



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
PIAUÍ
CAMPUS URUCUÍ
CURSO ENGENHARIA AGRÔNOMICA**

LEONARDO TONTINI CAPRA

**COMPONENTES DE PRODUTIVIDADE DA SOJA EM FUNÇÃO DA
VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM
LATOSSOLO VERMELHO EUTRÓFICO**

URUCUÍ

2023

LEONARDO TONTINI CAPRA

**COMPONENTES DE PRODUTIVIDADE DA SOJA EM FUNÇÃO DA
VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM
LATOSSOLO VERMELHO EUTRÓFICO**

Trabalho de Conclusão de Curso (artigo científico) apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso de Engenharia Agrônômica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Uruçuí.

Orientador: Prof. Dr. Vinícius Ribamar Alencar Macedo.

URUÇUÍ

2023

COMPONENTES DE PRODUTIVIDADE DA SOJA EM FUNÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO EUTRÓFICO

Leonardo Tontini Capra¹
Vinícius Ribamar Alencar Macedo²

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar a produtividade da soja em função da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo de um latossolo vermelho eutrófico. O estudo foi realizado na Fazenda Almirante, no município de Uruçuí – PI. Foi utilizada uma grade amostral com 70 pontos, com o espaçamento de 30 x 30 m, em que foram avaliados os seguintes parâmetros: número de vagens/planta, número de grãos/vagem, produtividade, massa de mil grãos, porosidade total, microporosidade, macroporosidade, densidade, resistência à penetração e umidade gravimétrica. Os resultados foram analisados utilizando ferramentas geoestatísticas, sendo classificadas segundo o grau de dependência espacial. Em seguida, as variáveis foram ajustadas aos semivariogramas que melhor se adequaram e, por fim, foi realizada a krigagem, em que foram estimados os valores para os locais não amostrados, permitindo a confecção de mapas de isolinhas. O número de grãos/vagem, produtividade, massa de mil grãos, microporosidade, resistência à penetração (em todas as profundidades) e a umidade gravimétrica (20-40 cm) demonstraram forte dependência espacial. Os altos valores de resistência à penetração, em todas as profundidades, não restringiram a produtividade de grãos de soja.

Palavras-chave: Glycine max; geoestatística; krigagem.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate soybean productivity as a function of the spatial variability of soil physical attributes of a eutrophic red oxisol. The study was carried out at Fazenda Almirante, in the municipality of Uruçuí - PI. A sampling grid with 70 points was used, with a spacing of 30 x 30 m, in which the following parameters were evaluated: number of pods/plant, number of grains/pod, productivity, mass of one thousand grains, total porosity, microporosity, macroporosity, density, resistance to penetration and gravimetric humidity. The results were analyzed using geostatistical tools, being classified according to the degree of spatial dependence. Then, the variables were adjusted to the best suited semivariograms and, finally, kriging was performed, in which the values for the non-sampled locations were estimated, allowing the creation of isoline maps. The number of grains/pod, yield, thousand-grain mass, microporosity, resistance to penetration (at all depths) and gravimetric moisture (20-40 cm) showed strong spatial dependence. The high penetration resistance values, at all depths, did not restrict soybean grain yield.

Keywords: Glycine max; geostatistics; kriging.

Data de aprovação: 24/02/2023

¹ Graduando em Engenharia Agrônômica. Instituto Federal do Piauí – Campus Uruçuí. E-mail: leonardotontini@hotmail.com

² Docente, Dr. Instituto Federal do Piauí – Campus Uruçuí. E-mail: vinicius.macedo@ifpi.edu.br

1 INTRODUÇÃO

O aumento na demanda nacional e internacional por alimentos tem impulsionado a agricultura brasileira, sobretudo na região do Cerrado, onde há alta incidência de lavouras modernas, tecnológicas e empresariais, no qual a cultura da soja é a protagonista (GUIMARÃES, 2000; EMBRAPA, 2020).

Devido às características da agricultura convencional, os problemas relacionados aos atributos físicos do solo são muito comuns de serem observados (GUIMARÃES, 2000). Tais entraves estão intimamente ligados à produtividade das culturas agrícolas, uma vez que impactam diretamente o suprimento de água, aeração e a disponibilidade de nutrientes às plantas (REICHERT et al., 2014).

O uso e manejo dos solos do Cerrado, tais como o preparo periódico do solo, adubações e calagens, quando feitos de forma incorreta, em muito contribuem para promoverem alterações físicas ao solo com consequentes prejuízos à produção de grãos e à preservação ambiental (GUIMARÃES, 2000; LIMA; ARAÚJO; BARBOSA et al., 2013).

Nesse sentido, a qualidade física do solo está relacionada à adoção de práticas de manejo que promovam melhor uso da terra e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (ROLDÁN et al., 2003). O diagnóstico da qualidade do solo deve ser realizado por indicadores que reflitam o comportamento do solo (PEREIRA et al., 2011), sendo mensurado por meio de atributos, como a porosidade, densidade e resistência à penetração (ARAÚJO et al., 2012).

Os atributos físicos demonstram relação direta com a compactação do solo e o desenvolvimento das raízes (REICHERT et al., 2014), e expõem as variações produtivas e as variabilidades do solo dentro das lavouras (JONES, 1983). Estes fatores estão intimamente correlacionados entre si e com o arranjo estrutural do solo (LI et al., (2011). Além disso, Dexter (2004) discute a relação sinérgica entre a melhoria na qualidade física e a melhoria na qualidade química e biológica do solo.

Assim, a identificação, o gerenciamento e a interpretação da variabilidade espacial dentro das lavouras são objetos de estudo da geoestatística (MZUKU et al., 2005). Somado a isso, Manzione; Rodrigues e Zimback (2002) comentam que a geoestatística indica alternativas de manejo do solo, possibilita ferramentas para melhor entendimento da variabilidade dos atributos e contribui para o aumento da produtividade.

A utilização de outras ferramentas estatísticas como semivariogramas e métodos de interpolação, como a Krigagem, são muito importantes para análise da variabilidade,

pois exibem o grau de dependência espacial de uma grandeza e o domínio de cada amostragem (MANZIONE; RODRIGUES; ZIMBACK, 2002)

A caracterização da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, em conjunto com técnicas estatísticas de tomada de decisões, é imprescindível para os estudos de análise exploratória dos dados e para o entendimento dos efeitos do manejo sobre o solo, contribuindo para o estabelecimento de uma agricultura mais ecologicamente sustentável e econômica (CAMBARDELLA et al., 1994).

Diante do exposto, o objetivo do estudo foi avaliar a produtividade da soja em função da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo de um latossolo vermelho eutrófico, na região de Uruçuí PI.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e caracterização da área experimental

O estudo foi conduzido em abril de 2020, na área da Fazenda Almirante, no município de Uruçuí, Piauí. A propriedade está localizada nas seguintes coordenadas geográficas 7° 20' 59" Sul e 44° 31' 07" Oeste do meridiano de Greenwich. O clima, conforme a classificação de Köppen, é definido como Aw (Tropical Úmido), apresentando abundância de chuvas no verão. Os índices pluviométricos médios são de 1069 mm e temperatura média é de 27.2° C.

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho eutrófico, textura franco argilo-siltosa, com topografia plana (inclinação < 2%).

2.2 Avaliação dos componentes de produtividade

A semeadura da soja cv. 8644 Monsoy, foi realizada no dia 15 de novembro de 2019, após a dessecação das plantas daninhas utilizando o herbicida glifosato, na dose de 1,5 L ha⁻¹. O espaçamento entrelinhas foi correspondente a 0,45 m, com densidade de 11 sementes por metro linear.

Para o tratamento de sementes foram empregados os fungicidas Apron e Fipronil (0,313 e 0,208 mL/100 kg de sementes) e o inoculante Starfix (147 mL /100 kg de sementes). Na adubação de plantio foram usados 180 kg ha⁻¹ de fosfato monoamônico (MAP) e 150 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (KCl), em cobertura.

O tratamento fitossanitário foi planejado em diversas etapas: (a) em 15/12/2020 foi aplicado o fungicida Apron (0,8 L ha⁻¹); (b) em 30/12/2020 foram aplicados o fungicida Fox (0,6 L ha⁻¹) e os inseticidas Lanate (0,8 L ha⁻¹), Expedition (0,6 L ha⁻¹) e Crytrin (0,7 L ha⁻¹); (c) em 16/01/2020 foram utilizados o fungicida Fox (0,6 L ha⁻¹) e os

inseticidas Lanate (0,8 L ha⁻¹), Expedition (0,6 L ha⁻¹) e Crytrin (0,7 L ha⁻¹); d) em 30/01/2020 o fungicida Viovan (0,7 0,7 L ha⁻¹) e e) 08/02/2020, o fungicida Crytrin (0,7 L ha⁻¹). Foram registrados 1185 mm durante o ciclo da cultura.

A produtividade (PG) foi obtida a partir das plantas coletadas em uma área de 2 m² por ponto amostral. Os grãos foram debulhados e pesados, posteriormente corrigiu-se o teor de água para 13% e extrapolou-se a produtividade kg ha⁻¹. As demais variáveis analisadas foram: número de vagens por planta (NVP); número de grãos por vagens (NGV) e massa de mil grãos (MMG).

2.3 Avaliação dos atributos físicos do solo

Os atributos físicos foram avaliados no período da colheita dos grãos. A fim de mensurar a produtividade da cultura da soja e os parâmetros físicos do solo, 70 pontos amostrais foram delimitados numa grade uniforme de 30 x 30 m. As coordenadas de cada ponto amostral foram registradas utilizando um aparelho de GPS (Global Position System).

a) Coleta das amostras

As amostras indeformadas e deformadas foram coletadas quatro dias após uma chuva acima de 30 mm. As primeiras foram coletadas em anéis volumétricos, com capacidade de 100 cm³, em cada ponto, na profundidade 0-10 cm. Por outro lado, as amostras deformadas foram coletadas com o auxílio de um trado.

Após a coleta, as amostras foram transportadas para o Laboratório de Agropecuária, do Instituto Federal do Piauí – Campus Uruçuí, em que foram avaliadas:

b) Porosidade total (Pt), microporosidade (Mic) e macroporosidade (Mac):

As amostras foram saturadas, levadas à mesa de tensão, equilibradas no potencial de 6 KPa e, posteriormente, secas em estufa a 105 °C (EMBRAPA, 2017). A massa do solo, entre as operações citadas, foi aferida em balança de precisão (0,01 g).

Os cálculos foram obtidos de acordo com a equação:

$$Pt = \frac{[(a - b) - (c - d)]}{e}$$

, em que: Pt: porosidade total (m³ m⁻³); a = massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-liga saturado (kg); b = massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-liga seco a 105 °C (kg); c = massa do conjunto cilindro-tecido-liga saturado (kg); d = massa do conjunto cilindro-tecido-liga seco a 105 °C (kg); e = volume total da amostra (m³).

Foi utilizada a seguinte equação para microporosidade:

$$Mic = \frac{(a - b)}{c}$$

, no qual: Mic = microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); a = massa da amostra após ser submetida a uma tensão de 60 KPa (kg); b = massa da amostra seca a 105°C (kg); e c = volume do cilindro (m^{-3}).

Para a macroporosidade empregou-se:

$$Mac = Pt - Mic$$

, em que: Mac = macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); Pt = porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); e Mic = microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).

c) Densidade do solo (Ds)

Para o cálculo, considerou-se o volume do anel volumétrico ($v = \pi \cdot r^2 \cdot h$). Posteriormente, aferiu-se a massa do cilindro junto com o solo, acondicionou-se o conjunto na estufa a 105° C por 24 horas, e avaliou-se a massa seca em balança analítica (EMBRAPA, 2017). A densidade do solo foi calculada pela fórmula:

$$Ds = \frac{m}{v}$$

, no qual: Ds = densidade do solo; m = massa do solo (kg) da amostra seca a 105 °C; v = volume do anel (dm^3).

d) Resistência à penetração (RP)

Foi determinada nas camadas de 0-40 cm, com duas amostragens por ponto, utilizando um penetrômetro de impacto Planalsucar-Stolf, modelo IAA. A avaliação foi realizada quatro dias após incidência pluviométrica. Os dados foram transformados em RP com o uso da fórmula proposta por Stolf (1991).

$$RP = \left[\frac{Mg + mg + \left(\frac{M}{M + m} \times \frac{Mgxh}{x} \right)}{A} \right] x$$

, no qual: RP = resistência do solo à penetração (MPa); M: massa do êmbolo, 4 kg (Mg^{-4} kgf); m: massa do aparelho sem êmbolo; g: aceleração da gravidade; h: altura de queda do êmbolo (40 cm); x: penetração da haste do aparelho, cm/impacto; A = área da base do cone de penetração (cm^2).

e) Umidade gravimétrica do solo (Ug)

Acondicionou-se a massa do solo em latas de alumínio já numeradas e pesadas. Em seguida, a massa do conjunto foi aferida e transferida para a estufa a 105° C por 24 horas. Posteriormente, o conjunto foi retirado da estufa, acondicionado em dessecador e

aferido a massa novamente.

Para o cálculo utilizou-se a equação:

$$\text{Umidade gravimétrica (kg.kg}^{-1}\text{): } U_g = \frac{(a-b) \cdot 100}{c}$$

, em que: a = massa da amostra úmida (kg); b: peso da amostra seca (kg); c: volume da amostra (dm³).

2.4 Análise geoestatística

Os dados foram analisados em três etapas: I) estatística descritiva; II) semivariograma e III) mapas das variáveis analisadas, produzidos através da krigagem. Para a construção do semivariograma e análise da estrutura espacial para as variáveis, utilizou-se o software GS + 7.0 (Gamma Software Design).

A semivariância e os ajustes dos dados do semivariograma experimental foram utilizados para avaliar a dependência espacial das variáveis (GREGO; VIEIRA, 2005), em que se utilizou a seguinte equação:

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

, em que: N (h) = número de pares de valores medidos; Z (xi) e Z (xi + h); h = vetor (espaço lag); Z = atributos físicos do solo; xi e xi + h: definidos de acordo com a localização geográfica das amostras feitas no campo.

Foram testados os modelos de semivariogramas: (a) esférico, $\gamma^*(h) = C_0 + C_1 [1,5 (h/a) - 0,5 (h/a)^3]$ para $(0 < h < a)$ e $\gamma^*(h) = C_0 + C_1$ para $h \geq a$; (b) gaussiano, $\gamma^*(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3h^2/a^2)]$ para $(0 < h < d)$, em que d é a distância máxima na qual o semivariograma é definido. O ajuste dos semivariogramas possibilitou definir os valores do efeito pepita (C0), do alcance (A) e do patamar (C + C0).

O modelo ajustado dos semivariogramas foi escolhido conforme a menor soma do quadrado dos resíduos (SQR), no maior coeficiente de determinação (R²) e maior grau de dependência espacial (GDE). Nesse sentido, o GDE pode ser classificado em: dependência espacial fraca ($GDE \leq 25\%$); moderada ($25\% < GDE \leq 75\%$) e forte ($GDE > 75\%$) (ROBERTSON, 2008). O GDE é calculado conforme a seguinte equação:

$$GDE = \left[\frac{C}{C + C_0} \right] \times 100$$

Por fim, para os atributos que apresentaram dependência espacial, foi aplicado a krigagem ordinária para a interpolação (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Por meio desse método, foi possível elaborar mapas de isolinhas, definindo o padrão espacial das variáveis estudadas, conforme a equação.

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(X_i)$$

em que: $Z^*(x_0)$ = variável interpolada; λ_i = peso da i -ésima localidade vizinha; $Z(x_i)$ = valor da variável para a i -ésima localidade; e N = número de localidades vizinhas empregadas para interpolação do ponto (PAZ-GONZÁLEZ et al. 2000).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros da estatística descritiva dos componentes de produtividade de soja e os atributos físicos do solo são apresentados na Tabela 1. Observou-se que os dados da mediana e média foram semelhantes para todas as variáveis analisadas, demonstrando uma distribuição simétrica para as medidas de tendência central.

A variabilidade dos atributos pode ser classificada segundo o coeficiente de variação (CV) (PIMENTEL GOMES; GARCIA, 2002). As variáveis NGV, MMG, PT, Mic e Ds apresentaram baixos coeficientes de variação (<10%), enquanto as variáveis Mac, RP e Ug (na profundidade de 0-10 cm e 20-40 cm, respectivamente) demonstraram CV muito altos (>30%). Os demais atributos foram classificados de acordo com os seguintes percentuais: médio (10 % < CV < 20 %) e alto (20 % < CV < 30 %).

A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Kolmogorov-Sminorv ao nível de 5% de significância, em que apenas a Ug, na profundidade de 20-40 cm, foi considerada como não normal. Valores de curtose próximos a zero indicam uma distribuição normal para os dados (SCHAFFRATH et al., 2008).

Tabela 1. Parâmetros da estatística descritiva dos componentes de produtividade de soja e atributos físicos do solo em um Latossolo Vermelho.

Variáveis	Min	Max	Mediana	Média	DP	CV (%)	Curtose
Componentes de produtividade de soja							
Vagens/planta	47.9	104.9	68.13	68.1	11.2788	16,5	0.223
Grãos/vagem	2.01	2.38	2.23	2.24	0.0754	3,3	0.288
PG	3.10	7.40	4.64	4.43	0.8492	18,2	0.698
MMG	104.6	174.3	127.06	126.779	11.0763	8,7	3.566
Atributos físicos do solo							
PT	0.36	0.48	0.42	0.42	0.0280	6,5	-0.35
Micro	0.27	0.38	0.32	0.32	0.0248	7,5	-0.264
Macro	0.03	0.20	0.10	0.09	0.0374	36,6	0.107

Ds	1.36	1.88	1.62	1.62	0.1105	6,7	-0.029
RP 0-10 cm	1.03	4.41	2.44	2.37	0.8610	35,1	-0.566
RP 10-20 cm	1.81	6.76	4.05	3.93	0.9159	22,6	1.017
RP 20-30 cm	2.19	5.48	3.67	3.64	0.6108	16,6	0.865
RP 30-40 cm	2.14	3.72	2.96	2.97	0.3243	10,9	0.702
Ug (0-20)	0.04	0.12	0.09	0.09	0.0189	20,9	-0.628
Ug (20-40)	0.014	0.27	0.08	0.08	0.0281	31,8	29.596

*Distribuição normal ao nível de significância de 5% pelo teste de Kolmogorov-Sminorv. PG = produtividade; MMG = peso de mil grãos; PT = porosidade total; Ds = densidade do solo; RP = resistência à penetração; Ug = umidade gravimétrica; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação.

A produtividade média da soja foi de $4,43 \text{ t ha}^{-1}$, com desvio padrão de 0,84 e CV de 18,2%, evidenciando média homogeneidade nos dados. O valor mínimo correspondeu a $3,1 \text{ t ha}^{-1}$, e o máximo, $7,4 \text{ t ha}^{-1}$, com amplitude elevada de $4,3 \text{ t ha}^{-1}$ (correspondendo a 71,6 sacos). A produtividade média obtida neste estudo foi superior a encontrada por Rosa Filho et al. (2009) e Bottega et al. (2013), assim como a média piauiense de $3,3 \text{ t ha}^{-1}$, na safra 2019/20 (CONAB, 2020). A alta produtividade mencionada nesta pesquisa está ligada diretamente à elevada média no NVP.

Em relação à MMG, a média foi de 126,7 g, em que dados oscilaram entre 104,6 a 174,3 g. Valores superiores foram obtidos por Pires (2002), Moreira et al. (2008) e Dalchiavon et al. (2011), cujos dados foram 181,0; 205,8 e 144,1 g, respectivamente. As altas produtividades observadas por esses autores estiveram em função dos expressivos valores de MMG.

Constatou-se que os dados da Ds variaram entre 1,36 e $1,88 \text{ kg m}^{-3}$, números superiores aos encontrados em Latossolos Vermelhos distroférico (FARACO et al., 2008; SCHAFFRATH et al., 2008). Nesta pesquisa, a densidade média ($1,62 \text{ kg m}^{-3}$) foi superior ao valor crítico de $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ para solos argilosos (REINERT; REICHERT, 2006), indicando compactação do solo.

Para a porosidade total, a média ficou situada em $0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, valor abaixo do ideal de $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (KIEHL, 1979). sendo os resultados semelhantes aos obtidos por MONTANARI et al. (2013). Áreas em Sistema de Plantio Direto, geralmente, apresentam PT menor que os solos em cultivos convencionais, devido ao não preparo periódico do solo e ao tráfego das máquinas e implementos somados ao longo dos anos (COSTA, 2022).

A macroporosidade indicou resultados altos (média de $0,99 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), uma vez que valores ideais estão situados entre $0,20$ e $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (KIEHL, 1979). Valores superiores a estes comprometem a capacidade de retenção de água e resultados inferiores a $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ prejudicam o crescimento das raízes e aeração do solo (MEGDA et al., 2008). Os dados da microporosidade oscilaram entre $0,27$ e $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, com valor médio de $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Em relação à resistência à penetração, o valor de $2,0 \text{ MPa}$ é considerado como o limite crítico para o crescimento e desenvolvimento normal do sistema radicular (BEUTLER et al. 2001). As médias oscilaram entre $2,37$ a $3,93 \text{ MPa}$, resultados superiores ao valor crítico, em todas as profundidades analisadas, indicando compactação dessas camadas e menor exploração do solo pelo sistema radicular. Constatou-se a redução na variabilidade (CV) conforme aumentou-se a profundidade do solo, isto pode ser explicada devido ao uso de cobertura vegetal e às hastes sulcadoras da semeadora, ao depositar o adubo nas camadas iniciais. Apesar dos valores de RP, esta variável não influenciou negativamente a produtividade média da cultura, corroborando com Cardoso et al. (2006) e Marasca et al. (2011) e

Além disso, a umidade gravimétrica apresentou médias variando de $0,09$ a $0,08 \text{ kg kg}^{-1}$ para as camadas $0-20$ e $20-40 \text{ cm}$, respectivamente. O valor de $0,20 \text{ kg kg}^{-1}$ é apontado como o ideal para a aferição da RP, uma vez que é inversamente proporcional à umidade do solo (MARTINS, 2002). Portanto, inferiu-se que os valores elevados de RP têm relação direta com a baixa Ug. Valores superiores ao desta pesquisa foram obtidos por Rosa Filho et al. (2009), em que a Ug apresentou valores de $0,225$ e $0,24 \text{ kg kg}^{-1}$, e por Dalchiavon et al. (2011), com as médias variando de $0,190$ a $0,192 \text{ kg kg}^{-1}$.

A análise das variáveis demonstrou a variabilidade espacial para os atributos estudados, com altos graus de correlação espacial, exceto o NVP, Pt Mac, Ds e Ug (camada de $0-20 \text{ cm}$) que expressaram efeito pepita puro (Tabela 2). Isto aconteceu devido ao valor do efeito pepita ser igual ao patamar, em qualquer distância entre os pontos (distribuição espacial não aleatória), além da quantidade de pontos amostrais serem insuficientes para detectar a dependência nestas variáveis (GUIMARÃES, 2004).

Tabela 2. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais dos componentes de produtividade de soja e atributos físicos do solo em um Latossolo Vermelho.

Variável	Modelo	C_0	$C_0 + C$	a (m)	GDE (%)	R^2
----------	--------	-------	-----------	-------	------------	-------

Vagens/planta	Linear	274.07	274.07	130.87	0.0	0.320
Grãos/vagem	Gaussiano	0.00001	0.0061	64.60	99,8	0.602
PG	Esférico	0.001	0.669	42.2	99,9	0.586
MMG	Linear	23.07	143.32	130.87	83,9	0.623
PT	Linear	0.000915	0.000915	130.87	0.0	0.392
Micro	Gaussiano	0.000001	0.000672	68.93	99,9	0.877
Macro	Linear	0.001507	0.001507	130.87	0.0	0.111
Ds	Linear	0.019259	0.019259	130.87	0.0	0.301
RP 0-10 cm	Gaussiano	0.001	0.7840	45.37	99,9	0.621
RP 10-20 cm	Gaussiano	0.001	0.837	67.03	99,9	0.506
RP 20-30 cm	Gaussiano	0.001	0.378	47.63	99,7	0.683
RP 30-40 cm	Gaussiano	0.001	0.1012	69.10	99,9	0.550
Ug 0-20 cm	Linear	0.000386	0.000386	130.87	0.0	0.599
Ug 20-40	Gaussiano	0.000001	0.000687	47.11	99,9	0.678

PG = produtividade; MMG = peso de mil grãos; PT = porosidade total; Ds = densidade do solo; RP = resistência à penetração; Ug = umidade gravimétrica; Co = efeito pepita; C+ Co = patamar; a: alcance; R² = coeficiente de determinação; VC = coeficiente de determinação da validação cruzada; GDE = grau de dependência espacial.

Ao analisar os semivariogramas, notou-se que o modelo Gaussiano apresentou os melhores ajustes para a maior parte das variáveis analisadas, seguido pelo modelo linear. A única exceção foi para os dados de produtividade, no qual o modelo esférico foi o mais indicado.

Os dados do efeito pepita para quase todas as variáveis foram baixos, com exceção do NVP e MMG que apresentaram os valores de 274,07 e 23,07, respectivamente. O efeito pepita apresenta variabilidade inexplicada, sendo uma medida obtida a partir da proporção do efeito pepita sobre o patamar. Tal variação pode ser oriunda das escalas de amostragem inferiores ao intervalo amostrado entre os pontos (30x30 m) ou à resultante dos erros durante as análises.

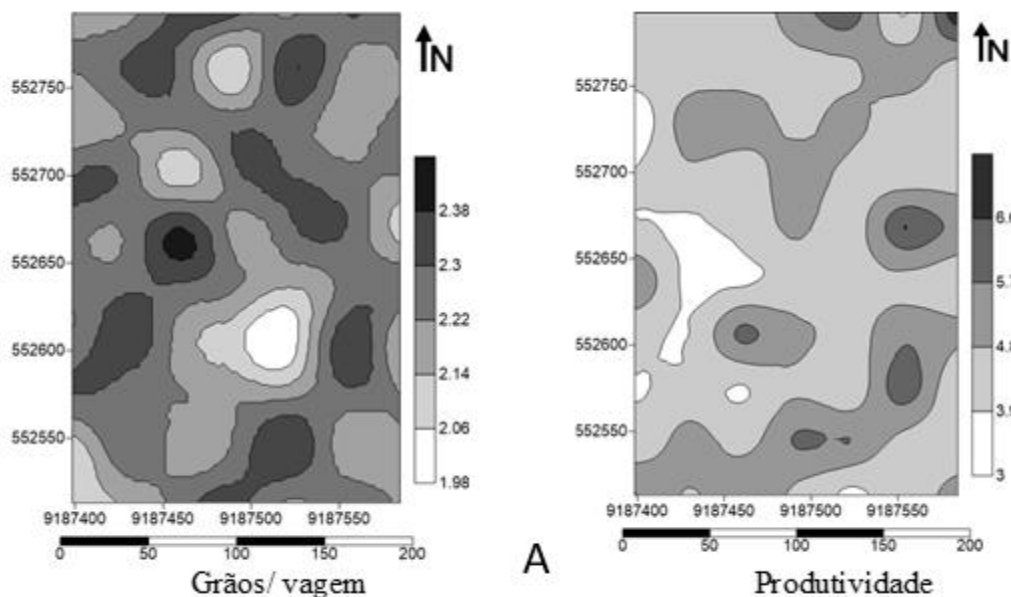
O alcance (a) é definido como a distância máxima em que os atributos do solo ainda permanecem correlacionados espacialmente. Nisso, o NVP, MMG, PT, Mac, Ds e Ug (0-20 cm) apresentaram alcances semelhantes cujo valor foi correspondente a 130,87 m; por outro lado, a produtividade demonstrou o menor alcance, com o valor de 42,2 m, sendo importante ressaltar que o alcance não pode ser menor que este valor. O alcance apresenta grande destaque à agricultura de precisão, uma vez que fornece subsídios para a aplicação de insumos a taxa variável (DALCHIAVON *et al.*, 2011).

As variáveis NVP, PT, Mac, Ds e Ug (0-20 cm) apresentaram grau de dependência espacial fraco ($GDE < 25\%$), enquanto as demais demonstraram dependência espacial forte ($GDE > 75\%$) (ROBERTSON, 2008). A forte dependência espacial pode evidenciar que a variabilidade dos atributos do solo decorre das características inerentes ao solo, como o processo de formação e a composição mineralógica (IQBAL et al. 2005).

O coeficiente de determinação (R^2) dos modelos ajustados para microporosidade, resistência à penetração na camada 20-30 cm e umidade gravimétrica (20-40 cm) apresentaram os maiores valores, correspondendo a 0,87; 0,68 e 0,67, respectivamente. Por outro lado, as variáveis macroporosidade, densidade do solo e número de vagens/planta demonstraram os menores resultados: 0,11; 0,301 e 0,32, respectivamente.

A fim de observar as variáveis que apresentaram dependência espacial, foram construídos mapas de isolinhas, obtidos por meio da krigagem, em que adotou-se o padrão da estrutura espacial semelhante, em todas as direções. Para o número de grãos/vagem (Figura 1A), os maiores valores (2,3 a 2,38 grãos) foram encontrados na região central, apresentando um aumento de 16,8% quando comparado com a região com menor valor (1,98 grãos), situada em uma pequena macha no centro do campo.

Figura 1. Mapas de isolinhas da distribuição espacial para o número de grãos/vagem (A) e produtividade de grãos (B) de um Latossolo Vermelho.

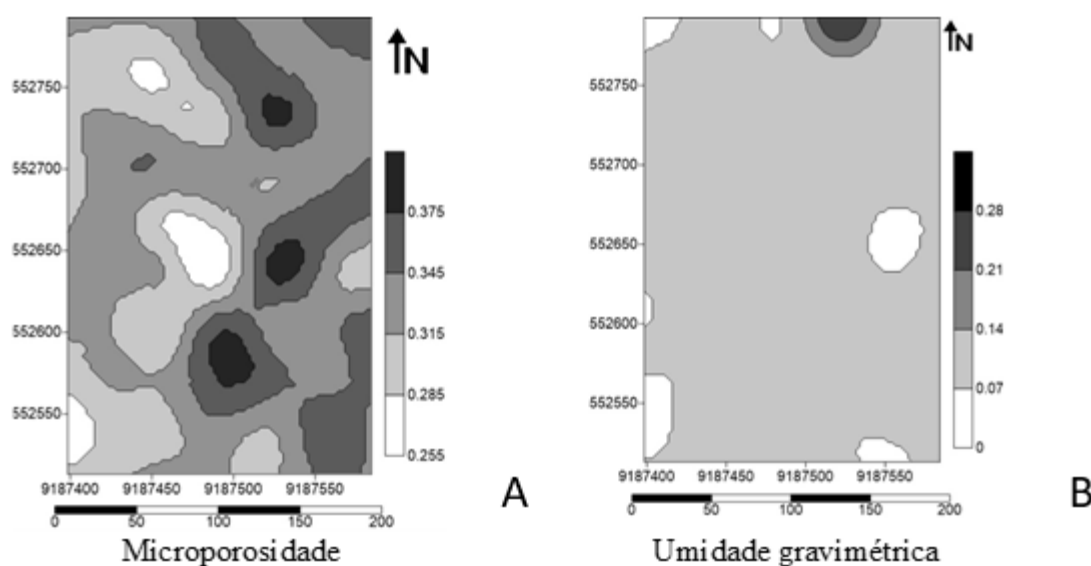


Em relação à produtividade (Figura 1B), a maior parte da área apresentou valores intermediários (3,9 a 4,8 t ha⁻¹). O menor resultado foi destacado a leste da área

experimental, enquanto os maiores dados (5,7 a 6,6 t ha⁻¹) foram apontados em pequenas porções no extremo norte, oeste e sudoeste do mapa. Uma das maiores vantagens no uso de mapas confeccionados com a krigagem é a localização exata das áreas com menores produtividades (MONTANARI *et al.*, 2012). Desse modo, é possível realizar as práticas de manejo necessárias nas áreas com produtividades aquéns.

Os valores para microporosidade (Figura 2A) variaram de 0,255 a 0,375 m³ m⁻³, no qual os maiores resultados (0,345 a 0,375 m³ m⁻³) foram encontrados da porção nordeste até ao sudeste da área. Por outro lado, os menores dados (0,255 a 0,345 m³ m⁻³) foram observados na região mais central e oeste do mapa.

Figura 2. Mapas de isolinhas da distribuição espacial para microporosidade (A) e umidade gravimétrica (B) de um Latossolo Vermelho.

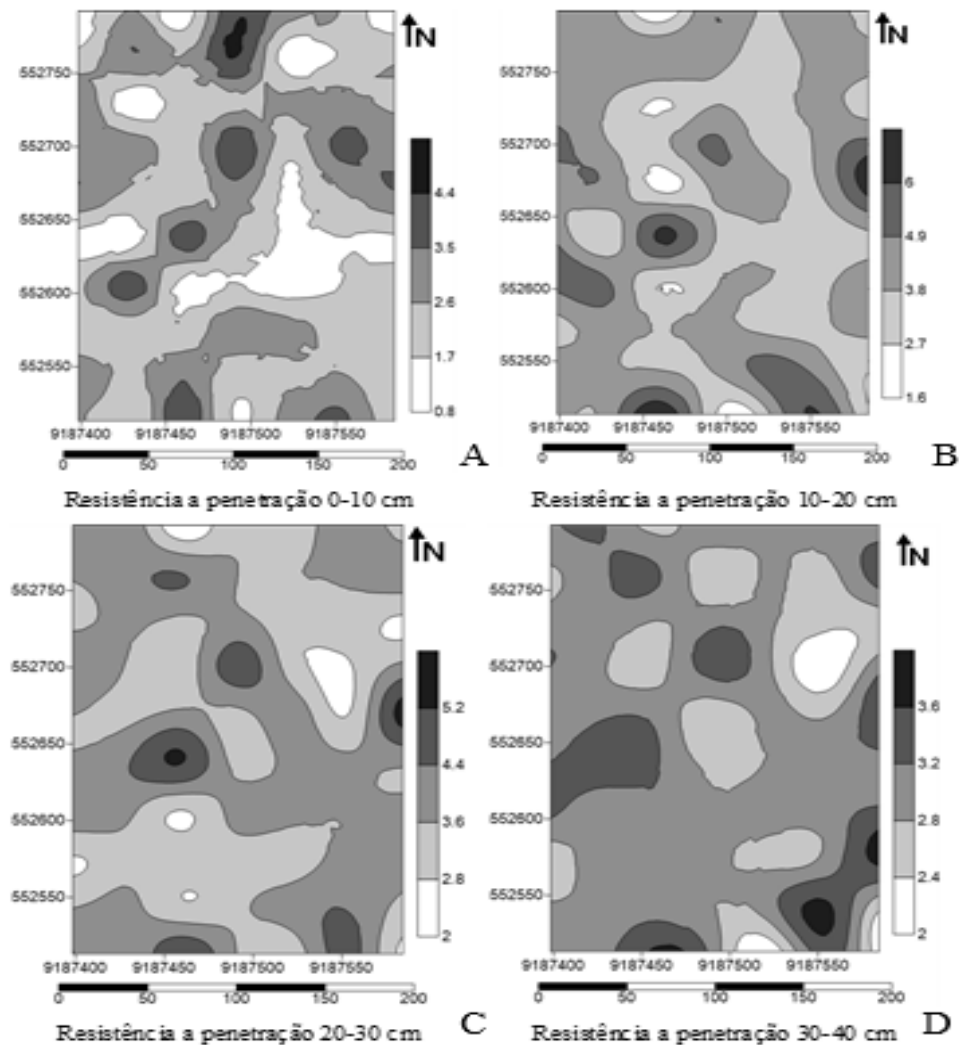


Para a umidade gravimétrica (Figura 2B), os dados oscilaram de 0 a 0,28 kg. kg⁻¹, em que o valor de 0,07 kg. kg⁻¹ abrangeu a maior parte do campo experimental, salvo alguns pontos com resultados inferiores (0 kg. kg⁻¹) ao leste, sudeste, sudoeste e noroeste da área. Os maiores valores (0,21 a 0,28 kg. kg⁻¹) foram percebidos em uma pequena área, ao extremo norte do mapa.

Em relação à resistência a penetração na profundidade de 0-10 cm, percebeu-se uma pequena mancha ao norte do campo experimental, em que a RP foi caracterizada como muito alta (BEUTLER *et al.* 2001), no valor de 4,4 MPa (Figura 3A). Uma vez que o nível crítico a RP é de 2 MPa, grande parte do solo nesta camada apresentou compactação, tornando-se um fator limitante ao desenvolvimento radicular (BETIOLI JUNIOR *et al.*,

2014). Em via oposta, o menor valor (0,8 Mpa) foi observado, principalmente, na região norte e oeste do mapa.

Figura 3. Mapas de isolinhas da distribuição espacial da resistência a penetração nas profundidades 0 - 10 cm (A); 10 - 20 cm (B); 20 - 30 cm (C); 30 - 40 cm (D) de um Latossolo Vermelho.



Observando a RP na profundidade de 10-20 cm, foi observado o valor de 6 MPa, definido como muito alto, em algumas manchas ao leste, sul e na região central. Este valor, por ser muito alto, ocasiona severas restrições ao crescimento e desenvolvimento radicular. Salvo algumas pequenas porções que apresentaram a resistência de 1,6 MPa (RP moderada), esta camada de solo encontrou-se sob alto grau de compactação.

Analisando a camada de 20-30 cm, a maior parte da região encontrou-se sob a RP de 2,8 a 3,6 Mpa (RP alta), enquanto somente uma pequena mancha a oeste do campo demonstrou resistência muito alta cujo valor correspondeu a 5,2 MPa.

Em relação à profundidade de 30-40 cm, foram observadas duas manchas com o limite de 2 MPa, na região nordeste e sul da área; resistência alta em duas pequenas porções ao sudeste, com 3,6 MPa (Figura 3D). A maior parte do campo experimental apresentou a RP de 2,4 a 2,8 Mpa.

4 CONCLUSÕES

O número de grãos/vagem, produtividade, massa de mil grãos, microporosidade, resistência à penetração (em todas as profundidades) e a umidade gravimétrica (20-40 cm) demonstraram forte dependência espacial;

O número de vagens/planta, porosidade total, macroporosidade, densidade e umidade gravimétrica (0-20) apresentaram o efeito pepita puro;

O modelo de variograma gaussiano apresentou os melhores ajustes para microporosidade, resistência à penetração (20-30 cm) e umidade gravimétrica (20-40 cm), com os coeficientes de determinação de 0,87; 0,68 e 0,67, respectivamente;

Os altos valores de resistência à penetração, em todas as profundidades, não restringiram a produtividade de grãos de soja.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, E. A. et al. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Applied Research & Agrotechnology*, v. 5, n. 1, p. 187-206, 2012.
- BEUTLER, A.N. et al. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa-MG, v. 25, n. 1, p. 167-177, 2001.
- BETIOLI JUNIOR, E. et al. Aeration condition of a clayey Oxisol under long-term no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 990-999, 2014.
- BOTTEGA, E. L. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica** - Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 1- 9, 2013.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal, Madison**, v. 58, n. 5, p.1240-1248, 1994.
- CARDOSO, E. G. et al. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 493-501, 2006.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira. **11º Levantamento de Grãos Safra 2019/2020**. Brasília: Conab, 2020

COSTA, C. M. S. **Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo sob a cultura da soja no Cerrado em sistema de plantio direto**. 2022. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2022.

DALCHIAVON, F. C. et al. 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.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, v. 120, n. 4, p. 227-239, 2004.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. **Dinâmica agrícola no Cerrado: Análises e projeções**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2020.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo** / Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2017.

FARACO, M. A. et al. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.32, p.463-476, 2008.

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.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. 2004. 76 p.

GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial de atributos de um latossolo vermelho escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional**. 2000. 89 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2000.

IQBAL, J. et al. Análise da variabilidade espacial das propriedades físicas dos solos aluviais. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 4, pág. 1338-1350, 2005.

JONES, C. A. Effect of Soil Texture on Critical Bulk Densities for Root Growth1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, n. 6, p. 1208-1211, 1983.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo, Agrônômica Ceres. 264p. 1979.

LI, L. et al. Soil physical qualities in an Oxic Paleustalf under different tillage and stubble management practices and application of S theory. **Soil and Tillage Research**, v. 113, n. 2, p. 82-88, 2011.

LIMA, I. M. A.; ARAÚJO, M. C.; BARBOSA, R. S. Avaliação das propriedades físicas do solo em sistemas silvipastoris, região centro-norte, estado do Piauí. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Campina Grande-PB, v. 9, n. 1, p. 117-124, 2013.

MANZIONE, R. L.; RODRIGUES, J. B. T.; ZIMBACK, C. R. L. Análise espacial multivariada na avaliação de parâmetros químicos do solo. In: BALASTREIRE, L. A. **Avanços na Agricultura de Precisão no Brasil no período de 1999-2001**. Piracicaba, 2002. 347 p.

MARASCA, I. et al. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água em sistema de plantio direto na cultura da soja. **Bioscience Journal**, p. 239-246, 2011.

MARTINS, C. B. **Análise da resistência mecânica à penetração de um Latossolo Vermelho distrófico em função do grau de umidade**. 2002. 46 f. Monografia (Trabalho de Graduação) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

MEGDA, M. M. et al. Correlação linear e espacial entre a produtividade de feijão e a porosidade de um Latossolo Vermelho de Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.781-788, 2008.

MONTANARI, R. et al. The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agriculture**, v. 35, n.5, p. 1-11, 2012.

MOREIRA, A. A. et al. Cultivo da soja (*Glycine max*(L.) Merrill) submetido à adubação foliar com cálcio. **Perquirere**, n. 5, jun. 2008.

MZUKU, M. et al. Spatial Variability of Measured Soil Properties across Site-Specific Management Zones. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 5, p. 1572-1579, 2005/9 2005.

PAZ-GONZÁLEZ, A. et al. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. **Geoderma**, v. 97, n. 3, p. 273-292, 2000.

PEREIRA, F. S. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho submetido a sistemas de manejo avaliado pelo índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 87-95, 2011.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações pra uso de aplicativos. Piracicaba: Fealq, 309 p. 2002.

PIRES, J. L. F. **Estimativa do potencial produtivo da soja e variabilidade espacial de área de produção**. 2002. 160 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia)–Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedade físicas do solo**. Santa Maria: Departamento de Solo, UFSM. 18 p. 2006.

REICHERT, J. M. et al. Preparo mecanizado da terra na Amazônia oriental em sistemas de pousio baseados em florestas sem fogo como alternativas às práticas de corte e queima: propriedades hidráulicas e mecânicas do solo. **Agricultura, ecossistemas e meio ambiente**, v. 192, p. 47-60, 2014.

ROBERTSON, G. P. GS+: Geoestatistics for the environmental sciences - GS+ User's Guide. **Plainwell**: Gamma Desing Software, 2008. 152p.

ROLDÁN, A. et al. No-tillage, crop residue additions, and legume cover cropping effects on soil quality characteristics under maize in Patzcuaro watershed (Mexico). **Soil and Tillage Research**, v. 72, n. 1, p. 65-73, 2003.

ROSA FILHO, G. et al. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 283-293, 2009.

SCHAFFRATH, V. R. et al. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1369-1377, 2008.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística**: conceitos e aplicações. São Paulo-SP: Oficina de Textos, 2013. 215 p.