

Variabilidade espacial da penetrometria correlacionada à umidade volumétrica do solo ⁽¹⁾.

**Fernando Henrique Setti Gimenes⁽²⁾; Edison Aparecido Mome Filho⁽³⁾;
João Manoel do Prado Gambardella⁽⁴⁾; Álvaro Pires da Silva⁽⁵⁾**

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos de FAPESP.

⁽²⁾ Doutorando em Solos e Nutrição de Plantas; Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"; Piracicaba, São Paulo; fernando7gimenes@usp.br; ⁽³⁾ Doutorando em Solos e Nutrição de Plantas; Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" ⁽⁴⁾ Graduando de Engenharia Agrônômica; Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"; ⁽⁵⁾ Professor Titular do departamento de Ciência do Solo; Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

RESUMO: Diversos aparelhos têm sido desenvolvidos para a apuração de atributos do solo diretamente no campo, visando averiguar áreas a serem manejadas por causa da compactação. A penetrometria é uma técnica muito utilizada na verificação de áreas com problemas de compactação. Entretanto, há variáveis que podem influir nas medições de resistência à penetração (RP). O objetivo deste trabalho foi verificar a influência do teor de água no solo sobre a variabilidade espacial da RP por meio de análises geoestatísticas. Os resultados comprovaram que a análise espacial da resistência do solo a penetração pode desconsiderar os valores pontuais do teor de água no solo, uma vez que se saiba o teor médio para as possíveis inferências sobre o mapa gerado.

Termos de indexação: cana-de-açúcar; mecanização; penetrômetro digital; teor de água no solo

INTRODUÇÃO

Os problemas físicos que um solo pode apresentar frente ao crescimento das plantas estão relacionados, principalmente, à compressão de suas partículas sólidas, que pulveriza os macroagregados e tem efeito negativo sobre a macroporosidade e o crescimento radicular (Oliveira et al., 2010). Isso resulta em compactação, que é a redução do espaço poroso e aumento de densidade do solo decorrente da aplicação de uma pressão externa antropogênica (Souza et al., 2009).

A averiguação das situações de necessidade de controle da compactação do solo depende da utilização de índices que tenham alta confiabilidade para a tomada de decisão. A resistência do solo à penetração (RP) tem sido priorizada em estudos de manejo e compactação do solo (Souza et al., 2009) devido à facilidade e rapidez de sua obtenção (Busscher et al., 2000) e correlação com atributos da planta, como crescimento radicular (Busscher & Bauer, 2003) e de produtividade (Whalley et al., 2008).

Os atributos do solo podem afetar a RP, dentre os quais o teor de água (θ) merece especial atenção. Segundo Cunha (2002), apesar de muitos

estudos terem sido realizados, não existe uma quantificação conclusiva da influência de uma determinada variação no θ sobre a resistência à penetração para diferentes solos, ou se esses acréscimos influenciam o coeficiente de variação dos dados de RP de um determinado solo.

Pesquisas que visam avaliar a qualidade do solo necessitam do conhecimento da variação espacial e temporal das propriedades físicas do solo (Aggarwa et al., 2006). Segundo Souza et al. (2009) os mapas de krigagem, técnica que utiliza a geoestatística, considerando a variabilidade espacial dos atributos estudados, e a distribuição destes por classe de ocorrência, podem auxiliar agricultores no manejo da compactação.

O objetivo deste trabalho foi verificar a influência do teor de água no solo sobre a variabilidade espacial da RP por meio de análises geoestatísticas.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em talhões de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) pertencentes à Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA), pólo regional centro-sul, localizada no município de Piracicaba, SP. A cultura da cana-de-açúcar utiliza grande aporte de maquinário desde o plantio até a colheita (Ceddia et al., 1999; Paulino et al., 2004) e o aumento do tráfego dessas máquinas tem aumentado a degradação física do solo, gerando obstáculos ao crescimento radicular (Carrara et al., 2007). Como a verificação do grau de compactação dos solos cultivados com cana-de-açúcar tornou-se um fator preponderante, considerou-se esta cultura para avaliação das hipóteses deste trabalho. A área experimental localiza-se numa latitude sul de 22°41'04" e longitude oeste de 47°38'52", altitude de 547 metros, clima Cwa segundo Köppen, temperatura média de 24 °C, verões quentes e úmidos e invernos mais secos e com temperaturas amenas.

Foi selecionada uma parcela com cana-soca, plantada em abril/2010 e colhida por corte mecanizado em julho/2011. O solo da área era um Latossolo Vermelho eutrófico, Tb, A moderado,

textura argilosa (Embrapa, 2006). A uniformidade da área expressa-se pela baixa variação da textura e dos valores de carbono orgânico do solo (**Tabela 1**).

Tabela 1 - Distribuição granulométrica e quantidade de carbono orgânico das parcelas 1CMan, 1CM e 3CM.

	Areia	Silte	Argila	C.org
	----- (g kg ⁻¹) -----			
	0,0 a 0,1 m			
Max	327	149	562	1,54
Média	311	141	540	1,45
Mín	301	124	527	1,26
DP	9	8	12	0,08
CV%	2	6	2	5,62
	0,1 a 0,2 m			
Max	335	147	562	1,62
Média	322	135	543	1,53
Mín	297	119	520	1,44
DP	12	9	17	0,06
CV%	4	7	3	3,77
	0,2 a 0,3 m			
Max	334	148	597	1,64
Média	304	131	565	1,54
Mín	272	106	530	1,39
DP	24	13	20	0,08
CV%	7	10	3	4,91

O preparo do solo na antes do plantio constitui-se de: gradagem pesada - subsolagem (subsolador de cinco hastes) - duas gradagens (pesada e média) - sulcamento. Foi cultivada a variedade IAC87-3396. A colheita mecanizada foi realizada com uma colhedora de linha única, acompanhada de transbordo.

A RP (MPa) foi obtida com penetrômetro eletrônico da Falker Automação Agrícola modelo PLG1020, com ponta cônica de área basal $7,74 \times 10^{-5}$ m² e ângulo de 30° e haste de 0,40 m de comprimento e 6×10^{-3} m de diâmetro, inseridas no solo através da força do operador. As leituras foram obtidas na camada de 0,0 a 0,3 m, calculando-se médias para cada incremento de 0,1 m. Todas as medições foram realizadas nas entrelinhas em grade fixa de 5 m x 1,5 m, totalizando 182 pontos por parcela experimental. Em cada ponto onde realizou-se a medição da RP, a uma distância de 0,07 m, paralela às linhas de plantio, foi feita a leitura do teor de água do solo (θ) com um sensor da Delta-T Devices (ML2x ThetoProbe), para as

mesmas camadas. Dessa grade amostral foram selecionadas a leituras realizadas nos dias mais secos, onde se esperava que a variabilidade do θ fosse maior.

Para as análises geoestatística utilizou-se o pacote geoR (Ribeiro Jr. & Diggle, 2001) e a técnica da máxima verossimilhança pra ajuste do modelo, utilizando-se o exponencial e o esférico. Para a escolha do melhor modelo considerou-se o menor valor do Critério de Informação de Akaike (CIA) dado pela **Equação 1**, onde VM é a Verossimilhança Maximizada do modelo candidato e p é o número de parâmetros deste modelo (Akaike, 1983).

$$AIC = -2\log VM + 2p \quad (1)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medições de RP foram realizadas em uma amplitude média do θ entre 0,10 e 0,42 m³ m⁻³. A área de estudo apresentou valores relativamente baixos de RP nas três camadas (0,0 a 0,3 m) podendo-se atribuir isso a uniformidade de resíduos vegetais cobrindo as entrelinhas de cana-soca, que contribui para uma menor taxa de secagem ao longo do tempo. Souza et al. (2005) verificaram que no sistema de cana crua, o armazenamento de água no solo é maior, possivelmente devido à barreira que esses resíduos formam em superfície. Isso dificulta a saída de água e diminui a evapotranspiração (Oliveira et al., 2010). Verificou-se nas correlações RPx θ que as curvas de RP se apresentaram visualmente diferenciadas para cada camada (**Figura 1**). Os valores menores de R² nas camadas inferiores se relaciona a menor amplitude dos valores de θ , devido à lenta secagem desta parcela (**Tabela 2**).

Outra abordagem, considerando a influência do θ , deveria ser feita. Atualmente, busca-se realizar medições de RP num curto intervalo de tempo, para possibilitar avaliar a compactação de solos agrícolas desconsiderando o efeito do θ . Mas, como observado, o efeito da palhada pode interferir no tempo de secagem do solo. Isso assegura a necessidade do conhecimento do θ em estudos comparativos.

Tabela 2 - Coeficientes do ajuste entre a resistência do solo à penetração e o teor de água no solo, em diferentes profundidades.

Camada	Parâmetros			
	m	a	b	R ²
0,0 a 0,1		0,2822	-1,3421	0,51

0,1 a 0,2	0,4398	-1,3278	0,36
0,2 a 0,3	0,5269	-1,2340	0,24
Parâmetros:	(a) intercepto;	(b) coeficiente	exponencial.

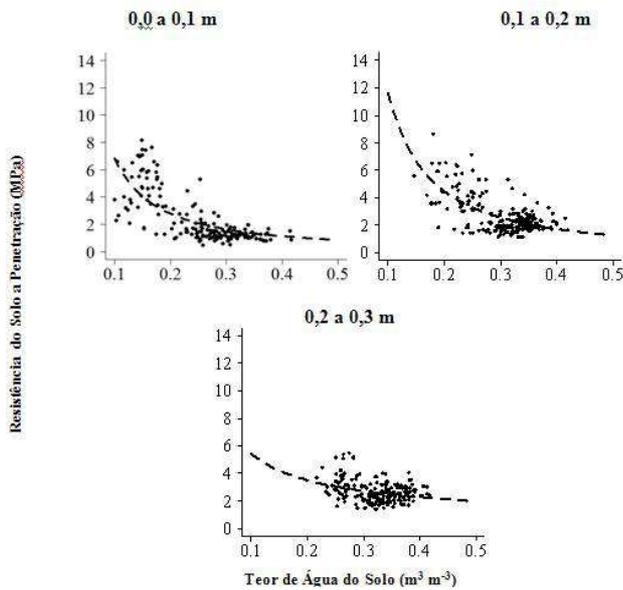


Figura 1 - Regressões entre a resistência à penetração (RP) e o teor de água no solo (θ) em diferentes profundidades.

Análise Geoestatística

Os ajustes dos modelos espaciais expressaram o contrário (**Tabela 3**). Para ambos os modelos utilizados (exponencial e esférico), não foi verificada diferença ao considerar o θ como uma covariável. Como, em igualdade representativa, deve se prezar pelo modelo mais simples, foi feito o mapa de isolinhas por krigagem ordinária da camada superficial do solo (0,0 a 0,1 m) (**Figura 2**). Isso corrobora trabalhos de outros pesquisadores que analisaram a variabilidade espacial da RP considerando apenas a umidade média da área (Meshalkina et al., 1995; Souza et al., 2009).

Tabela 3 – Modelos e parâmetros da análise geoestatística.

Camada	Parâmetros				
m	Modelo	τ^2	σ^2	ϕ	CIA
0,0 a 0,1	Exponencial ₁	1,203	2,83	1,522	-108,6
	Exponencial ₂	1,203	2,83	1,522	-108,6
0,1 a 0,2	Esférico ₁	2,071	2,01	6,306	-108,2
	Esférico ₂	2,071	2,01	6,306	-108,2

(₁) sem covariável; (₂) com covariável; (EPP) efeito pepita puro; (τ^2) efeito pepita; (σ^2) variância; (ϕ) phi; (CIA) critério de informação de Akaike.

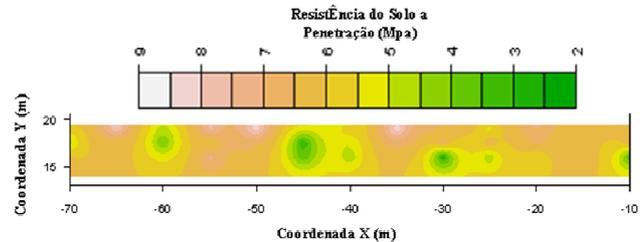


Figura 2 – Mapa de isolinhas da krigagem na camada de 0,0 a 0,1 m.

Para todas as camadas subsuperficiais não ocorreu padrão espacial na variável RP. Veronese Júnior et al. (2006) encontraram resultado distinto, porém estes autores citam que no preparo convencional, caso de seu trabalho, há um grande revolvimento da superfície do solo, o que aumenta a heterogeneidade das camadas superficiais. Como o modelo geoestatístico exige estacionaridade, espera-se que processos muito heterogêneos apresentem uma variância independente do espaço. A cana-soca pode ser considerada uma cultura semi-perene, já que a superfície do solo tem a capacidade de se uniformizar, possibilitando o comportamento espacial dos atributos em camadas superiores. Os modelos das camadas de 0,1 a 0,2 m e 0,2 a 0,3 m apresentaram efeito pepita puro.

Ao observar o mapa de isolinhas verifica-se que mesmo com o conteúdo de água não variando muito, houve ocorrência de zonas com valores diferenciados de RP. Como a textura e o conteúdo de carbono orgânico tiveram variação desconsiderável (**Tabela 1**), provavelmente quem está regendo a mudança da RP é a Ds. Na **Tabela 4** vemos que na superfície a variação da Ds é alta se comparada a das camadas adjacentes. Como a RP tem uma correlação positiva com a Ds, espera-se que incrementos nesta ocasião o mesmo com o conseguinte. Incrementos na Ds estão intimamente ligados a compactação do solo, comprovando que, em condições que a amplitude do θ no solo é baixa, a RP é uma melhor ferramenta para inferir sobre a compactação do solo, pois se trata um atributo de fácil obtenção comparado a Ds.

Tabela 4 - Estatística descritiva da densidade do solo (Ds), densidade de partículas (Dp), porosidade total do solo (PT) e capacidade de campo (CC), com valores máximo (Max), mínimo (Mín), desvio padrão da média (DP) e coeficiente de variação (CV).

	Ds	Dp	PT	CC
	-----Mg m ⁻³ -----		-----m ³ m ⁻³ -----	
Camada de 0,0 a 0,1 m				
Max	1,54	2,68	0,55	0,34
Média	1,39	2,67	0,48	0,31
Mín	1,19	2,64	0,42	0,27
DP	0,14	0,02	0,05	0,03
CV (%)	9,83	0,61	10,70	8,31
Camada de 0,1 a 0,2 m				
Max	1,64	2,69	0,46	0,37
Média	1,54	2,67	0,42	0,34
Mín	1,45	2,64	0,39	0,32
DP	0,06	0,02	0,02	0,01
CV (%)	4,07	0,78	5,53	3,77
Camada de 0,2 a 0,3 m				
Max	1,56	2,69	0,45	0,38
Média	1,52	2,68	0,43	0,36
Mín	1,47	2,64	0,42	0,32
DP	0,03	0,02	0,01	0,02
CV (%)	2,17	0,64	2,85	6,11

CONCLUSÕES

A análise espacial da resistência do solo a penetração pode desconsiderar os valores pontuais do teor de água no solo, uma vez que se saiba o teor médio para as possíveis inferências sobre o mapa gerado.

Áreas muito homogêneas impedem o uso da geoestatística, podendo ser utilizada a estatística clássica para diferenças entre tratamentos que apresentem tal resposta.

Quando a amplitude do teor de água no solo é pequena, a resistência a penetração é um excelente índice de compactação do solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP e ao CNPQ pela concessão de bolsas de auxílio a pesquisa.

REFERÊNCIAS

AGGARWAL, P.; CHOUDHARY, K.K.; SINGH, A.K.; CHAKRABORTY, D. Variation in soil strength and rooting characteristics of wheat in relation to soil management. *Geoderma*, 136:353-363, 2006.

AKAIKE, H. Information measures and model selection. *International Statistical Institute*, 44:277-291, 1983.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J. Soil strength, cotton root growth and lint yield in a southeastern USA coastal loamy sand. *Soil Tillage Research*, 74:151-159, 2003.

BUSSCHER, W.J.; FREDERICK, J.R.; BAUER, P.J. Timing effects of deep tillage on penetration

resistance and wheat and soybean yield. *Soil Science Society of American Journal*, 64:999-1003, 2000.

CARRARA, M.; CASTRIGNANÒ, A.; COMPARETTI, A.; FEBBO, P.; ORLANDO, S. Mapping of penetrometer resistance in relation to tractor traffic using multivariate geostatistics. *Geoderma*, 142:294-307, 2007.

CEDDIA, M.B.; ANJOS, L.H.C.; LIMA, E.; RAVELLI NETO, A.; SILVA, L. A. Sistemas de colheita de cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo Podzólico Amarelo no estado do Espírito Santo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34:1467-1473, 1999.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

MESHALKINA, J.L.; STEIN, A.; DMITRIEV, Y.A. Spatial variability of penetration data on Russian plots in different land use. *Soil Technology*, 8:43-59, 1995.

OLIVEIRA, V.S.; ROLIN, M.M.; VASCONCELOS, F.B.; COSTA, Y.D.J.; PEDROSA, E.M.R. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocóeso submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14:914-920, 2010.

PAULINO, A.F.; MEDINA, C.C.; AZEVEDO, C.B.; SILVEIRA, K.R.P.; TREVISAN, A.A.; MURATA, I.M. Escarificação de um Latossolo Vermelho na pós-colheita de soqueira de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28:911-917, 2004.

RIBEIRO JR., P.J. and DIGGLE, P.J. (2001) geoR: A package for geostatistical analysis. *R-NEWS Vol 1*, No 2. ISSN 1609-3631.

SOUZA, Z.M.; PRADO, R.M.; PAIXÃO, A.C.S.; CESARIN, L.G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40:271-278, 2005.

SOUZA, Z.M., MARQUES JÚNIOR, J.; COOPER, M.; PEREIRA, G.T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41:487-492, 2006.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, v.40, n.1, 2009.

VERONESE JÚNIOR, V.; CARVALHO, M.P.; DAFONTE, J.; FREDDI, O.S.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; INGARAMO, O.E. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian ferralsol. *Soil & Tillage Research*, 85:166-177, 2006.

WHALLEY, W.R.; WATTS, C.W.; GREGORY, A.S.; MOONEY, S.J.; CLARK, L.J.; WHITMORE, A.P. The effect of soil strength on the yield of wheat. *Plant Soil*, 306:237-247, 2008.