

## Geoestatística para o mapeamento da variabilidade espacial de atributos do solo em sistemas de manejo do solo na Amazônia brasileira

*Geo-statistics for the mapping of spatial variability of soil attributes in soil management systems in the Brazilian Amazon*

*Alexsandro Leal Silva<sup>1</sup>, Daiane de Cinque Mariano<sup>2</sup>, Ângelo Augusto Ebling<sup>3</sup>, Cândido Ferreira de Oliveira Neto<sup>3</sup>, Ismael de Jesus Matos Viégas<sup>3</sup>, Ricardo Shigueru Okumura<sup>3</sup>*

**RESUMO:** A geoestatística é capaz de auxiliar as estratégias de manejo e melhorar a eficiência no processo de produção e redução dos impactos ambientais. Nesse sentido, a hipótese do estudo consiste na existência de dependência espacial dos atributos do solo nos sistemas de manejo do solo. O objetivo do estudo foi caracterizar a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, à umidade gravimétrica e à acidez ativa nos sistemas de manejo do solo na Amazônia brasileira. O experimento foi conduzido em área experimental em Parauapebas, região Sudeste do Pará, foram selecionados quatro sistemas de manejo: mata nativa (MN), sistema de plantio direto (SPD), sistema de plantio convencional (SPC) e pastagem (PAS). Foi estabelecida uma malha amostral de 200 m x 100 m, com espaçamento de 25 m x 40 m, perfazendo um total de 30 pontos amostrais por sistema de manejo. Foram avaliadas a resistência do solo à penetração (RP) e umidade gravimétrica do solo (Ug%) e acidez ativa do solo (pH) nas profundidades de 0,0-0,10 m; 0,10-0,20 m; e 0,20-0,30 m. Os dados obtidos foram analisados por meio de estatística descritiva e análise geoestatística. A RP, a Ug% e a acidez ativa indicaram normalidade na distribuição dos dados, com valores do coeficiente de variação inferior a 25%. Na análise geoestatística, a RP, a Ug% e o pH apresentaram dependência espacial nos sistemas e profundidades avaliadas. Na análise dos mapas geoestatísticos verificou-se zonas específicas com padrões críticos de RP, de Ug% e de pH, o que possibilita aplicar medidas de manejo localizado para cada nível de compactação e/ou de acidez superior ao limite crítico, o que reduz os custos com práticas de manejo dos solos.

**Palavras-chave:** Agricultura de Precisão. Manejo localizado. Propriedades do solo.

**ABSTRACT:** Geo-statistics are a great help in management strategies, improves efficiency in the production process and reduces environmental impacts. Current paper works on a hypothesis which consists of spatial dependence of soil attributes on soil management systems. Study characterizes the spatial variability of soil resistance to penetration, gravimetric moisture and active acidity in soil management systems in the Brazilian Amazon. The experiment was conducted on an experimental area in Parauapebas, southeast Pará, with four management systems: native forest (MN), no-tillage system (SPD), conventional planting system (SPC) and pasture (PAS). A 200 m x 100 m sample was established, with a 25 m x 40 m spacing, totaling 30 sampling points per management system. Soil resistance to penetration (PR), soil gravimetric moisture (Ug%) and active soil acidity (pH) were evaluated at depths 0.0-0.10 m; 0.10-0.20 m; and 0.20-0.30 m. Data were analyzed by descriptive statistics and geostatistical analysis. PR, Ug% and active soil acidity were normal in data distribution, with coefficient of variation rates lower than 25%. In the geostatistical analysis, PR, Ug% and pH showed spatial dependence on systems and depths evaluated. In the analysis of geostatistical maps, specific zones with critical PR, Ug% and pH standards were verified. Localized management measures may be applied for each level of compaction and/or acidity higher than the critical limit, which reduces costs with soil management practices.

**Keywords:** Precision Agriculture. Localized management. Soil properties.

**Autor correspondente:**  
Ricardo Shigueru Okumura: ricardo.okumura@ufra.edu.br

Recebido em: 06/10/2020  
Aceito em: 26/11/2021

<sup>1</sup> Engenheiro florestal pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Brasil.

<sup>2</sup> Professora Doutora da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Brasil

<sup>3</sup> Professor Doutor da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Brasil



## INTRODUÇÃO

As alterações nos atributos físicos e químicos podem ocasionar a degradação do solo, o que interfere na capacidade das plantas em absorver água e nutrientes. Essas alterações podem ser identificadas pela adoção da agricultura de precisão, com o uso de técnicas que permitem o gerenciamento e o manejo localizado, bem como apresenta-se como uma proposta de uso mais eficiente dos insumos agrícolas, o que propicia uma série de benefícios econômicos e ambientais (ROLAS, 2004; SOUZA *et al.*, 2010).

Os atributos físicos e químicos do solo expressam grande variabilidade espacial, atribuída à variabilidade natural e à adoção de diferentes práticas de manejo (CAMARGO *et al.*, 2010). O uso de máquinas agrícolas e pisoteio de animais proporcionam deformação e compactação do solo (COLLARES *et al.*, 2008), que interferem no crescimento da raiz e na redução do teor de água no solo (MARASCA *et al.*, 2017). Dentre os atributos utilizados para avaliar a qualidade do solo, a umidade, a resistência à penetração e a acidez ativa têm sido priorizadas para avaliar sistemas de uso e manejo, por serem atributos de fácil determinação e apresentarem relação direta com o crescimento das plantas (BOTTEGA *et al.*, 2013).

A umidade do solo constitui-se numa das variáveis mais importantes nos processos de troca de água entre o solo, a planta e a atmosfera, bem como em estudos de infiltração, de drenagem, de condutividade hidráulica e de irrigação (ROSSATO *et al.*, 2004). A umidade ainda influencia na aeração, na temperatura e na resistência mecânica do solo à penetração das raízes, que, por sua vez, são afetadas pela densidade do solo e pela distribuição do tamanho de poros, o que reflete no crescimento e na produtividade dos cultivos, justificando a importância na determinação da resistência do solo à penetração associada com o controle da umidade (CORADO NETO *et al.*, 2015).

O potencial hidrogeniônico (pH) permite a determinação direta da acidez ativa do solo, em que valores de pH entre 5,0 e 6,5 são ideais para a maioria das culturas agrícolas, devido à disponibilidade de macro e micronutrientes e ausência e/ou baixa concentração de elementos tóxicos (DALCHIAVON *et al.*, 2017). O pH do solo é influenciado por fatores que se originam desde a formação, pela remoção de colóides e pela lixiviação de nutrientes básicos, que podem ser substituídos por elementos acidificantes como o hidrogênio, manganês e alumínio, o que torna o solo mais ácido e com menor disponibilidade de cálcio, magnésio e potássio (LEPSCH, 2011).

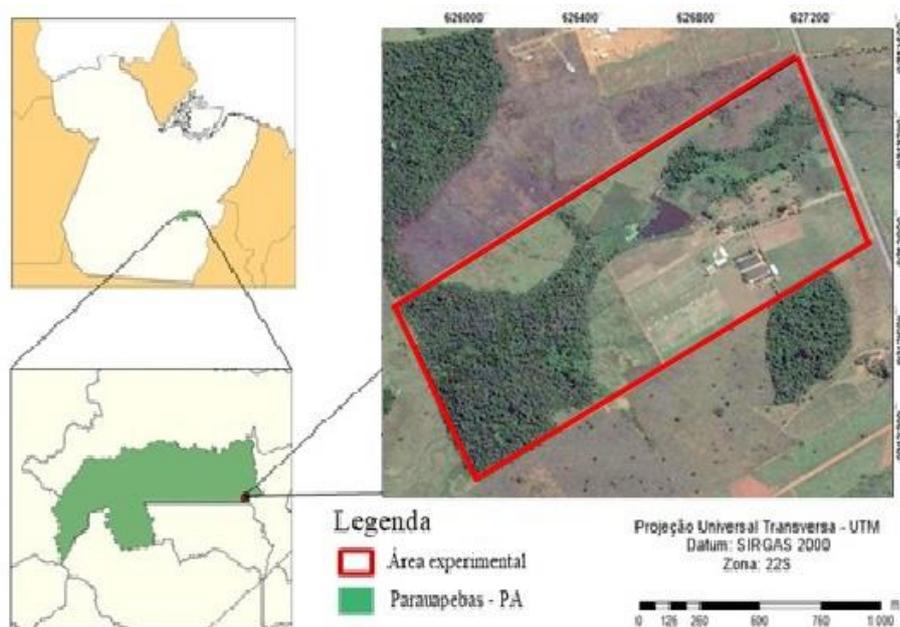
A relação e influência entre a resistência à penetração, umidade gravimétrica e pH indicam sazonalidade, em que as diferenças entre os valores da propriedade do solo expressam comportamento espacial (ANDRIOTTI, 2003). A dependência espacial entre as variáveis pode ser analisada por meio de modelos de semivariograma teóricos, que apresentam a

autocorrelação em diferentes direções e distâncias (YAMAMOTO; LANDIM, 2013; VIEIRA, 2000) e possibilitam a avaliação e monitoramento da variabilidade espacial dos atributos do solo, sendo uma importante ferramenta na determinação de estratégias de manejo (GREGO; VIEIRA, 2005; MARASCA *et al.*, 2011; MATIAS *et al.*, 2015).

Diante do exposto, a hipótese do estudo consiste na existência de dependência espacial entre atributos do solo em diferentes sistemas de manejo do solo. O objetivo do estudo foi caracterizar a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, à umidade gravimétrica e à acidez ativa nos sistemas de manejo do solo na Amazônia brasileira.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em área experimental com histórico de mais de 20 anos com manejo de fogo e posterior implantação de monocultivo, no município de Parauapebas - Pará, coordenadas 6°12'45,43" latitude Sul e 49°51'10,18" longitude Oeste (Figura 1), em solo classificado como Argissolo Vermelho Amarelo (EMBRAPA, 2018). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região caracteriza-se como tropical úmido do tipo "Aw", com temperatura média anual de 29 °C e pluviosidade média anual de 1.500 - 2.000 mm ano<sup>-1</sup> (PAIVA *et al.*, 2020).



**Figura 1.** Localização da área experimental no município de Parauapebas (PA), região Sudeste do Estado do Pará.

Foram selecionadas quatro áreas de dois hectares em diferentes sistemas de manejo: Mata Nativa (MN); sistema de plantio direto (SPD); sistema de plantio convencional (SPC); e

pastagem (PAS). Em MN tem-se uma mata secundária com aproximadamente 15 anos sem interferência antrópica, contudo, a área foi queimada anteriormente a esse período. A área do SPD encontrava-se no primeiro ano de implantação do sistema de plantio direto (SPD) e, anteriormente ao estudo, foi cultivada de maneira convencional com mandioca e milho. O SPC adotava histórico de sistema convencional de plantio de milho (SPC), e recente correção do solo com aplicação de calcário dolomítico, enquanto PAS apresentava *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk em pastejo com caprinos.

Nas áreas avaliadas foram estabelecidas malhas amostrais de 200 x 100 m com espaçamento distanciado de seu vizinho de 25 m no eixo X e 40 m no eixo Y, perfazendo um total de 30 pontos amostrais em cada área, nas profundidades de: 0,0 - 0,10 m; 0,10 - 0,20 m; e 0,20 - 0,30 m. As amostras foram coletadas nos pontos de cruzamento da malha, os quais foram georreferenciados.

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada nas profundidades de 0,0 - 0,10 m; 0,10 - 0,20 m; e 0,20 - 0,30 m. O equipamento utilizado foi o medidor eletrônico penetroLOG-PLG 1020 com aplicação de força no sentido vertical em uma velocidade constante de aproximadamente 20 mm s<sup>-1</sup> e realizadas leituras a cada 0,1 m.

Os resultados de RP obtidos nos sistemas avaliados foram confrontados aos que Sá e Santos Júnior (2005) consideraram valores limitantes ao comprimento da raiz, sendo 2,0 MPa para culturas anuais, 2,5 MPa para pastagens e 3,0 MPa para espécies arbóreas.

Para determinação da umidade gravimétrica do solo (Ug%) foram coletadas amostras utilizando uma sonda nos mesmos pontos e profundidades utilizadas na RP. Posteriormente, as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Solos da Universidade Federal Rural da Amazônia, *Campus* de Parauapebas. As avaliações das amostras seguiram as recomendações propostas pela Embrapa (2011) expressa pela equação (1):

$$Ug \% = \frac{\text{Massa de água}}{\text{Massa de sólidos}} \times 100 \quad (1)$$

A acidez ativa do solo em água (pH) foi determinada seguindo metodologia descrita pela Embrapa (2011). Os valores de acidez foram interpretados conforme os níveis propostos por Tomé Júnior (1997), que considera valores de pH entre 5,0 e 6,5 ideais para o desenvolvimento das culturas agrícolas. Os dados de pH, assim como os referentes a RP e a Ug%, foram analisados por meio de estatística descritiva, com a normalidade dos dados testada pelo teste de Shapiro-Wilk.

Para caracterização espacial do padrão da variabilidade espacial da RP, da Ug% e do pH do solo foi empregada a análise geoestatística. A dependência espacial foi obtida por meio de ajustes de semivariogramas estimados pela semivariância (Equação 2), que representa o

valor médio do quadrado das diferenças entre todos os pontos amostrais tomados em uma distância  $h$  uns dos outros (ANDRIOTTI, 2003).

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

Em que:  $\hat{\gamma}(h)$  é a semivariância da variável  $Z(x_i)$ ;  $N(h)$  é o número de pares experimentais separados por uma distância  $h$ ;  $Z(x_i)$  é o valor determinado em cada ponto amostrado;  $(x_i+h)$  é o valor medido em um ponto mais uma distância  $h$ .

A seleção do modelo teórico foi realizada pela análise da menor soma do quadrado dos resíduos (SQR), o maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o maior grau de dependência espacial (GDE). Os semivariogramas e os ajustes dos modelos foram determinados por meio do programa GS+ versão 7 (ROBERTSON, 2008). O grau de dependência espacial (GDE) das variáveis em estudo foram definidos pela relação  $(C/C_0+C)$  (Equação 3) e avaliados segundo a classificação de Cambardella *et al.* (1994), que consideram três níveis: fraca (GDE < 25%), moderada (GDE entre 26% e 75%) ou forte (GDE > 75%).

$$GDE = \left( \frac{C}{C_0 + C} \right) \times 100 \quad (3)$$

Em que: GDE é o grau de dependência espacial;  $C$  é a contribuição;  $C_0+C$  o patamar.

O efeito pepita ( $C_0$ ), ou *nugget effect*, corresponde ao valor da semivariância para a distância ( $h$ ) zero e indica erros de amostragem em razão de sua escala, ou seja, o valor de  $C_0$  deve ser o mais próximo de zero possível. De modo geral, valores de  $C_0$  superiores a 30% do patamar são considerados elevados (ANDRIOTTI, 2003). O patamar ( $C_0 + C$ ) representa um determinado valor de ( $h$ ) estabilizado, sendo aproximadamente igual à variância dos dados e a contribuição ( $C$ ) se caracteriza pela variância espacial da amostra, dada pela diferença entre o patamar e o efeito pepita ( $C_0$ ) (SILVA *et al.*, 2007).

O alcance ( $A$ ) ou *range* representa o limite da dependência espacial entre as amostras. Como o semivariograma é uma função crescente, à medida que aumenta a distância ( $h$ ), a semivariância entre os pares de pontos amostrais tende a elevar-se até o limite onde dois pontos amostrais passam a ser independentes e sem correlação espacial (MACHADO *et al.*, 2007; ANDRADE *et al.*, 2005).

Com base no conhecimento dos componentes do semivariograma experimental, torna-se necessário ajustar um modelo teórico aos dados, o que permite determinar a correlação

espacial para qualquer distância dentro do espaço amostral (ANDRADE *et al.*, 2005). Foram ajustados os modelos esférico, exponencial e gaussiano (Equações 4, 5 e 6), que, conforme Vieira (2000), são os principais modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas experimentais de variáveis de interesse agrônomo.

$$\gamma = C_0 + C \left[ \frac{3}{2} \cdot \left( \frac{h}{A} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{h}{A} \right)^3 \right]; \text{ se } h > A, \text{ então } \gamma = C_0 + C \quad (4)$$

$$\gamma = C_0 + C \left[ 1 - e^{-h^2/A^2} \right]; \text{ se } h > A, \text{ então } \gamma = C_0 + C \quad (5)$$

$$\gamma = C_0 + C \left[ 1 - e^{-h^2/A^2} \right]; \text{ se } h > A, \text{ então } \gamma = C_0 + C \quad (6)$$

Em que: C é a contribuição; C<sub>0</sub>+C o patamar.

O semivariograma, com seu modelo ajustado, consiste de suporte para a interpolação por krigagem, pois permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço, através da estimativa de valores para os locais não amostrados (GREGO; VIEIRA, 2005). Os dados foram submetidos ao método de interpolação por krigagem e expressos na forma de mapas de superfície por meio do *software Surfer* versão 11 (GOLDEN SOFTWARE, 2011).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio das análises observou-se que as variáveis RP e Ug% indicaram normalidade na distribuição dos dados, testada pelo teste de Shapiro-Wilk.

De acordo com Reichert *et al.* (2009), os níveis críticos de RP para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada, em que valores de RP superiores a 2 MPa têm sido associados como impeditivo ao crescimento das raízes e da parte aérea da planta (TORMENA *et al.*, 2002; SÁ; SANTOS JÚNIOR, 2005).

Os valores de CV% obtiveram valores inferiores a 25% nas diferentes profundidades e sistemas de manejo do solo. A área MN apresentou maiores valores (2,16 MPa) de RP na profundidade de 0,20 - 0,30 m, semelhante ao obtido na mesma profundidade nos sistemas de SPD, PAS e SPC, em que no SPC os valores foram superiores a 2 MPa na camada de 0,10 - 0,20 m (Tabela 1).

**Tabela 1.** Estatística descritiva da resistência do solo à penetração (RP) aferida em áreas sob mata nativa (MN), sistema de plantio direto (SPD), sistema de plantio convencional (SPC) e pastagem (PAS)

Área	Prof. (m)	RP (MPa)		Ug (%)		W
		CV (%)	Média	CV (%)	Média	

MN	0,0-0,10	17,85	1,48	12,03	30,64	Sim
	0,10-0,20	24,00	1,80	15,54	26,91	Sim
	0,20-0,30	22,70	2,16	13,78	26,23	Sim
SPD	0,0-0,10	16,46	1,13	16,98	16,24	Sim
	0,10-0,20	16,31	1,87	15,25	16,78	Sim
	0,20-0,30	13,43	3,08	16,54	17,11	Sim
SPC	0,0-0,10	21,74	1,44	21,55	23,29	Sim
	0,10-0,20	21,16	2,14	19,18	22,43	Sim
	0,20-0,30	21,45	2,83	18,69	22,48	Sim
PAS	0,0-0,10	20,39	1,38	12,53	28,93	Sim
	0,10-0,20	21,04	1,71	10,49	24,82	Sim
	0,20-0,30	24,47	2,04	12,63	23,92	Sim

\* CV%: coeficiente de variação; W: teste de normalidade de Shapiro e Wilk a 5% de probabilidade.

Na área SPD houve uma camada de impedimento mecânico na profundidade de 0,20 - 0,30 m, possivelmente atribuída aos quatro anos de preparo convencional do solo anterior à adoção do sistema de plantio direto, tal como mencionado por Bayer *et al.* (2006) no cultivo convencional.

Na área SPC ocorreu um aumento da RP nas profundidades de 0,10 - 0,30 m, com valores considerados impeditivos para o crescimento de raízes de culturas anuais (TORMENA *et al.*, 2002; SÁ; SANTOS JÚNIOR, 2005). O aumento da RP nas camadas mais profundas ocorreu devido, entre outros fatores, à pressão das camadas superficiais sobre as subjacentes e à pressão exercida pelas máquinas utilizadas nas operações de preparo do solo. Uma relação direta entre os valores médios de RP e de Ug% foi verificada no SPC, resultado da redução da macroporosidade e aumento da meso e microporosidade do solo, ocasionada pela compactação.

O valor médio de RP na camada subsuperficial do solo (0,20 - 0,30 m) na área sob PAS foi de 2,04 Mpa, semelhante ao resultado encontrado por Oliveira *et al.* (2015), que ao avaliar a RP em sistema de pastagem com capim Tifton, verificaram que os maiores valores ocorreram nas profundidades de 0,10 - 0,20 m. O resultado de RP ocorreu devido às alterações das condições físicas, tais como: densidade e porosidade do solo, que podem ser atribuídas ao fato do peso do animal ser distribuído em uma menor área atingida pelo casco e o tráfego intensivo na área.

A Ug% apresentou valores médios mais elevados na área MN em comparação às demais áreas. Neste resultado é importante considerar que as coletas das amostras foram realizadas no período chuvoso e a matéria orgânica presente na área NM proporcionou o aumento da retenção de umidade no solo. Por sua vez, Torres *et al.* (2012) verificaram que o aumento da umidade resultou na redução da RF conforme a profundidade do solo.

Os resultados da análise geoestatística mostraram que a RP e Ug% apresentaram forte dependência espacial de acordo com a classificação de Cambardella *et al.* (1994), o que

demonstra que os semivariogramas explicam a maior parte da variação dos dados experimentais (Tabela 2). Os modelos esférico, gaussiano e exponencial foram os que melhor se ajustaram aos semivariogramas, semelhante ao observado por Oliveira *et al.* (2013), que encontraram resultados semelhantes ao avaliar a variabilidade espacial de atributos físicos do solo em um Cambissolo Háplico.

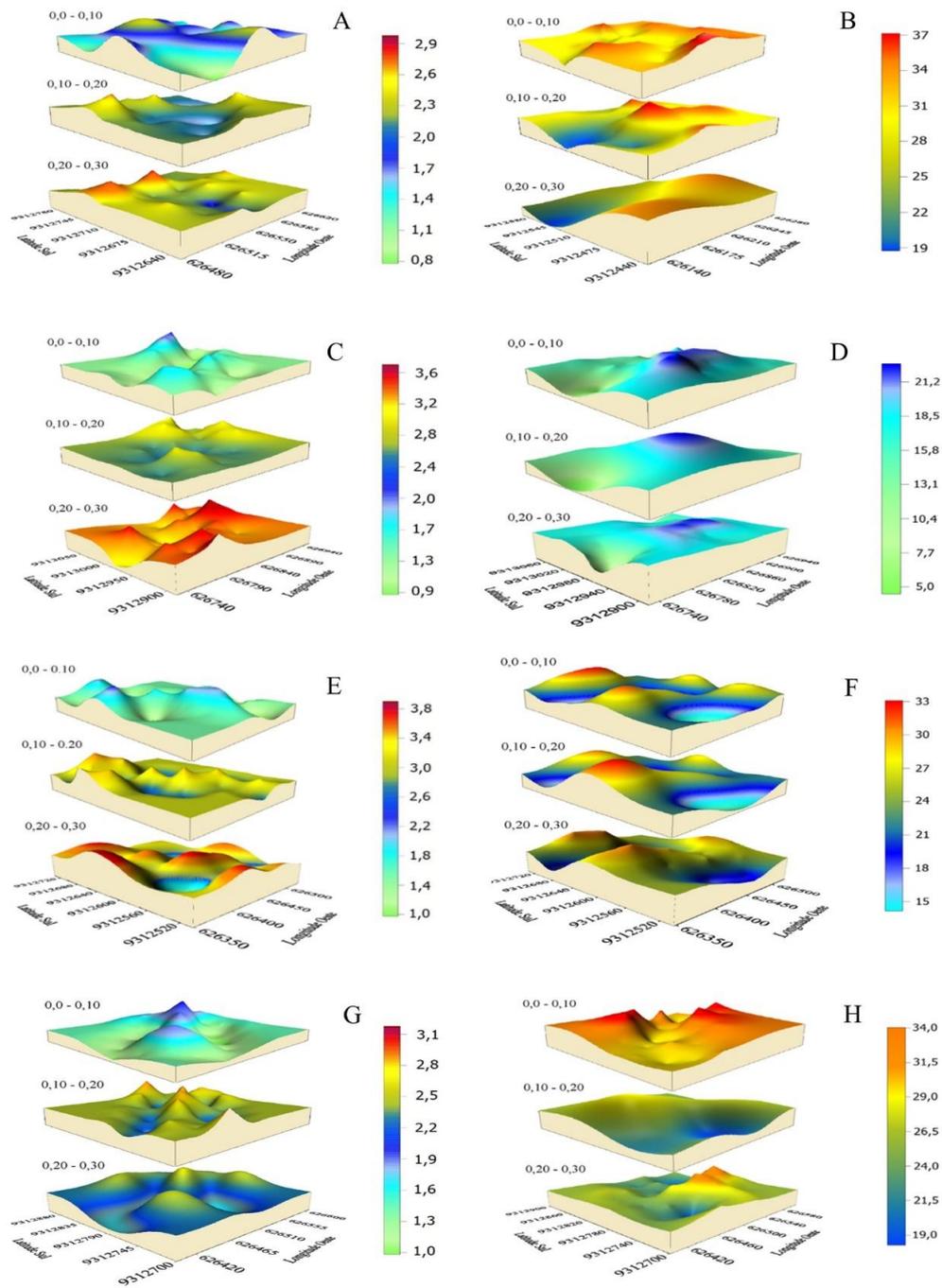
**Tabela 2.** Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas ajustados aos dados de resistência do solo à penetração (RP) e umidade gravimétrica (Ug%) aferida em áreas com diferentes sistemas de uso

Área	Prof.	C <sub>0</sub>		C <sub>0</sub> +C		GDE (%)		R <sup>2</sup>		SQR	
		RP	Ug%	RP	Ug%	RP	Ug%	RP	Ug%	RP	Ug%
MN	0,0-0,10	0,004	0,9	0,071	13,51	0,94	0,93	0,707	0,802	4.10 <sup>-5</sup>	0,25
	0,10-0,20	0,014	1,33	0,192	15,84	0,93	0,92	0,861	0,9	5.10 <sup>-5</sup>	0,04
	0,20-0,30	0,015	1,76	0,244	15,53	0,94	0,89	0,916	0,9	7.10 <sup>-5</sup>	0,01
SPD	0,0-0,10	0,002	0,65	0,035	8,765	0,94	0,93	0,823	0,9	1.10 <sup>-5</sup>	0,35
	0,10-0,20	0,01	2,05	0,093	8,727	0,89	0,77	0,941	0,88	4.10 <sup>-4</sup>	1,67
	0,20-0,30	0,007	3,04	0,173	16,06	0,96	0,81	0,623	0,656	3.10 <sup>-4</sup>	1,77
SPC	0,0-0,10	0,006	2,01	0,103	29,21	0,95	0,93	0,839	0,879	2.10 <sup>-4</sup>	1,84
	0,10-0,20	0,004	2,01	0,204	24,67	0,98	0,92	0,896	0,91	1.10 <sup>-5</sup>	4,37
	0,20-0,30	0,02	3,35	0,374	21,4	0,95	0,84	0,762	0,748	2.10 <sup>-3</sup>	1,92
PAS	0,0-0,10	0,013	1,92	0,094	14,2	0,86	0,86	0,688	0,507	3.10 <sup>-4</sup>	2,3
	0,10-0,20	0,011	3,1	0,252	13,04	0,96	0,76	0,485	0,942	2.10 <sup>-4</sup>	2,65
	0,20-0,30	0,015	0,85	0,145	7,682	0,9	0,89	0,945	0,952	2.10 <sup>-5</sup>	0,11

MN: Mata Nativa; SPD: Sistema de plantio direto; SPC: Sistema de plantio convencional; PAS: Pastagem; C<sub>0</sub>: efeito pepita; C<sub>0</sub>+C: patamar; GDE: Grau de dependência espacial; SQR: Soma dos quadrados dos resíduos.

Os dados das semivariâncias se ajustaram aos modelos definidos para RP e Ug%, apresentando altos valores de R<sup>2</sup> e baixos valores da SQR. O efeito pepita (C<sub>0</sub>) encontrou dentro do limite de 30% do patamar (C<sub>0</sub>+C), classificado como baixo (ANDRIOTTI, 2003). O alcance (A) para as variáveis estudadas foi superior ao estabelecido na malha amostral com variação de 38,5 m até 65,1 m para RP e 38,4 m até 113,9 m para Ug%, o que indica maior continuidade na distribuição espacial das propriedades do solo.

Por meio da krigagem foram confeccionados mapas de isolinhas da RP e Ug%, nos quais foram identificados zonas heterogêneas e padrões críticos, bem como demonstram que a quantidade de água do solo está associada aos valores de RP (Figura 2), o que possibilita recomendar adoção de medidas de manejo mais adequadas para cada nível de compactação das áreas avaliadas.



**Figura 2.** Mapas de distribuição espacial da resistência do solo à penetração (RP) e sua respectiva umidade gravimétrica (Ug%) nas profundidades 0,0 - 0,10, 0,10 - 0,20 e 0,20 - 0,30 m, em área de mata nativa (MN) (A e B), sistema de plantio direto (SPD) (C e D), sistema de plantio convencional (SPC) (E e F) e pastagem (PAS) (G e H).

A partir dos resultados encontrados para o pH verificou-se a normalidade de distribuição dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk (Tabela 3). Os baixos valores referentes ao CV% indicaram baixa variabilidade, o que corrobora com os resultados de Matias *et al.* (2015),

que encontraram CV de 2,97% ao analisar o pH em uma área comercial em sistema convencional de plantio de soja.

**Tabela 3.** Estatística descritiva do pH em áreas sob mata nativa (MN), sistema de plantio direto (SPD), sistema de plantio convencional (SPC) e pastagem (PAS)

Área	Prof. (m)	pH em H <sub>2</sub> O					
		Máximo	Mínimo	Médio	Mediana	CV (%)	W
NM	0,0-0,10	7,33	5,90	6,46	6,48	4,26	Sim
	0,10-0,20	6,95	5,75	6,25	6,21	5,02	Sim
	0,20-0,30	7,08	5,74	6,31	6,28	5,02	Sim
SPD	0,0-0,10	6,24	5,23	5,78	5,80	4,70	Sim
	0,10-0,20	6,70	5,01	5,74	5,74	5,88	Sim
	0,20-0,30	7,52	5,55	6,27	6,21	7,47	Sim
SPC	0,0-0,10	7,52	5,50	6,48	6,37	8,46	Sim
	0,10-0,20	7,33	5,31	6,48	6,52	6,98	Sim
	0,20-0,30	7,32	5,25	6,39	6,44	7,28	Sim
PAS	0,0-0,10	7,28	6,24	6,68	6,69	3,99	Sim
	0,10-0,20	7,54	6,45	6,88	6,90	3,36	Sim
	0,20-0,30	7,71	6,37	6,88	6,92	5,01	Sim

W: teste de normalidade de Shapiro e Wilk a 5% de probabilidade.

A mata nativa (MN) apresentou uma variação de acidez fraca nas profundidades avaliadas, caracterizando um solo com acidez ideal para o desenvolvimento das culturas agrícolas (TOMÉ JÚNIOR, 1997). Os valores de pH próximos à neutralidade obtidos na MN, provavelmente ocorreram devido à presença de rochas em áreas de transição de classes de solos.

Na área SPD, o pH de 5,01 a 7,52 está na faixa ideal para culturas anuais de 5,0 e 6,5 (TOMÉ JÚNIOR, 1997). Os valores mais baixos de pH encontrados no SPD estão relacionados aos maiores teores de matéria orgânica do solo presentes na superfície sob vegetação de floresta quando comparados aos solos com gramíneas. Uma vez que, nos solos florestais, os resíduos orgânicos são decompostos pelos micro-organismos pela ação de enzimas e ácidos orgânicos, os quais promovem a acidificação do meio (ABRÃO *et al.*, 2015).

Na área do sistema convencional (SPC), o pH variou de 5,31 a 7,32 conforme a profundidade do solo. Os valores mais elevados são explicados pela aplicação de calcário dolomítico no ano de 2015 que promoveu a redução da acidez ativa. De acordo com Tomé Júnior (1997) e Dalchiavon *et al.* (2017) os valores de pH encontram-se dentro dos valores ideais para o desenvolvimento das culturas anuais.

A área de pastagem (PAS), o pH configura-se com médias de 6,68 na profundidade de 0,0-0,10 m e 6,88 nas profundidades de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, respectivamente. Os resultados relacionam-se à correção da acidez do solo do sistema em anos anteriores. Nas áreas

com integração lavoura-pecuária, os animais podem promover um aumento da complexidade da dinâmica da correção da acidez, em função do pisoteio, do pastejo e dos excrementos, nas quais os ácidos orgânicos de baixo peso molecular liberados durante a decomposição dos resíduos animais, principalmente das fezes, podem auxiliar no efeito corretivo do calcário em profundidade no pasto, promovendo a mobilização de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  no perfil do solo, reduzindo a acidez ativa.

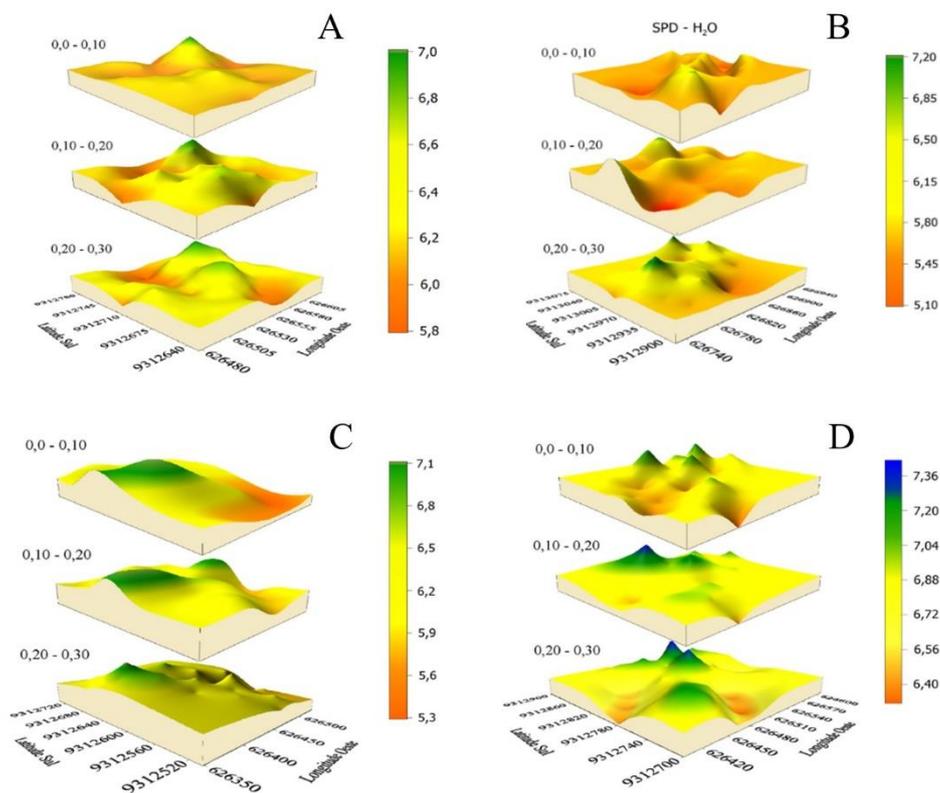
Pelo ajuste dos modelos aos semivariogramas verificou-se que o pH indicou forte dependência espacial segundo a classificação de Cambardella *et al.* (1994) (Tabela 4). Os modelos que melhor se ajustaram para estimar a variabilidade espacial do pH foram: Esférico, Gaussiano e Exponencial.

**Tabela 4.** Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas ajustados aos dados de pH do solo em água aferidos em áreas sob mata nativa (MN), sistema de plantio direto (SPD), sistema de plantio convencional (SPC) e pastagem (PAS)

Área	Prof.	$C_0$	$C_0+C$	Alcance (m)	GDE (%)	Classe	$R^2$	SQR
MN	0,0-0,10	0,005	0,085	54,4	0,94	Forte	0,793	$1.10^{-3}$
	0,10-0,20	0,005	0,104	46,7	0,95	Forte	0,809	$5.10^{-4}$
	0,20-0,30	0,008	0,107	52,0	0,92	Forte	0,809	$9.10^{-4}$
SPD	0,0-0,10	0,007	0,081	48,3	0,91	Forte	0,629	$6.10^{-4}$
	0,10-0,20	0,005	0,115	33,6	0,96	Forte	0,861	$4.10^{-3}$
	0,20-0,30	0,028	0,329	40,3	0,92	Forte	0,843	$2.10^{-3}$
SPC	0,0-0,10	0,036	0,884	50,0	0,88	Forte	0,980	$2.10^{-2}$
	0,10-0,20	0,006	0,975	38,4	0,98	Forte	0,910	$6.10^{-3}$
	0,20-0,30	0,011	0,950	33,4	0,95	Forte	0,850	$2.10^{-2}$
PAS	0,0-0,10	0,008	0,050	40,0	0,84	Forte	0,828	$2.10^{-4}$
	0,10-0,20	0,004	0,084	56,1	0,95	Forte	0,947	$1.10^{-4}$
	0,20-0,30	0,009	0,128	57,6	0,93	Forte	0,846	$1.10^{-2}$

$C_0$ : efeito pepita;  $C_0+C$ : patamar; GDE: Grau de dependência espacial; SQR: Soma dos quadrados dos resíduos.

O efeito pepita ( $C_0$ ) se encontra dentro do limite de 30% do patamar ( $C_0+C$ ), classificado como baixo (ANDRIOTTI, 2003), demonstrando que os semivariogramas explicaram a maior parte da variação dos dados experimentais. O alcance (A) para as variáveis avaliadas foi superior ao estabelecido na malha amostral (33,4 a 57,6) indicando a distância em que as variáveis se encontram correlacionadas. A partir da interpolação por krigagem foram confeccionados mapas da variabilidade espacial do pH (Figura 3).



**Figura 3.** Mapas de distribuição espacial do pH do solo nas profundidades de 0,0 - 0,10, 0,10 - 0,20 e 0,20 - 0,30 m em área sob mata nativa (MN) (A), sistema de plantio direto (SPD) (B), sistema de plantio convencional (SPC) (C) e área sob pastagem (PAS) (D).

Pela análise detectou-se valores acentuados de pH neutros a alcalinos nas áreas experimentais, uma exceção é a área sob SPD na profundidade de 0,0 - 0,10 m, que mostrou acidez moderada (pH entre 5 e 6), ideal para o desenvolvimento de culturas anuais. O resultado foi proporcionado pela prática de calagem realizada nas áreas de cultivo, com exceção da MN, que apresentou variabilidade de classe de solo maior comparado aos sistemas de manejo do solo.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As variáveis do solo, RP, Ug% e pH, apresentaram dependência espacial considerada verdadeira, em que a ferramenta geoestatística é eficiente para avaliar a variação espacial dos atributos dos solos nos sistemas de manejo do solo. O mapeamento geoestatístico identifica comportamentos distintos nas variáveis resistência do solo à penetração (RP), à umidade gravimétrica do solo (Ug%) e à acidez ativa das áreas sob mata nativa, sistema de plantio direto, sistema de plantio convencional e pastagem.

Os mapas de distribuição espacial possibilitam diagnosticar os pontos específicos com níveis críticos de RP, de Ug% e de pH, recomendando a correção do solo localizada em zonas com elevada compactação e acidez, reduzindo assim gastos excessivos com insumos e proporcionando melhoria nas práticas de manejo do solo.

## 5 AGRADecIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal Rural da Amazônia.

## REFERÊNCIAS

- ABRÃO, S. F.; ROSA, S. F. da; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SECCO, D.; EBLING, Â. A. Alterações químicas de um cambissolo húmico causadas por florestamento com *Pinus taeda* em área de campo natural. **Floresta**, v. 45, n. 3, p. 455-464, 2015. <https://doi.org/10.5380/ufv.v45i3.36103>.
- ANDRADE, A. R. S.; GUERRINI, I. A.; GARCIA, C. J. B.; KATEZ, I.; GUERRA, H. O. C. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência Agrotecnológica**, v. 29, n. 2, p. 322-329, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542005000200008>.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: UNISINOS, 2003. 165p.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; SANTOS, S. R. Física do solo, diagnóstico e manejo da compactação em plantio direto. In: FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto**. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2006. p. 161-188.
- BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no Cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902013000100001>.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Argissolo sob diferentes curvaturas do relevo. **Revista Brasileira Ciências Solo**, v. 34, n. 3, p. 617-630, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300003>.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVARK, J. L.; 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>.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. 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**, v. 32, n. 3, p. 933-942, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300003>.

CORADO NETO, F. C.; SAMPAIO, F. M. T.; VELOSO, M. E. C.; MATIAS, S. S. R.; ANDRADE, F. R.; LOBATO, M. G. R. Variabilidade espacial da resistência à penetração em Neossolo Litólico degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 5, p. 1353-1361, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20140692>.

DALCHIAVON, F. C.; RODRIGUES, A. R.; DE LIMA, E. S.; LOVERA, L. H.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com soja sob plantio direto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 16, n. 2, p. 144-154, 2017. <https://doi.org/10.5965/223811711622017144>.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2011. 230p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5ª ed. Brasília: Embrapa, 2018. 353p.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer version 11**: Surface mapping system. Colorado, USA: Golden Software, 2011.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 169-177, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000200002>.

LEPSCH, I. F. **19 Lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 456p.

MACHADO, L. O.; LANA, A. M. Q.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C.; FERREIRA, C. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 591-599, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000300019>.

MARASCA, I.; OLIVEIRA, A. A. C.; GUIMARÃES, C. E.; CUNHA, R. A. J.; ASSIS, L. R.; PERIN, A.; MENEZES, S. A. R. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e teor de água em sistema de plantio direto, na cultura da soja. **Bioscience Journal**, v. 10, n. 2, p. 239-246, 2011.

MARASCA, I.; GLADENUCCI, J.; SPADIM, E. R.; BARBOSA, R. D.; LANÇAS, K. P. Geoestatística aplicada na determinação da compactação do solo no cultivo da cana-de-açúcar. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 2, p. 49-55, 2017. <https://doi.org/10.32404/rean.v4i2.1462>.

MATIAS, S. S. R.; NÓBREGA, J. C. A.; NÓBREGA, R. S. A.; ANDRADE, F. R.; BAPTISTEL, A. C. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo cultivado de modo convencional com soja no cerrado piauiense. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 9, n. 1, p. 17-26, 2015. <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v9i1.2036>.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E.; JOSÉ MARQUES JÚNIOR, J. M.; NASCIMENTO, E. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 1103-1112, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400027>.

OLIVEIRA, S. M. D.; LIMA, P. R.; VERBURG, J. E. Qualidade física do solo sob diferentes sistemas de manejo e aplicação de dejetos suíno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 280-285, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3p280-285>.

PAIVA, W. S.; CAMELO, G. C. C.; ARAÚJO, R. F.; GOULART, S. L.; ABRÃO, S. F.; EBLING, A. A. Pagamento por serviço ambiental em floresta ombrófila densa secundária no sudeste do Pará. **Biofix Scientific Journal**, v. 5, n. 1, p. 114-120, 2020. <http://dx.doi.org/10.5380/biofix.v5i1.68458>.

REICHERT, J. M.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; RIQUELME, U. F. B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 3, p. 310-319, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000300013>.

ROBERTSON, G. P. **GS+**: Geostatistics for the environmental sciences. Versão 7. Plainwell: Gamma Design Software, 2008.

ROLAS. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10ª ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Comissão de química e fertilidade do solo, 2004. 400p.

ROSSATO, L.; ALVALÁ, R. C. S.; TOMASELLA, J. Variação espaço-temporal da umidade do solo no Brasil: Análise das condições médias para o período de 1971-1990. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 2, p. 113-122, 2004.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JÚNIOR, J. D. G. **Compactação do solo**: Consequências para o crescimento vegetal. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2005. 26p.

SILVA, F. M.; SOUZA, Z. M.; FIGUEIREDO, C. A. P.; MARQUES JÚNIOR, J.; MACHADO, R. V. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, v. 37, n. 2, p. 401-407, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782007000200016>.

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, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000243>.

TOMÉ JÚNIOR, J. B. **Manual para Interpretação de Análise de Solo**. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 1997. 148p.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; DA COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A.; Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes

sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 4, p. 795-801, 2002.  
<https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000400026>.

TORRES, R. L. J.; JUNIOR, R. J. D.; SENE, A. G.; JAIME, G. D.; VIEIRA, S. M. G.  
Resistência à penetração em área de pastagem de capim tifton, influenciada pelo pisoteio e irrigação. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 1, p. 232-239, 2012.

VIEIRA, S. R. Uso de geoestatística em estudos de variabilidade espacial de propriedades do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1-54, 2000.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: Conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 215p.