

Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil

Milton C. C. Campos¹, Renato E.de Aquino¹, Ivanildo A.de Oliveira² & Anderson C. Bergamim¹

¹ Universidade Federal do Amazonas, Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente, Rua 29 de Agosto, 786, Divino Pranto, CEP 69800-000, Humaitá-AM, Brasil. E-mail: mcesarsolos@gmail.com; agromccc@yahoo.com.br; andersonbergamin@hotmail.com

² Universidade Estadual Paulista, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/n, Zona Rural, CEP 14884-900, Jaboticabal-SP, Brasil. E-mail: aquino.rea@gmail.com; ivanildoufam@gmail.com

RESUMO

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) é um atributo indicador da compactação, influenciada pela umidade do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e da umidade do solo em área com cultivo de cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil; para a coleta de dados foi utilizada uma malha amostral de 70 x 70 m na qual foram marcados pontos com intervalo regular de 10 m, perfazendo o total de 64 pontos. As amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0,00-0,15 m, 0,15-0,30 m e 0,30-0,45 m, para determinação da umidade do solo nessas camadas e a resistência do solo à penetração foi determinada utilizando-se penetrômetro de impacto. Os dados foram analisados por meio da estatística descritiva e de ferramentas de geoestatística. As variáveis em estudo apresentaram dependência espacial e o alcance apresentou valores maiores que os pré-estabelecidos na malha amostral enquanto a RP e a umidade do solo apresentaram relação espacial cujos menores valores de RP se concentraram nos maiores valores de umidade do solo.

Palavras-chave: atributos físicos, conteúdo de água, geoestatística

Spatial variability of soil resistance to penetration and soil moisture in the area cultivated with sugar cane in the region of Humaitá, Amazonas, Brazil

ABSTRACT

The mechanical resistance to penetration (RP) is an attribute indicator of compaction was influenced by soil moisture. The objective of this study was to evaluate the spatial variability of soil resistance to penetration and soil moisture on area under cultivation of sugar cane in the region of Humaitá, Amazonas, Brazil. We conducted a sampling grid of 70x70 m where points were scored at regular intervals of 10 m, a total of 64 points. Soil samples were collected at depths of 0.00 to 0.15 m, 0.15 to 0.30 | 0.30 to 0.45 m for determination of soil moisture and soil resistance to penetration in the field. After analysis of these data analyzes were descriptive statistics and geostatistics. We conclude that all the variables studied showed spatial dependence and range values were higher than stipulated by the sampling grid and the RP and soil moisture showed a spatial relationship where lower values of PR concentrated on smaller values of soil moisture.

Key words: physical attributes, water content, geostatistics

Introdução

A resistência do solo à penetração (RP) é um importante atributo na avaliação da qualidade do solo (Souza et al., 2006), pois é utilizada frequentemente como indicador da compactação em sistemas de manejo por estar diretamente relacionada ao crescimento das plantas e ser de fácil e rápida determinação (Stolf et al., 1983; Tormena & Roloff, 1996 e Mercante et al., 2003; Tavares-Filho & Ribon, 2008); este atributo é influenciado pela umidade do solo, textura, densidade e condição estrutural do solo, conforme destacam Marasca et al. (2011), Bottega et al. (2011) e Dalchiavon et al. (2011).

Para Bottega et al. (2011) uma das maneiras de se alterar a condição física do solo é por meio de seu manejo, buscando criar condições estruturais favoráveis para o melhor desenvolvimento radicular. A resistência do solo à penetração é um atributo físico relativamente fácil de ser medido e, de certa forma, de ser correlacionado com sua densidade e macroporosidade. Para um mesmo solo quanto maior a densidade maior também será a resistência à penetração e menor a macroporosidade (Montanari et al., 2012). Esta última se constituiu no principal espaço para o crescimento das raízes; no entanto, deve ser levado em conta que a resistência do solo à penetração é mais afetada pela variação dos conteúdos de sua umidade (Mercante et al., 2003).

A degradação física do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar é devida ao manejo intensivo, com o que o manejo inadequado dos solos e a utilização de máquinas e equipamentos pesados acarretam no incremento da compactação do solo, causando a degradação cumulativa da qualidade física do solo ao longo dos anos de cultivo (Watanabe et al., 2002; Carvalho et al., 2008; Roque et al., 2010).

O conhecimento da distribuição espacial das propriedades do solo é de suma importância para determinação dos parâmetros responsáveis pelo rendimento das culturas, além de indispensável para alcançar uma agricultura sustentável (Weirich Neto et al., 2006; Cajazeira & Assis Júnior, 2011). Johnson et al. (2005) afirmam, estudando cana-de-açúcar no estado da Louisiana, EUA, que a variabilidade espacial dos atributos do solo deve ser incorporada aos procedimentos e tecnologias aplicados à agricultura. Essas novas tecnologias ligadas à agricultura de precisão como a geoestatística, surgem como uma das técnicas mais significativas, visto que ela permite determinar se um atributo apresenta ou não estrutura espacial; uma vez conhecido o modelo da dependência espacial é possível mapear a área estudada (Gonçalves et al., 2001; Johnson et al. 2005) e um outro uso importante é na identificação de áreas compactadas e o consequente manejo localizado deste problema (Ramirez-Lopez et al., 2008).

Diversos estudos demonstram que a variabilidade da resistência do solo à penetração e a umidade do solo não ocorrem ao acaso mas apresentam correlação ou dependência espacial (Souza et al., 2001; Utset & Cid, 2001; Abreu et al., 2003; Mercante et al., 2003). Para diferentes condições de umidade do solo distintos comportamentos da variabilidade espacial da resistência do solo à penetração foram observados por Utset & Cid (2001). Considerando que a umidade do solo é um dos fatores que exercem forte influência nos resultados

da resistência mecânica do solo à penetração, o objetivo deste trabalho foi estudar a variabilidade espacial da RP e umidade do solo em área em cultivo de cana-de-açúcar, na região de Humaitá, Amazonas, Brasil.

Material e Métodos

O estudo foi realizado na região de Humaitá, sul do Estado do Amazonas; a área se situa em latitude de 7° 30' 24" S e longitude de 63° 04' 56" W (Figura 1); o clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Am, com temperaturas variando entre 25 e 27 °C, precipitação média anual de 2.500 mm e umidade relativa do ar entre 85 e 90%; o solo foi classificado como Cambissolo Háplico Alíticoplíntico, A moderado, textura média (Embrapa, 2006).

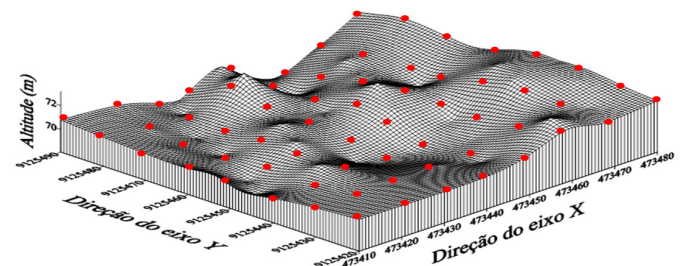


Figura 1. Modelo de elevação digital da área de estudo com cultivo de cana-de-açúcar

A área estudada vem sendo cultivada com cana-de-açúcar há mais de cinco anos sendo, antes, vegetação nativa; sua colheita é feita manualmente com queima da palha. As coletas foram realizadas no mês de janeiro de 2011 quando o solo estava próximo de sua capacidade de campo. As amostras foram coletadas em uma área de 0,49 ha na qual foi estabelecida uma malha amostral com dimensões de 70 m x 70 m e marcados pontos de 10 em 10 m totalizando 64 pontos na malha amostral (Figura 1). Foram realizadas coletas nesses pontos da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo nas profundidades de 0,00-0,15, 0,15-0,30 e 0,30-0,45 m. Os pontos foram georreferenciados utilizando-se receptor GPS, com correção diferencial, modelo Promark2 que resultou em uma precisão de 2 m.

A umidade gravimétrica foi determinada com amostras deformadas de solo, conforme o proposto em Embrapa (1997). Para determinação da RP foi utilizado um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar, com ângulo de cone de 30°. A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm/impacto) em resistência à penetração foi obtida segundo Stolf (1991) aplicando-se a fórmula:

$$R = \frac{Mg + mg + \left(\frac{M}{M+m} \times \frac{Mg \times h}{x} \right)}{A}$$

sendo: R = resistência mecânica do solo à penetração, kgf cm⁻² (kgf cm⁻² x 0,098 = MPa); M = massa do êmbolo, 4 kg (Mg – 4 kgf); m = massa do aparelho sem êmbolo, 3,2 kg (Mg – 3,2 kgf); h = altura de queda do êmbolo, 40 cm; x = penetração da haste do aparelho, cm/impacto e A = área do cone, 1,29

cm². Os valores de resistência mecânica do solo à penetração foram agrupados nas seguintes camadas: 0,00-0,15, 0,15-0,30 e 0,30-0,45 m.

A ARP e a umidade do solo foram analisadas por meio da análise estatística descritiva e de técnicas de geoestatística. A hipótese de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, através do programa computacional SAS (Schlotzhaver & Littell, 1997). A dependência espacial foi analisada com os ajustes de semivariogramas com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca (Vieira et al., 1983) a qual é estimada por:

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

sendo: N(h) é o número de pares experimentais de observações, Z(x_i) e Z(x_i + h), separados por uma distância h. Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $\tilde{\gamma}(h)$, são estimados os parâmetros de ajuste do semivariograma (o efeito pepita, C₀; patamar, C₀+C₁ e o alcance, a). Os modelos de semivariogramas foram o esférico, o exponencial, o linear e o gaussiano utilizando-se o software GS+ 8.0 (Robertson, 1998). Os modelos de ajuste considerados para os semivariogramas foram estabelecidos considerando-se melhor coeficiente de determinação (R²) e o método de validação cruzada; para analisar o grau da dependência espacial ($[C_0/(C_0+C_1)] \times 100$) dos atributos em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), em que são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar, moderada quando está entre 25 e 75% e fraca quando for maior que 75%. Os mapas de distribuição espacial para os atributos estudados foram obtidos por meio do software Surfer 8.0 (Golden Software, 2002).

Resultados e Discussão

Os valores da média e da mediana para os atributos RP se encontram com certo distanciamento, o que pode ser um indicativo de distribuição de dados assimétricos, em que as medidas de tendência central são dominadas por valores atípicos, fato contrário ao evidenciado para a umidade do solo, que apresenta seus valores próximos, indicando distribuições simétricas (Tabela 1).

Os coeficientes de assimetria e curtose estão distantes de zero para todas as variáveis estudadas caracterizando distribuição assimétrica (Tabela 1). Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov indicaram normalidade para todas as variáveis estudadas apesar da normalidade não ser uma exigência da geoestatística (Isaaks & Srivastava, 1989).

Houve aumento da RP da profundidade de 0,00-0,15 m para 0,15-0,30 m, passando de 2,16 para 2,86 MPa com diminuição da RP na profundidade de 0,30-0,45 m em relação à camada superior. Campos et al. (2012) encontraram aumento crescente em profundidade da RP em um Cambissolo sob cultivo de mandioca em Humaitá, AM; na camada de 0,15-0,30 m observou-se o valor mais alto de RP, estando relacionado à ocorrência de um provável “pé-de-grade” nessa camada de solo, provocada pela passagem do trator no sulco do arado e à ação dos próprios discos dos arados e grades.

Em virtude de o solo ter atingido valores de RP superiores a 2,0 MPa, nas camadas de solo estudadas o solo pode ser considerado compactado pois, segundo os autores (Camargo 1983; Arshad et al., 1996; Camargo & Alleoni 1997) promove restrição significativa ao crescimento radicular de culturas em sistemas de preparo convencional. Visto que os valores de RP foram obtidos em condições de valores de umidade do solo de 0,25 kg kg⁻¹ na camada de 0,0-0,45 m, isto pôde restringir o pleno desenvolvimento da cultura e, sempre que o solo for sofrendo redução em seu conteúdo de água, esses efeitos vão sendo mais evidenciados, de vez que, segundo Souza et al. (2006) a RP apresenta relação inversa com a umidade gravimétrica do solo.

Seguindo a classificação do coeficiente de variação (CV) proposta por Warrick & Nielsen (1980) observou-se que os valores de umidade do solo para as três profundidades estudadas apresentaram baixa variabilidade, ou seja, CV < 12%, concordando com os resultados encontrados por Campos et al. (2012) em um Cambissolo Háplicosob cultivo de mandioca na região de Humaitá, Amazonas; a RP apresentou alta variabilidade com valores de CV acima de 25%, resultados esses diferentes dos de Souza et al. (2006) em cultivo contínuo de cana-de-açúcar que encontraram, na sua maioria, baixa variabilidade desses atributos.

A RP e a umidade do solo (Figura 2) apresentaram dependência espacial em todas as profundidades estudadas, expressa por meio dos modelos de semivariogramas; os valores de RP se ajustaram ao modelo exponencial nas profundidades

Tabela 1. Estatística descritiva para os atributos resistência mecânica do solo à penetração (MPa) e umidade do solo (kg kg⁻¹) nas profundidades de 0,00-0,15, 0,15-0,30 e 0,30-0,45 m em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil

Estatística	Resistência mecânica do solo à penetração			Umidade do solo		
	Profundidade (m)					
	0,00-0,15	0,15-0,30	0,30-0,45	0,00-0,15	0,15-0,30	0,30-0,45
Média	2,16	2,86	2,72	0,26	0,24	0,24
Mediana	1,90	2,37	2,43	0,26	0,24	0,24
Mínimo	0,78	1,07	1,05	0,20	0,10	0,13
Máximo	5,51	6,46	5,96	0,39	0,31	0,34
Assimetria	1,46	1,09	1,08	1,61	-1,38	-0,25
Curtose	2,57	0,73	1,24	6,21	9,50	4,77
DP ¹	0,91	1,21	0,93	2,82	2,71	2,69
Variância	0,83	1,47	0,88	7,99	7,37	7,26
CV (%)	42,28	42,40	34,44	10,75	11,45	11,40
d ²	0,18*	0,17*	0,14*	0,10*	0,11*	0,09*

DP¹= desvio padrão; d² = *significativo a 5% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov

0,00-0,15 m e 0,15-0,30 m e modelo esférico na profundidade 0,30-0,45m. Para a umidade do solo (Figura 1) todos os dados se ajustaram ao modelo esférico. McBratney & Webster (1986) estudaram modelos de ajuste do semivariograma para as propriedades do solo e relataram que os modelos esférico e exponencial são os mais frequentemente encontrados.

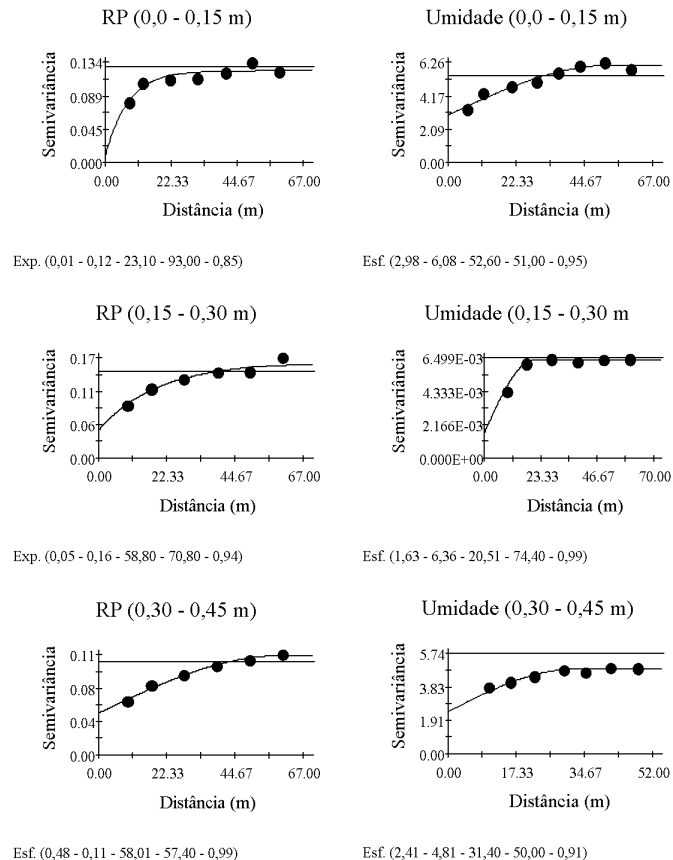


Figura 2. Semivariograma dos atributos resistência mecânica do solo à penetração (RP) e umidade do solo nas profundidades de 0,00-0,15, 0,15-0,30, 0,30-0,45 m em área em cultivo de cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. Esf.; Exp. (C_0 ; C_0+C_1 ; a ; $C_0/(C_0+C_1)$; R^2). Esf = Modelo Esférico; Exp = Modelo Exponencial; C_0 = efeito pepita; C_0+C_1 = Patamar; a = alcance; $C_0/(C_0+C_1)$ = dependência espacial; R^2 = coeficiente de determinação

De acordo com Siqueira et al. (2008) o efeito pepita (C_0) indica a descontinuidade espacial de um atributo e, portanto, quanto maior o valor de C_0 maior também a variabilidade não detectada durante o processo de amostragem; este parâmetro pode ser expresso como porcentagem do patamar e tem, por objetivo, facilitar a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em estudo (Trangmar et al. 1985). Utilizando a classificação de Cambardella et al. (1994) a análise da relação $C_0/(C_0+C_1)$ mostrou que os atributos RP e a umidade do solo apresentaram dependência espacial moderada (26-75%) em todas as profundidades estudadas, com exceção da RP na profundidade de 0,00-0,15 m, que apresentou fraça dependência espacial assemelhando-se aos dados encontrados por Souza et al. (2006) em um Latossolo Vermelho distrófico argiloso em cultivo de cana-de-açúcar, há mais de 40 anos.

Os atributos em estudo apresentaram alcances partindo de 23,10, 58,80 e 58,01m para a RP nas profundidades de 0,00-0,15, 0,15-0,30 e 0,30-0,45m, respectivamente, esses valores

são superiores aos encontrados por Souza et al., (2006; 2009) e Marasca et al. (2011) ou seja, valores em torno de 25 m para a RP.

Comparando a umidade do solo com a RP, verificaram-se valores de alcance com menores magnitudes variando de 52,60, 20,51 e 31,40m nas profundidades de 0,00-0,15, 0,15-0,30 a 0,30-0,45 m, respectivamente, indicando a mesma tendência da RP, estando em acordo com Cunha et al.,(2002) e Bottega et al., (2011) em que a RP é altamente influenciada pela umidade do solo, em que qualquer alteração nesse último atributo pode modificar tais valores.

Os mapas bidimensionais de distribuição espacial permitem a visualização de mudanças nos valores dos atributos estudados (Figura 3). Notou-se que os maiores teores de umidade do solo para as profundidades avaliadas coincidem com os menores valores de RP. Os maiores valores de RP se apresentam na profundidade de 0,15 – 0,30 m embora a umidade do solo esteja mais elevada em relação às outras profundidades sendo esses valores de RP um impeditivo ao desenvolvimento radicular das culturas. Bergamin et al. (2010) afirmam que a compactação do solo é mais prejudicial em solo seco e em condições de maior umidade no solo pode haver crescimento radicular em valores de resistência mecânica do solo à penetração, superiores a 4,0Mpa; esses valores podem ser um indicativo de que, nesta profundidade, possa apresentar pé-de-grade devido ao tráfego de trator e gradagens sucessivas na mesma profundidade.

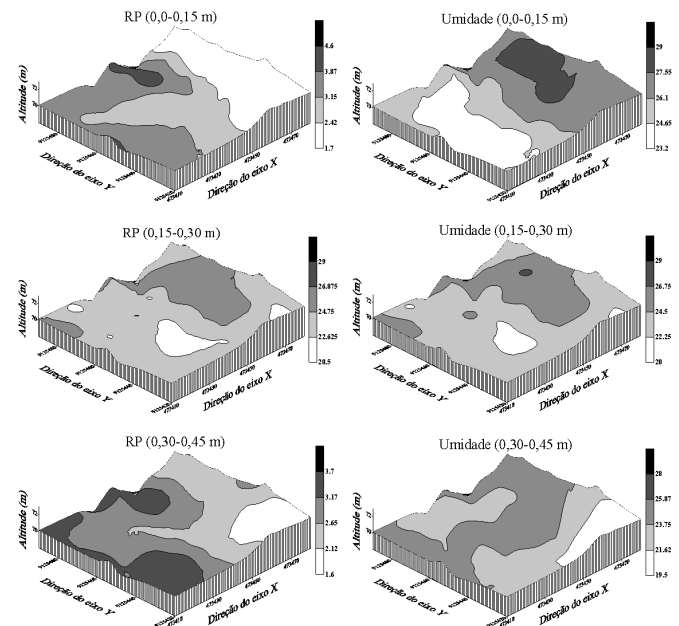


Figura 3. Mapas de krigagem dos atributos resistência mecânica do solo à penetração (RP) e umidade do solo nas profundidades de 0,00-0,15, 0,15-0,30, 0,30-0,45 m em área em cultivo de cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil

Conclusões

A presença de pé-de-grade na camada de 0,15 a 0,30m resultou em um semivariograma distinto das demais profundidades estudadas.

Todas as variáveis em estudo apresentaram dependência espacial e o alcance sinalizou valores maiores que os estipulados pela malha amostral.

ARP e a umidade do solo apresentaram relação espacial em que os menores valores de RP se concentravam nos maiores valores de umidade do solo.

Agradecimento

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) pelo financiamento da pesquisa.

Literatura Citada

- Abreu, S. L.; Reichert, J. M.; Silva, V. R.; Reinert, D. J.; Blume, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. *Ciência Rural*, v.33, n.2, p.275-282, 2003. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782003000200015>>. 05 Nov. 2012.
- Arshad, M. A.; Lowery, B.; Grossman, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: Doran, J.W.; Jones, A.J. (Org.). *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America, p.123-141. 1996.
- Bergamin, A. C.; Vitorino, A. C. T.; Franchini, J. C.; Souza, C. M. A.; Souza, F. R. Compactação em um Latossolo Vermelho Distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, n.3, p.681-691, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300009>>. 05 Nov. 2012.
- Bottega, E. L.; Bottega, S. P.; Silva, S. A.; Queiroz, D. M.; Souza, C. M. A.; Rafull, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* v.6, n.2, p.331-336, 2011. <<http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v6i2a882>>. 05 Nov. 2012.
- Cajazeira, J. P.; Assis Júnior, R. N. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um Argissolo no Estado do Ceará. *Revista Ciência Agronômica*, v.42, n.2, p.258-267, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902011000200002>>. 05 Nov. 2012.
- Camargo, O. A. Compactação do solo e desenvolvimento de plantas. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 44p.
- Camargo, O. A.; Alleoni, L. R. F. Compactação do solo e desenvolvimento das plantas. Piracicaba, 1997. 132p.
- 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 Science Society of America Journal*, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994. <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>>. 05 Nov. 2012.
- Campos, M. C. C.; Oliveira, I. A.; Santos, L. A. C.; Aquino, R. E.; Soares, M. D. R.; Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá, AM. *Revista Agro@mbiente Online*, v.6, n.1, p.9-16, 2012. <<http://revista.ufrir.br/index.php/agroambiente/article/view/689>>. 05 Nov. 2012.
- Carvalho, L. A.; Neto, V. J. M.; Silva, L. F.; Pereira, J. G.; Nunes, W. A. G. A.; Chaves, C. H. C. Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brillhante-MS. *Agrarian*, v.1, n.2, p.7-22, 2008. <<http://www.periodicos.ufgd.edu.br/index.php/agrarian/article/viewArticle/249>>. 05 Nov. 2012.
- Cunha, J. P. A. R.; Vieira, L. B.; Magalhães, A. C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. *Engenharia na Agricultura*, v.10, n.1, p.1-7, 2002. <<http://www.ufv.br/dea/reveng/arquivos/Vol10/v10n1-4p01-07.pdf>>. 05 Nov. 2012.
- Dalchiavon, F. C.; Carvalho, M. P.; Nogueira, D. C.; Romano, D.; Abrantes, F. L.; Assis, J. T.; Oliveira, M. S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.41, n.1, p.8-19, 2011. <<http://dx.doi.org/10.5216/pat.v41i1.8351>>. 05 Nov. 2012.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa-SPI, 2006. 306p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212p.
- Golden Software. Surfer 8.0. Surface Mapping System. New York: Golden Software, 2002.
- Gonçalves, A. C. A.; Folegatti, M. V.; Mata, J. D. V. da. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.23, n.5, p.1149-1157, 2001. <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/2570/2056>>. 05 Nov. 2012.
- Isaaks, E. H.; Srivastava, R. M. An introduction to applied geostatistics. Oxford: Oxford University Press, 1989. 561p.
- Johnson, R. M.; Richard Junior, E. P. Sugarcane yield, sugarcane quality, and soil variability in Louisiana. *Agronomy Journal*, v.97, n.3, p.760-771, 2005. <<http://dx.doi.org/10.2134/agronj2004.0184>>. 05 Nov. 2012.
- Marasca, I.; Oliveira, C. A. A.; Guimarães, E. C.; Cunha, J. P. A. R.; Assis, R. L.; Perin, A.; Menezes, L. A. S. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e teor de água em sistema de plantio direto, na cultura da soja. *Bioscience Journal*, v.27, n.2, p.239-246, 2011. <<http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7128>>. 05 Nov. 2012.
- Mcbratney, A. B.; Webster, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science*, v.37, n.4, p.617-639, 1986. <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1986.tb00392.x>>. 05 Nov. 2012.
- Mercante, E. Uribe-Opazo, M. A.; Souza, E. G. Variabilidade especial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, n.6, p.1149-1159, 2003. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000600019>>. 05 Nov. 2012.
- Montanari, R.; Zambianco, E. C.; Corrêa, A. R.; Pellin, D. M. P.; Carvalho, M. P.; Dalchiavon, F. C. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho correlacionados linear e espacialmente com a consorciação de guandu com milheto. *Revista Ceres*, v.59, n.1, p.125-135, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2012000100018>>. 05 Nov. 2012.
- Ramirez-Lopez, L.; Reina-Sanchez, A.; Camacho-Tamayo, J. H. Variabilidad espacial de atributos físicos de um Typic Haplustox de los Llanos Orientales de Colômbia. *Engenharia Agrícola*, v.28, n.1, p.55-63, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162008000100006>>. 05 Nov. 2012.

- Robertson, G. P. GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152p.
- Roque, A. A. O.; Souza, Z. M.; Barbosa, R. S.; Souza, G. S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.45, n.7, p.744-750, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2010000700016>>. 05 Nov. 2012.
- Schlotzhaver, S. D.; Littell, R. C. SAS: system for elementary statistical analysis. 2. ed. Cary: SAS, 1997. 905p.
- Siqueira, G. M.; Vieira, S. R.; Ceddia, M. B. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. *Bragantia*, v.67, p.203-211, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052008000100025>>. 05 Nov. 2012.
- 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, p.48-56, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-847820090005000243>>. 05 Nov. 2012.
- Souza, Z. M.; Campos, M. C. C.; Cavalcante, Í. H. L.; Marques Júnior, J.; Cesarin, L. G.; Souza, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, v.36, n.1, p.128-134, 2006. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782006000100019>>. 05 Nov. 2012.
- 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. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, n.3, p.699-707, 2001. <<http://sbcs.solos.ufv.br/solos/revistas/v25n3a19.pdf>>. 05 Nov. 2012.
- Stolf, R.; Fernandes, J.; Furlani Neto, V. L. Recomendação para uso do penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar – Stolf. São Paulo: MIC/IAA/PNMCA – Planalsucar, 1983. 8p. (Série Penetrômetro de Impacto. Boletim, 1)
- Stolf, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.15, n.2, p.229-235, 1991.
- Tavares Filho, J.; Ribon, A. A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, n.2, p.487-494, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000200003>>. 05 Nov. 2012.
- Tormena, C. A.; Roloff, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.20, n.2, p.333-339, 1996.
- Trangmar, B. B.; Yost, R.S.; Uehara, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, v.38, p.45-93, 1985. <[http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60673-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60673-2)>. 05 Nov. 2012.
- Utset, A.; Cid, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a ferral soil at several soil moisture conditions. *Soil & Tillage Research*, v.61, n.3-4, p.193-202, 2001. <[http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00204-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00204-5)>. 05 Nov. 2012.
- 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.
- Watanabe, S. H.; Tormena, C. A.; Araujo, M. A.; Vidigal Filho, P. S.; Pinto, J. C.; Costa, A. C. S.; Muniz, A. S. Propriedades físicas de um latossolo vermelho distrófico influenciadas por sistema de preparo de solo utilizados para implantação da cultura da mandioca. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.24, n.5, p.1255-1264, 2002. <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/2277/1775>>. 05 Nov. 2012.
- Weirich Neto, P. H.; Buzolini Junior, O.; Rocha, J. V.; Borghi, E.; Sverzut, C. B. Um estudo da variabilidade espacial do conteúdo de areia do solo, utilizando diferentes métodos de interpolação. *Ciências Exatas e da Terra, Agrárias e Engenharias*, v.12, n.1, p.41-49, 2006. <<http://www.revistas2.uepg.br/index.php/exatas/article/view/863>>. 05 Nov. 2012.