

# Distribuição espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo em uma área de agrofloresta na região de Humaitá, AM

Milton César Costa Campos\*, Marcelo Dayron Rodrigues Soares, Renato Eleoterio Aquino, Luiz Antonio Coutrin Santos, Bruno Campos Mantovanelli<sup>1</sup>

Universidade Federal do Amazonas, Humaitá, AM, Brasil  
\*Autor correspondente, e-mail: mcesarsolos@gmail.com

## Resumo

Os sistemas agroflorestais constituem uma alternativa de produção agropecuária que minimiza o efeito da intervenção humana sobre o ambiente. Por outro lado, o cultivo intensivo e a utilização de máquinas e equipamentos pesados promovem a compactação do solo. Assim o objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração (RP) e do conteúdo de água no solo em diferentes profundidades em uma área de agrofloresta. O experimento foi instalado em um Argissolo Vermelho Distrófico. Os pontos de coleta das amostras foram estabelecidos por meio de uma malha de 70 x 70 m, amostrando-se nos pontos de cruzamento da malha, com espaçamentos regulares de 10 em 10 m. A resistência do solo à penetração (RP) e o conteúdo de água no solo foram avaliados nas profundidades de 0,0–0,15, 0,15–0,30 e 0,30–0,45 m. Os dados foram submetidos a análises estatísticas descritivas e geoestatística. A resistência do solo a penetração (RP) e o conteúdo de água no solo apresentaram dependência espacial em todas as profundidades estudadas. O grau de dependência espacial foi classificado como moderado para todas as profundidades estudadas. O conteúdo de água no solo e a (RP) apresentaram valores de alcances maiores que o espaçamento da malha, variando entre 17 a 70 m.

**Palavras-chave** - atributos físicos, argissolo, geoestatística

## Spatial distribution of resistance to penetration of soil and water content of soil in an area of the agroforestry Humaitá, AM region

## Abstract

Agroforestry systems are an alternative agricultural production that minimizes the effect of human intervention on the environment. Moreover, the intensive culture and the use of machines and equipment promote soil compaction. Thus the aim of this study was to evaluate the spatial variability of soil resistance to penetration (RP) and the water content in the soil at different depths in an area of agroforestry. The experiment was conducted in a Ultisol. The sample collection points were established through a mesh of 70 x 70 m, being sampled at the crossing points of the grid with regular spacing of 10 by 10 m. The resistance to penetration (RP) and soil water content were evaluated at depths of 0.0 to 0.15, 0.15 to 0.30 and from 0.30 to 0.45 m. The data were analyzed by descriptive statistics and geostatistics. The resistance to penetration (RP) and the water content in the soil have spatial dependence at all depths studied. The degree of spatial dependence was classified as moderate for all depths studied. The water content in soil and (RP) had values of greater range than the spacing of the mesh, ranging from 17.00 to 70.00 m.

**Keywords:** geostatistics, physical attributes, ultisol

**Recebido:** 24 Novembro 2012  
**Aceito:** 12 Maio 2014

## Introdução

Os sistemas agroflorestais são formas de uso e manejo da terra nas quais árvores ou arbustos são utilizados em associação com cultivos agrícolas e, ou, com animais, numa mesma área, de maneira simultânea ou numa sequência temporal (NAIR, 1993). Uma das vantagens mais conhecidas da agrofloresta é o seu potencial de conservar o solo, manter sua fertilidade e, conseqüentemente, a produtividade. Além de constituir uma alternativa de produção agropecuária que minimiza o efeito da intervenção humana, conforme destaca Baggio (1992).

Por outro lado, um dos atributos físicos que tem sido utilizado para detectar a compactação do solo é a resistência do solo à penetração (RP) por apresentar relação direta com o desenvolvimento das plantas e por ser mais eficiente na identificação de estados de compactação quando comparado à densidade do solo (SILVA et al., 2003). De acordo com Freddi et al. (2006) a RP tem correlação inversa com o crescimento radicular e é eficiente na identificação da compactação quando acompanhada da umidade do solo.

Entretanto o conhecimento da condição inicial do solo é fundamental no planejamento da produção agrícola. Assim, tanto a variabilidade espacial quanto a variabilidade temporal dos atributos do solo devem ser incorporadas aos procedimentos e tecnologias aplicados à agricultura (LI et al., 2002). Dentre essas tecnologias, destaca-se o uso de técnicas geoestatística, que permite detectar o comportamento e distribuição dos atributos do solo (SILVA et al., 2008), tendo por base a estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados considerando a interdependência espacial de variáveis dentro do intervalo de amostragem (CASSEL et al., 2000).

Para Vieira (2002) e Carvalho et al. (2002) a análise geoestatística constitui importante ferramenta na análise e descrição da variabilidade dos atributos do solo, pois permitem mostrar a influência das características intrínsecas do solo, bem como aquelas oriundas do uso e manejo no solo. Com base nestas informações, o objetivo deste trabalho foi avaliar

a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e conteúdo de água no solo em uma área de agrofloresta na região de Humaitá, AM.

## Materiais e Métodos

A área de estudo localiza-se na região de Humaitá, sul do Estado do Amazonas, situada nas coordenadas geográficas de "7° 30' 24" S e 63° 04'56" W. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical chuvoso (chuvas do tipo monção), apresentando um período seco de pequena duração (AM). As temperaturas estão entre 25 e 27 °C. O período chuvoso inicia-se em outubro, prolongando-se até junho, sendo a precipitação média de 2.500 mm. A umidade relativa do ar varia de 85 a 90%.

A região apresenta relevo aproximado ao do tipo "tabuleiro", com desníveis muito pequenos e bordos ligeiramente abaulados. Esses terraços fluviais antigos constituem os divisores de água entre os pequenos igarapés da região. A vegetação é caracterizada por contato entre Campos e Florestas, caracterizada por vegetação gramíneo-lenhosa baixa e se alterna com pequenas árvores isoladas e galerias florestais ao longo dos rios (BRAUN e RAMOS, 1959).

A geologia da área estudada é formada por aluviões antigos indiferenciados referidos ao Holoceno. Os sedimentos desta formação são advindos de dois ciclos de sedimentação: a) bancos arenosos, inferiores, que representam a sedimentação plúvio-fluvial e b) sedimentos argilosos superiores, indicando sedimentação lacustre (BRAUN e RAMOS 1959).

O experimento foi instalado em um Argissolo Vermelho Alítico plíntico (CAMPOS, et al. 2012), sob manejo agroflorestal, com aproximadamente 17 anos cultivada com espécies frutíferas amazônicas (cupuaçu, cacau, açaí, bacaba, manga e etc.). Nesta área foi estabelecida uma malha de 70 x 70 m, o solo foi amostrado nos pontos de cruzamento desta malha, com espaçamentos regulares de 10 em 10 m, totalizando 64 pontos amostrais nas profundidades de 0,0-0,15; 0,15-0,30 e 0,30-0,45 m, num total de 192 amostras. Os

pontos amostrados foram georreferenciados com equipamento de GPS Garmin Etrex, com acurácia de 2,00 m (South American '69).

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

$$R = \frac{Mg + mg + \left( \frac{M}{M+m} * \frac{Mg * h}{x} \right)}{A} \quad (1)$$

sendo:

R = resistência do solo à penetração, kgf cm<sup>-2</sup> (kgf cm<sup>-2</sup> 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 por impacto;

A = área do cone, 1,29 cm<sup>2</sup>.

Primeiramente, a variabilidade do solo foi avaliada pela análise exploratória dos dados, calculando-se a média, mediana, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose e teste de normalidade. A hipótese de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov Surfer (GOLDEN SOFTWARE INC., 1999).

Para a caracterização da variabilidade espacial utilizou-se a análise geoestatística (VIEIRA et al., 1983; ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989). Sob a teoria da hipótese intrínseca o semivariograma experimental foi estimado pela Equação:

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

sendo:

$\gamma(h)$  - valor da semivariância para uma distância h;

N(h) - número de pares envolvidos no cálculo da

semivariância;

Z(xi) - valor do atributo Z na posição xi;

Z(xi+h) - valor do atributo Z separado por uma distância h da posição xi.

Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de  $\gamma(h)$  são definidos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma: o efeito pepita,  $C_0$ ; patamar,  $C_0 + C_1$ ; e o alcance, a; coeficiente de correlação ( $r^2$ ). O efeito pepita é o valor da semivariância para distância zero e representa o componente da variação ao acaso; o patamar é o valor da semivariância em que a curva estabiliza sobre um valor constante; o alcance é a distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, expressando a distância além da qual as amostras não são correlacionadas (VIEIRA et al., 1983).

Na determinação da existência ou não da dependência espacial, utilizou-se o exame de semivariogramas, por meio do programa GS\* (ROBERTSON, 1998). Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo variograma, considerou-se o melhor  $r^2$  (coeficiente de determinação). Na elaboração dos mapas de distribuição espacial das variáveis foi utilizado o programa Surfer (GOLDEN SOFTWARE INC., 1999).

#### Resultados e Discussão

Os valores médios de RP nas profundidades de 0,00-0,15, 0,15-0,30 e 0,30-0,45 m, foram de 1,08; 1,83; 2,10 MPa; respectivamente (Tabela 1). Estes valores foram inferiores ao limite crítico utilizado de 2,0 MPa (SERAFIM et al., 2007), com exceção para profundidade de 0,30-0,45m, que apresentou valor de 2,10 MPa. Silva et al. (2002) definem o valor de 2 MPa de impedância mecânica do solo como restritivo ao crescimento radicular, contudo, os autores relatam que é necessário relacionar a resistência mecânica do solo à penetração com a aeração e com o potencial matricial de água do solo, para melhor compreender as restrições causadas pela compactação.

Segundo (COLLARES et al., 2008) afirmam que a resistência do solo à penetração (RP) está relacionada à umidade do solo e aumenta à medida em que o teor de água diminui. Da mesma maneira, Streck et al. (2004) afirmam que a compactação do solo eleva

valores de densidade do solo e aumenta resistência à penetração do solo. De acordo com Hamza & Anderson (2005) a principal causa da compactação do solo é a intensificação do tráfego excessivo anteriormente na área.

Os valores da média e mediana para RP nas profundidades 0,0-0,15; 0,15-0,30 e 0,30-0,45 m e conteúdo de água estão próximos, o que também refletiu nos valores de assimetria e de curtose, com exceção para RP na profundidade de 0,0-0,15m e conteúdo de água, os quais

se distanciaram do valor de referência zero, o que indica que a distribuição apresenta-se com leve afastamento da normal (Tabela 1). O valor médio da RP apresentou-se crescente em profundidade, segundo Borges et al. (2004) esse aumento mais acentuado da RP nas camadas mais profundas deve-se possivelmente à pressão das camadas superficiais sobre as subjacentes e à própria pressão exercida pela passagem de máquinas utilizadas nas operações de preparo.

**Tabela 1.** Estatística descritiva para os atributos resistência do solo à penetração (MPa) nas profundidades de 0,00-0,15, 0,15-0,30 e 0,30-0,45 m e conteúdo de água do solo ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) em uma área de agrofloresta na região de Humaitá, AM

Estatística	Resistência do solo à penetração			Conteúdo de água
	0,00-0,15	0,15-0,30	0,30-0,45	
Média	1,08	1,83	2,10	30,91
Mediana	1,00	1,74	2,05	30,22
Mínimo	0,67	0,67	0,67	26,37
Máximo	3,25	3,25	3,25	50,65
Assimetria	4,32	0,81	-0,14	2,63
Curtose	24,82	1,69	0,41	12,79
DP	0,34	0,44	0,54	3,62
Variância	0,11	0,19	0,29	13,14
CV (%)	31,63	24,16	25,86	11,72
d <sup>1</sup>	0,23*	0,10*	0,07*	0,11*

d<sup>1</sup> = \*significativo a 5% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov.

Verificou-se normalidade para o conteúdo de água no solo em todas as profundidades e resistência do solo à penetração nas profundidades de 0,00-0,15m e 0,15-0,30 m (Tabela 1). Apesar da normalidade dos dados não ser uma exigência da geoestatística, é importante que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as estimativas da krigagem, as quais são baseadas nos valores médios (ISAACS e SRIVASTAVA, 1989).

Os coeficientes de variação (CV), proposto por Warrick e Nielsen (1980) da RP para as camadas de profundidades foram relativamente elevados. Para o conteúdo de água foi baixo (Tabela 1). Estes comportamento de RP, estão de acordo com resultados obtidos por Souza et al. (2001) e Souza et al. (2006). O coeficiente de variação do conteúdo de água foi semelhante aos obtidos por Marasca et al. (2011) e Grego e Vieira (2005).

Os resultados da análise geoestatística da RP e conteúdo de água (Tabela 2 e Figura

1) mostraram que todos os atributos estudados apresentaram dependência espacial, os quais são expressos por meio dos modelos de semivariogramas. Observou-se para RP e conteúdo de água no solo o ajuste ao modelo esférico em todas as profundidades estudadas, semelhantemente ao trabalho realizado por Souza et al. (2006) em estudo de resistência do solo à penetração e teor de água do solo em área sob cultivo de cana-de-açúcar. Segundo McBratney e Webster (1986) os modelos esférico e exponencial são mais comuns estudos dos atributos do solo.

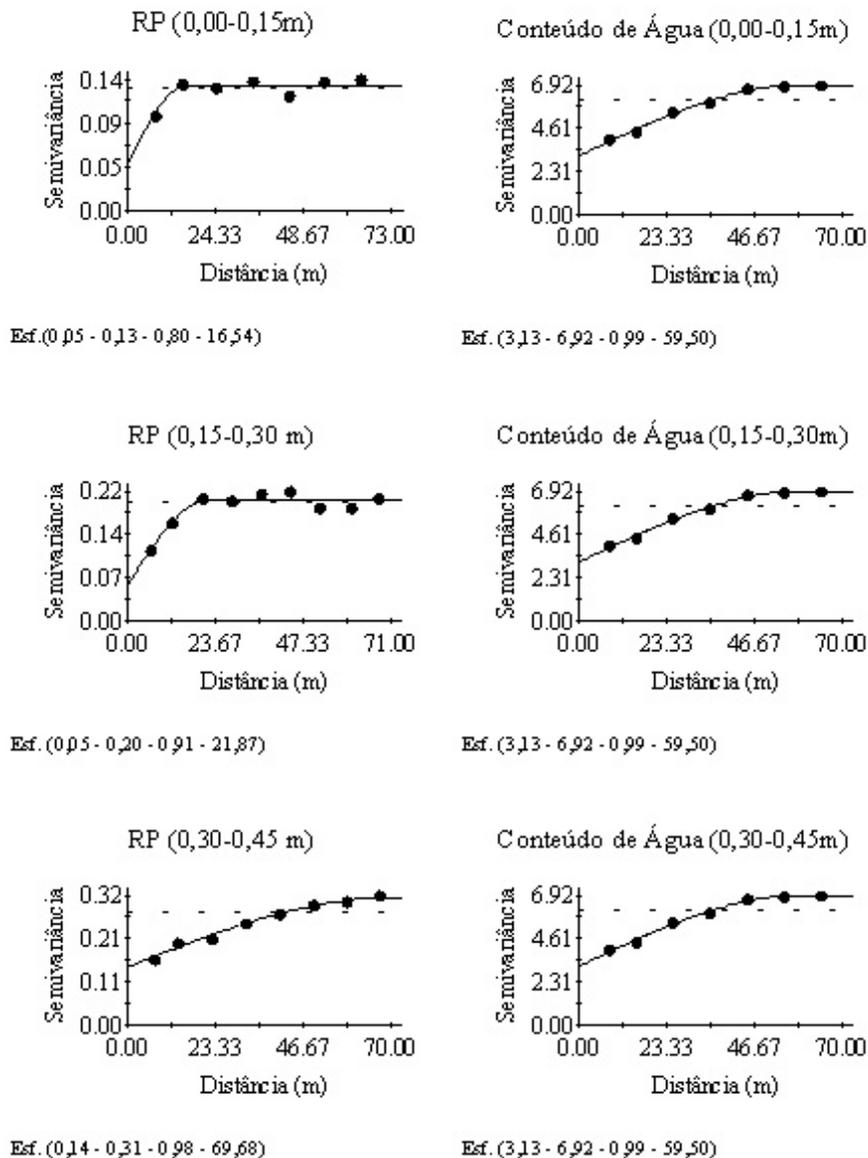
A avaliação da RP e conteúdo de água do solo não apresentaram efeito pepita puro ( $C_0$ ) (Tabela 2 e Figura 1), que é produto de uma distribuição aleatória dos dados, podendo ser causada por erros de medições ou variações dos atributos que não podem ser detectadas na escala de amostragem (SOUZA et al. 2009). De acordo com Vieira (2000) o efeito pepita é um parâmetro importante do semivariograma e indica variabilidade não explicada,

considerando a distância de amostragem utilizada.

**Tabela 2.** Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais dos atributos RP (MPa) e conteúdo de água no solo ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) nas profundidades de 0,00-0,15, 0,15-0,30 e 0,30-0,45 m em uma área de agrofloresta na região de Humaitá, AM

Estatística	Resistência do solo à penetração			Conteúdo de água		
	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
Modelo	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.
Efeito pepita ( $C_0$ )	0,05	0,05	0,14	3,13	3,13	3,13
Patamar ( $C_0+C_1$ )	0,13	0,20	0,31	6,92	6,92	6,92
Alcance (a)	16,64	21,87	69,68	59,50	59,50	59,50
$^1[C_0/(C_0+C_1)] \times 100$	62,00	70,00	54,00	54,00	54,00	54,00
$^2R^2$	0,80	0,91	0,98	0,99	0,99	0,99

$^1[C_0/(C_0+C_1)] \times 100$  = grau de dependência espacial;  $^2R^2$  = coeficiente de determinação; Esf. = esférico; Exp. = Exponencial.



**Figura 1.** Semivariogramas da resistência do solo à penetração (RP) e conteúdo de água no solo nas profundidades de 0,00-0,15, 0,15-0,30, 0,30-0,45 m em uma área de agrofloresta na região de Humaitá, AM. Esf. = Modelo Esférico; Exp = Modelo Exponencial;  $C_0$  = efeito pepita;  $C_0/(C_0+C_1)$  = dependência espacial;  $r^2$  = coeficiente de determinação; a = alcance.

Na análise do grau de dependência espacial das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), onde valores de  $[(C_0/(C_0+C_1))$  menores que 25% são considerados dependência espacial forte, valores de  $[(C_0/(C_0+C_1))$  entre 25 e 75 %] indicam dependência espacial moderada e valores de  $[(C_0/(C_0+C_1))$  maiores que 75% significam dependência espacial fraca. A análise da relação  $[(C_0/(C_0+C_1))$  mostrou que, para todas as variáveis estudadas, constatou-se que o grau de dependência espacial é considerado moderado. Estes resultados são semelhantes aos verificados no trabalho de Grego e Vieira (2005), no qual a resistência média à penetração apresentou variabilidade espacial com razão de dependência moderada para a camada superficial de 0 - 25 cm de profundidade.

O alcance (a) indica a distância (m) limite entre pontos correlacionados entre si. Observou-se que todos os valores de alcance (a) foram maiores do que foi estabelecido pela malha (Tabela 2 e Figura 1). Este fato indica, assim, maior continuidade na distribuição espacial da RP e conteúdo de água evidenciando que as amostras estão espacialmente correlacionadas. Os valores de alcance (a) variam entre aos atributos estudados, atingindo maior valor para RP na profundidade de 0,30-0,45 m, que foi 70 m e com menor valor na RP na profundidade de 0,00-0,15 m, que foi 17 m. Baixos valores de alcance podem influenciar negativamente na qualidade das estimativas uma vez que poucos pontos são usados para realização da interpolação na estimativa de valores em locais não medidos (CORÁ et al., 2004).

Para todas as variáveis estudadas, os coeficientes de correlação de ajuste do semivariograma (r) revelam um bom ajuste, sendo estes acima de 0,90, com exceção para o RP na profundidade de 0,00-0,15 m que apresentou o r de 0,80. Ou seja, no mínimo, 80% da variabilidade existente nos valores da semivariância estimada são explicadas pelos modelos ajustados (CAMPOS et al., 2007).

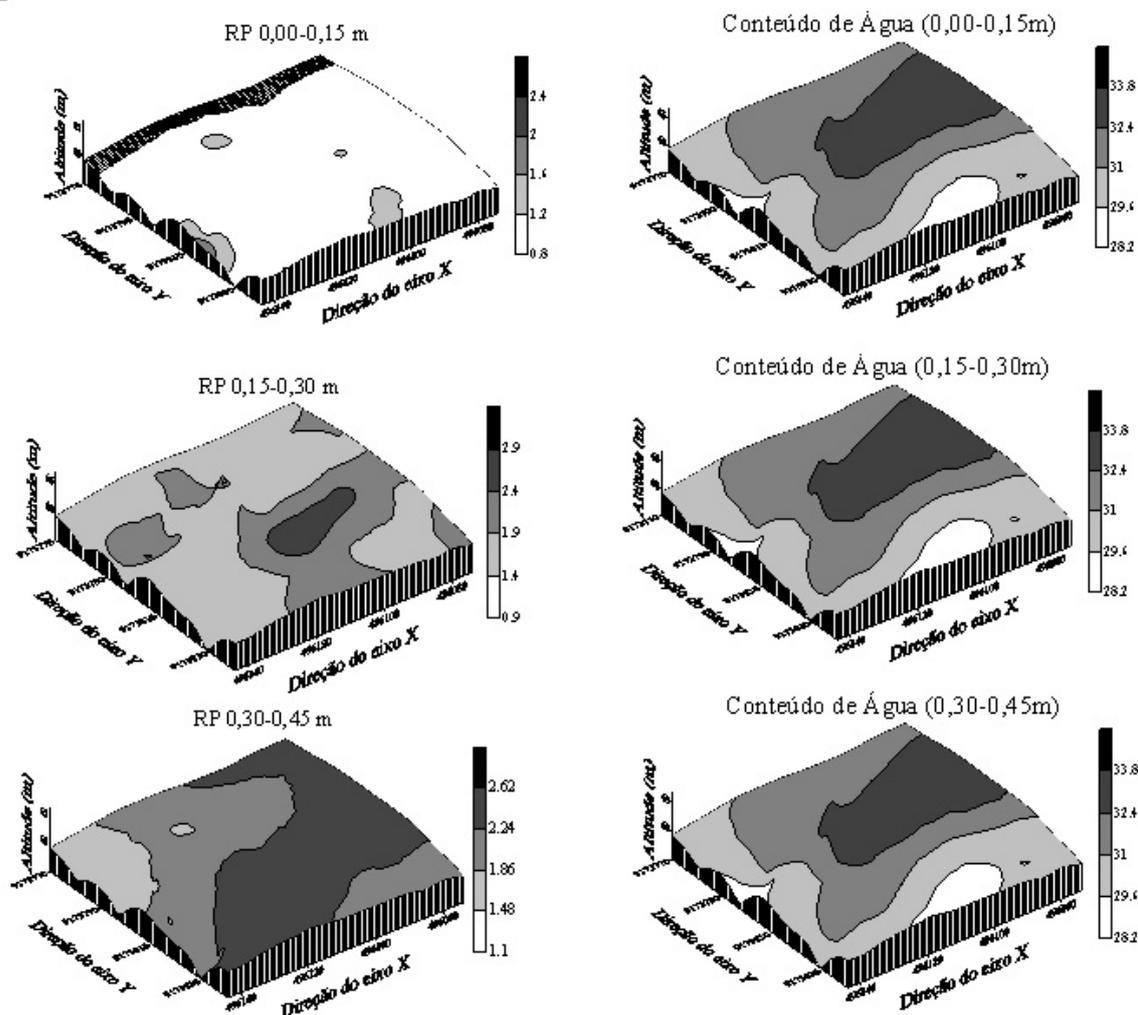
Os mapas de krigagem dos atributos RP e conteúdo de água no solo são representados na Figura 2. Analisando as informações entre os valores de RP e conteúdo de água no solo,

verifica-se que houve correlação entre os valores, quando comparados entre si, os maiores valores de RP são observados onde ocorrem os menores valores de umidade do solo nas profundidades estudadas. Os maiores valores de resistência do solo à penetração ocorreram por ocasião dos menores teores de água no solo, tendendo a um decréscimo linear com o aumento do teor de água (CAMPOS et al., 2012). É válido lembrar que a quantidade de água existente no solo está intimamente ligada aos valores de resistência à penetração, e qualquer alteração neste último fator pode modificar tais valores.

### Conclusões

A resistência do solo à penetração (RP) e o conteúdo de água no solo apresentaram dependência espacial em todas as profundidades estudadas. O grau de dependência espacial foi classificado como moderado para todas as profundidades.

O conteúdo de água no solo e a RP apresentaram valores de alcances maiores que o espaçamento da malha, variando entre 17 a 70 m.



**Figura 2.** Mapas de krigagem da resistência do solo à penetração (RP) e conteúdo de água no solo nas profundidades de 0,00-0,15, 0,15-0,30, 0,30-0,45 m em uma área de agrofloresta na região de Humaitá, AM.

### Referências

- Balastreire, L.A. 2002. Avanços na agricultura de precisão no Brasil no período de 1999 – 2001. Piracicaba: Edusp.
- Baggio, A.J. 1992. Alternativas agroflorestais para recuperação de solos degradados na região Sul do País. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 1992, Curitiba: Fundação Florestais de Paraná 1:126-131.
- Borges, J.R., Pauletto, E.A., Sousa, R.O., Pinto, L.F.S., Leitzke, V.W. 2004. Resistência à penetração de um gleissolo submetido a sistemas de cultivo e culturas. *Revista Brasileira de Agrociência* 10:83-86.
- Braun, E.H.G., Ramos, J.R.A. 1959. Estudo agroecológico dos campos Puciarí-Humaitá (Estado do Amazonas e Território Federal de Rondônia). *Revista Brasileira de Geografia* 21:443-497.
- Cambardella, C.A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T.B., Karlen, D.L.; Turco, R. F., Konopka, A. E. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. *Soil Science Society of American Journal* 58:1501-1511.
- Campos, M.C.C., Marques Júnior, J., Pereira, G.T., Montanari, R., Siqueira, D.S. 2007. Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. *Revista Ciência Agrônômica* 38:149-157.
- Campos, M.C.C., Oliveira, I. A., Santos, L.A.C., Aquino, R.E., Soares, M.D.R. 2012. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá AM. *Agro@ambiente Online* 6:09-16.
- Carvalho, J.R.P., Silveira, P.M., Vieira, S.R. 2002. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 37:1151-1159.
- Cassel, D.K.; Wendroth, O.; Nielsen, D.R. 2000.

- Assessing spatial variability in an agricultural experiment station field: opportunities arising from spatial dependence. *Agronomy Journal* 92:706-714.
- Collares, G.L., Reinert, D.J., Reichert, J.M., Kaiser, D.R. 2008. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32:933-942.
- Corá, J.E., Araujo, A.V., Pereira, G.T., Beraldo, J.M.G. 2004. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 28:1013-1021.
- EMBRAPA. 1997. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 212p.
- Freddi, O.S., Carvalho, M.P., Veronesi Júnior, V., Carvalho, G.J. 2006. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. *Engenharia Agrícola* 26:113-121.
- Golden Software Inc. 1999. (Golden, Estados Unidos). SURFER for Windows: release 7.0: contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers, user's guide. New York, 619p.
- Grego, R.G., Vieira, S.R. 2005. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 29:169-177.
- Hamza, M.A.; Anderson, W.K. 2005. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research* 82:121-145.
- Isaaks, E. H., Srivastava, R. M. 1989. An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University Press, 561p.
- Li, H., Lascano, R.J., Booker, J., Wilson, L.T., Bronson, K.F., Segarra, E. 2002. State-space description of heterogeneity: water and nitrogen use in cotton. *Soil Science Society of America Journal* 66:585-595.
- Marasca, I., Oliveira, C.A.A., Guimarães, E.C., Cunha, J.P.A.R., Assis, R.L., Perin, A. Menezes, L.A.S. 2011. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e teor de água em sistema de plantio direto, na cultura da soja. *Bioscience Journal* 27:239-246.
- Mcbratney, A.B., WEBSTER, R. 1986. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science*. 37:617-639.
- Nair, P.K.R. 1993. An introduction to agroforestry. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers / ICRAF. 499 p.
- Robertson, G.P. 1998. GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide. Plainwell: Gamma Design Software, 152p.
- Serafim, M.E. 2007. Desenvolvimento de um penetrógrafo de bancada visando a determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em diferentes sistemas de produção. 79p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Grande Dourados.
- Silva, A.P., Tormena, C.A., Imhoff, S. 2002. Intervalo hídrico ótimo. In: Moraes, M.H.; Müller, M.M.L., Foloni, J.S.S. Qualidade física do solo: métodos de estudo-sistemas de preparo e manejo do solo. Jaboticabal: Funep, p. 1-18.
- Silva, E.A.A., Uribe-Opazo, M.A., Rocha, J.V., Souza, E.G. 2003. Um estimador robusto e o semivariograma cruzado na análise de variabilidade espacial de atributos do solo e planta. *Acta Scientiarum* 25:365-371.
- Silva, J.M., Lima, J.S.S., Pires, F.R., Assis, R.L. 2008. Variabilidade espacial dos atributos físicos em um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no cultivo da soja no cerrado. *Revista de Ciências Agrárias* 50:167-180.
- Souza, Z.M., Campos, M.C.C., Cavalcante, Í.H.L., Marques Júnior, J., Cesarin, L.G., De Souza, S.R. 2006. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Ciência Rural* 36:128-134.
- Souza, Z.M., Marques Júnior, J., Pereira G.T. 2009. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. *Ciência Rural* 40:48-56.
- Souza, Z.M., Silva, M.L.S., Guimarães, G.L., Campos, D.T.S., Carvalho, M.P., Pereira, G.T. 2001. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta em Selvíria, MS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 25:699-707.
- Stolf, R. 1991. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 1:229-235.
- Streck, C.A., Reinert, D.J., Reichert, J.M., Kaiser, D.R. 2004. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. *Ciência Rural* 34:755-760.
- Vieira, S.R. 2000. Geoestatística em estudo da

variabilidade espacial do solo. In: Novais, R.F., Alvarez V., V.H., Schaefer, C.E.G.R. (Ed.) Tópicos ciência do solo. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo v.1. 2000. Cap. 1, p.1-54.

Vieira, S. R. 2002. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R.F., Alvarez V., V.H., Schaefer, C.E.G. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo 1:1-54.

Vieira, S.R., Hatfield, J.L., Nielsen, D.R., Biggar, J.W. 1983. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. Hilgardia 51:1-75.

Warrick, A.W., Nielsen, D.R. 1990. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). Applications of soil physics. New York: Academic, 319-344.