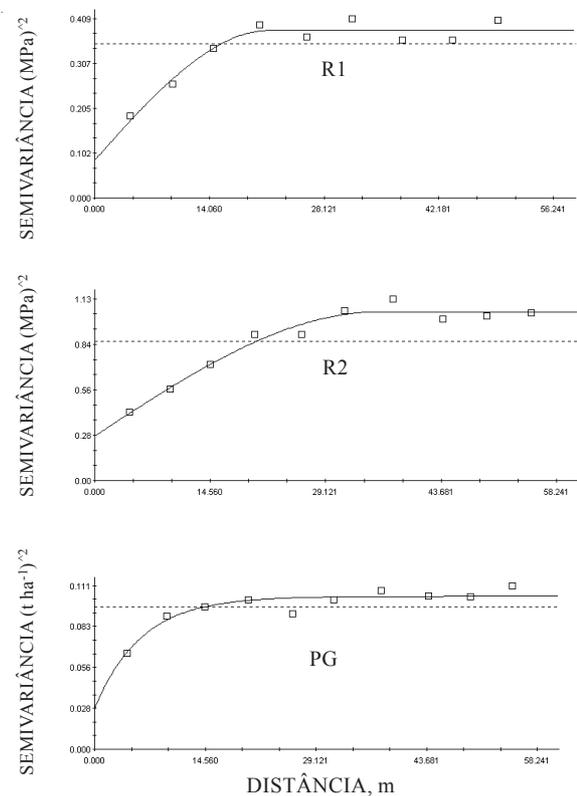


Figura 1. Semivariogramas da resistência mecânica à penetração, nas profundidades de 0-0,10 m (R1) e 0,10-0,20 m (R2) de um Latossolo Vermelho distrófico de Selvíria (MS), e do rendimento de grãos do feijoeiro (PG).

Quadro 4. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos atributos da cultura do feijoeiro e de um Latossolo Vermelho distrófico de Selvíria (MS)

Atributo ⁽¹⁾	Parâmetros							ADE ⁽⁴⁾	Classe de dependência espacial
	Modelo	Efeito pepita	Patamar	Variância Estrutural	Alcance	R ² ⁽²⁾	SQR ⁽³⁾		
		Co	Co + C	C	m			%	
Profundidade 0-0,10 m									
R1 (MPa)	Esférico	0,087	0,382	0,295	21,400	0,935	2,854.10 ⁻³	77,23	Forte
U1 (kg kg ⁻¹)	Esférico	1,200.10 ⁻⁴	4,900.10 ⁻⁴	3,700.10 ⁻⁴	25,900	0,968	2,831.10 ⁻⁹	75,51	Forte
Profundidade 0,10-0,20 m									
R2 (MPa)	Esférico	0,277	1,045	0,768	35,800	0,966	0,017	73,49	Moderada
U2 (kg kg ⁻¹)	Exponencial	4,000.10 ⁻⁵	3,000.10 ⁻⁴	2,600.10 ⁻⁴	11,800	0,946	1,774.10 ⁻⁹	86,67	Forte
Profundidade 0,20-0,30 m									
R3 (MPa)	Exponencial	0,515	1,081	0,566	16,100	0,975	4,452.10 ⁻³	52,36	Moderada
U3 (kg kg ⁻¹)	Esférico	9,000.10 ⁻⁵	4,400.10 ⁻⁴	3,500.10 ⁻⁴	65,800	0,974	2,717.10 ⁻⁹	79,55	Forte
Profundidade 0,30-0,40 m									
R4 (MPa)	Exponencial	0,580	1,123	0,543	2,200	0,331	0,018	48,35	Moderada
U4 ((kg kg ⁻¹))	Esférico	1,400.10 ⁻⁴	3,400.10 ⁻⁴	2,000.10 ⁻⁴	22,700	0,970	6,394.10 ⁻¹⁰	58,82	Moderada
Planta									
PP (t ha ⁻¹)	Exponencial	0,011	0,057	0,046	6,900	0,942	4,086.10 ⁻⁵	80,70	Forte
PG (t ha ⁻¹)	Exponencial	0,028	0,104	0,076	6,100	0,868	2,019.10 ⁻⁴	73,08	Moderada

⁽¹⁾ R₁, R₂, R₃ e R₄ = resistência mecânica à penetração, respectivamente da 1^a à 4^a profundidades do solo; U₁, U₂, U₃ e U₄ = umidade gravimétrica, respectivamente da 1^a à 4^a profundidades do solo; PP = produção de palha, PG = rendimento de grãos. ⁽²⁾ R² = coeficiente de determinação. ⁽³⁾ SQR = soma dos quadrados dos desvios. ⁽⁴⁾ ADE = avaliador da dependência espacial.

- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B. & GROSSMAN, B. 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 (SSSA Special publication, 49)
- BOWEN, J.E. & KRATKY, B.A. Compactation del suelo. Agric. Americas, 34:10-14, 1985.
- CAMARGO, A.M.M.P.; CASER, D.V. & FRANCISCO, V.L.F.S. Previsões e estimativas das safras agrícolas no Estado de São Paulo. Inf. Econ., 31:101-117, 2001.
- CANARACHE, A. Penetr-a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. Soil Till. Res., 16:51-70, 1990.
- CARVALHO, M.P.; SORATTO, R.P. & FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional em Selvíria (MS). Acta Sci., 24:1353-1361, 2002.
- DEMATTE, J.L.I. Levantamento detalhado de solos do "Campus Experimental de Ilha Solteira". Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1980. 44p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMPRESA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: Embrapa-CNP.Solos, 1999. 412 p.
- FAHL, J.I.; CAMARGO, M.B.P.; PIZZINATTO, M.A.; BETTI, J. A.; MELO, A.M.T.; DeMARIA, I.C. & FURLANI, A.M.C. Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas. 6.ed. Campinas, Instituto Agrônômico, 1998. p.281-282. (Boletim técnico 200)
- FAO (2003). Disponível em: < <http://www.fao.org>>. Acesso em: 10 dez. 2003.
- GAMERO, C.A. Efeito dos tipos de preparo sobre características do solo e da cultura do milho (*Zea mays* - L). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1985. 102p. (Tese de Doutorado)
- GERARD, C.J.; MEHTH, H. C. & HINOJOSA, F. Root growth in a clay soil. Soil Sci., 114:37-49, 1972.
- GOMES, F.P. A estatística moderna na pesquisa agropecuária. Piracicaba, POTAFÓS, 1984. 160p.
- GONÇALVES, A.C.C.; 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 EN LA INGENIERÍA RURAL LATINOAMERICANA, 1., La Plata, 1998. Anais. La Plata, UNLP, 1998. p.113-119.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE ECONOMIA DE SÃO PAULO - IBE. Agroanalysis. Centro e Estudos Agr., 15:39, 1995.
- KECKLER, D. Surfer for windows: version 6, contouring and 3D surface mapping. Golden: Golden Software, 1995.
- KRANZ, W.M. População de plantas In: FUNDAÇÃO INSTITUTO AGRÔNOMICO DO PARANÁ. O feijão no Paraná. Londrina, 1989. p.115-25. (Circular, 63)
- MARTINS, C.B. Análise da resistência mecânica à penetração de um Latossolo Vermelho distrófico em função do grau de umidade. Ilha Solteira, Faculdade de Engenharia, 2002. 46p. (Trabalho de Graduação)
- MEREDITH, H.L. & PATRICK JUNIOR, W.H. Effects of soil compaction on subsoil root penetration and physical properties of the soils in Louisiana. Agron. J., 53:163-167, 1961.
- MEROTTO, A. & MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. R. Bras. Ci. Solo, 23:197-202, 1999.
- MUÇOUÇAH, M.J. Influência de cultivares de feijoeiro, adubação e inseticidas sobre a população e danos de *Empoasca kraemeri* (ROSS & MOORE, 1957) (Hemiptera-Cicadellidae) e *Bemisia tabaci* (GENNADIUS, 1889) (Hemiptera-Aleyrodidae), em três épocas de semeadura. Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 1994. 198p. (Tese de Mestrado)
- NEHMI, I.M.D.; FERRAZ, J.V.; NEHMI FILHO, V.A. & SILVA, M.L.M. Feijão In: AGRIANUAL 2003: Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo, Argos, 2003. p.329-336.
- PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S. & NACHTIGALL, G.R. Produtividade do arroz irrigado em sistemas de cultivo contínuo e em rotação com soja e milho. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 18., Porto Alegre, 1989. Anais. Porto Alegre, IRGA, 1989. p.150-160.
- ROBERTSON, G.P. GS+: Geostatistics for the environmental sciences. Michigan, Gamma Desing Software, 1998. 151p.
- SCHLOTZHAVER, S.D. & LITTLE, R.C. SAS system for elementary statistical analysis. 2. ed. Cary, SAS, 1997. 441p.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1775-1784, 1994.
- 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.
- 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.

