



## VARIABILIDADE ESPACIAL DE PARÂMETROS FÍSICOS DO SOLO EM ÁREA DE PIVÔ E CORRELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DO MILHO PARA SILAGEM

C.M.P. Vaz<sup>1</sup>, R. Y. Inamasu<sup>1</sup>, K.E.L. Santos<sup>2</sup>, G.M. Bettiol<sup>2</sup>, A.L. Andrade<sup>1</sup>, A.C.C. Bernardi<sup>2</sup>

(1) Embrapa Instrumentação, Rua Quinze de Novembro, 1452, 13560-970, São Carlos, SP, carlos.vaz@embrapa.br, ricardo.inamasu@embrapa.br, anesia.lima21@hotmail.com

(2) Embrapa Pecuária Sudeste, Rodovia Washington Luiz, Km 234, 13560-970 São Carlos, SP, alberto.bernardi@embrapa.br, giovanna.bettiol@embrapa.br

**Resumo:** O conhecimento da variabilidade espacial das propriedades do solo é útil para subsidiar estratégias de tomada de decisão no manejo das culturas. O objetivo deste trabalho foi caracterizar a variabilidade espacial dos parâmetros físicos do solo em área cultivada com milho para silagem (18 ha), com amostragem em grade regular de 40 pontos georreferenciados. Foram determinados os parâmetros argila, silte, areia, umidade ( $\theta$ ), densidade do solo ( $D_s$ ) e das partículas ( $D_p$ ), resistência do solo à penetração (RP), condutividade elétrica (CE) e água disponível (AD) entre -1500 e -5 kPa. Esses parâmetros foram correlacionados com a produtividade do milho (média de três safras) e a análise da correlação linear indicou influência significativa do teor de silte ( $r=0,57$ ) e da  $D_p$  ( $r=0,53$ ) na produtividade, devido à influência direta desses parâmetros no armazenamento da água no solo. Isso foi comprovado pela dados de AD obtidos pelo modelo de pedotransferência de Arya e Paris, com os dados de granulometria e  $D_s$ . A maioria das variáveis apresentou forte dependência espacial possibilitando a obtenção de mapas por krigagem. Utilizando-se os dados preditos pelos semivariogramas obteve-se correlações aumentadas entre a produtividade e AD ( $r=0,81$ ), silte ( $r=0,68$ ) e  $D_p$  ( $r=0,65$ ).

**Palavras-chave:** geoestatística, parâmetros físicos do solo, milho, krigagem

### SPATIAL VARIABILITY OF SOIL PHYSICAL PARAMETERS IN CENTRAL-PIVOT AND CORRELATIONS WITH CORN YIELD

**Abstract:** Characterizing the spatial variability of soil properties can be very useful in decision-make crop management strategies. The objective of this study was to characterize the spatial variability of soil physical parameters in a corn production system for ensilage (18 ha), performed in a regular grid of 40 georeferenced points. Clay, silt, sand, water content ( $\theta$ ), bulk density ( $D_s$ ), particle density ( $D_p$ ), penetration resistance (PR), electrical conductivity (EC), and water holding capacity (SWC) between -1500 kPa and -5 kPa were determined. These parameters were correlated with the average production of 3 years. Results showed a significant influence of the silt fraction ( $r=0.57$ ) and the  $D_p$  ( $r=0.53$ ) in the corn yield, due to the direct influence of these parameters in the SWC. This was confirmed by data estimated using the pedotransfer model of Arya and Paris with the measured particle size distribution and  $D_s$  data. Most of the measured parameters presented strong spatial dependence allowing obtaining maps by krigging. Using predict data by the semivariogram improved the correlations between SWC ( $r=0.81$ ), silt (0.68) and  $D_p$  ( $r=0.65$ ).

**Keywords:** geostatistics, soil physical parameters, corn, krigging.

## 1. Introdução

O potencial produtivo das culturas é determinado pelos fatores edafo-climáticos e também pela espécie e/ou cultivar. O solo pode influenciar o crescimento vegetal pelo fornecimento de água, nutrientes e oxigênio. Por isso, entre os fatores necessários para se alcançar altas produtividades estão os atributos físicos do solo. Para isso, os solos deverão apresentar resistência favorável ao crescimento radicular e também à movimentação de água e gases. De acordo com Cambardella e Karlen (1999), as propriedades do solo podem variar espacialmente dentro de um mesmo talhão até em escala regional, em função de fatores intrínsecos, como a formação do solo, e extrínsecos, como as práticas de manejo, adubação e rotação de culturas. Estas variações das propriedades do solo devem ser monitoradas para se compreender os efeitos do uso da terra e dos sistemas de gestão dos solos. Sob o ponto de vista agrônomo, os principais indicadores físicos de qualidade do solo são a textura, estrutura, resistência à penetração, enraizamento e armazenamento de água.

O objetivo deste trabalho foi de se avaliar a influência da variabilidade espacial dos parâmetros físicos do solo no rendimento do milho cultivado para silagem em área com irrigação por pivô central, por meio da corre-

lação direta entre os parâmetros físicos medidos e os dados de rendimento do milho, bem como dos seus valores estimados por análise geoestatística e krigagem.

## 2. Material e Métodos

O estudo foi conduzido na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos, em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico textura média (CALDERANO et al., 1998). As amostragens foram realizadas em grade regular de 40 pontos georreferenciados (Figura 1). Foram avaliados os parâmetros densidade ( $D_s$ ) e umidade do solo ( $\theta$ ) pelo método do anel volumétrico, resistência do solo à penetração (RP) com penetrômetro (Kamaq), teores de argila, silte, areia, densidade das partículas ( $D_p$ ) pelo analisador granulométrico, e condutividade elétrica no extrato de saturação (CE). A curva de retenção da água foi pelo modelo de Arya e Paris (VAZ et al., 2005). Os modelos de semivariograma foram ajustados pelo método da krigagem utilizando o programa VESPER (MINASNY et al., 2005) e os mapas estimados com o ArcGIS 10.1 (ESRI, 2009). Foram realizados estudos de correlação entre os parâmetros físicos medidos e a produtividade de milho (média de três safras), bem como pelos dados estimados pela geoestatística. Para tanto, após obtenção dos mapas por krigagem, foram amostrados valores nas mesmas localizações em uma grade amostral virtual de 1000 pontos, distribuídos regularmente sobre o conjunto de dados preditos para a área de estudo, conforme sugerido por Perez et al. (2014).

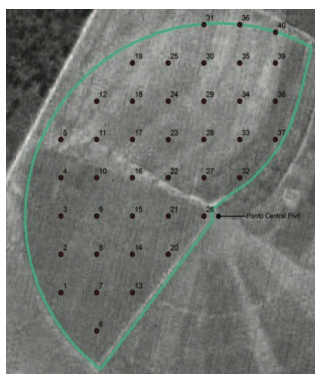


Figura 1. Pontos de amostragem da área de milho para silagem na Embrapa Pecuária Sudeste.

## 3. Resultados e Discussão

A estatística descritiva para as variáveis analisadas é apresentada na Tabela 1. Valores de assimetria e curtose entre 0 e 3 indicam distribuição normal dos dados, sendo esta determinação importante pois a krigagem apresenta melhores resultados quando a normalidade dos dados é satisfeita (CARVALHO et al., 2002). Somente as variáveis argila, areia, umidades a  $-5\text{kPa}$  ( $\theta_{-5\text{kPa}}$ ) e  $-1500\text{kPa}$  ( $\theta_{-1500\text{kPa}}$ ), densidade de partículas ( $D_p$ ) e produtividade média apresentaram coeficientes de variação (CV) baixos ( $<10\%$ ), de acordo com a classificação sugerida por Pimentel-Gomes (1984). As variáveis água disponível (AD) e água do solo ( $\theta$ ) apresentaram CVs médios (entre 10% e 20%) e as demais apresentaram CVs altos.

Tabela 1. Estatística descritiva dos parâmetros físicos do solo e produtividade do milho (3 anos).

| variável   | média | DP    | mínimo | máximo | CV | curtose | assimetria | N  |
|--|-------|-------|--------|--------|----|---------|------------|----|
| argila ( $\text{g kg}^{-1}$ )                              | 379   | 32    | 334    | 487    | 9  | 2,8     | 1,5        | 40 |
| silte ( $\text{g kg}^{-1}$ )                               | 40    | 11    | 22     | 79     | 29 | 2,2     | 0,8        | 40 |
| areia ( $\text{g kg}^{-1}$ )                               | 581   | 37    | 461    | 643    | 6  | 3,5     | -1,6       | 40 |
| $\theta_{1500\text{kPa}}$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) | 0,158 | 0,014 | 0,127  | 0,202  | 9  | 1,5     | 0,7        | 40 |
| $\theta_{5\text{kPa}}$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )    | 0,201 | 0,016 | 0,168  | 0,248  | 8  | 1,3     | 0,4        | 40 |
| AD ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )                        | 0,043 | 0,008 | 0,022  | 0,069  | 18 | 2,4     | 0,4        | 40 |
| CE ( $\text{dS m}^{-1}$ )                                  | 0,61  | 0,30  | 0,28   | 1,95   | 49 | 9,9     | 2,7        | 40 |
| $D_s$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )                               | 2,70  | 0,02  | 2,67   | 2,75   | 1  | 1,4     | 0,9        | 40 |
| RP <sub>0-30cm</sub> (MPa)                                 | 5,2   | 1,9   | 2,2    | 10,2   | 36 | 0,04    | 0,8        | 40 |
| RP <sub>30-60cm</sub> (MPa)                                | 4,8   | 1,565 | 2,463  | 8,5    | 33 | -0,6    | 0,5        | 40 |
| $\theta$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )                  | 0,16  | 0,03  | 0,12   | 0,25   | 19 | 1,3     | 1,1        | 40 |
| produtividade ( $\text{ton ha}^{-1}$ )                     | 13995 | 1327  | 11627  | 16705  | 9  | -0,9    | -0,07      | 40 |

DP: desvio padrão, CV: coeficiente de variação, N: número de pontos,  $\theta_{1500\text{kPa}}$ : umidade no potencial de  $-1500\text{kPa}$ ,  $\theta_{5\text{kPa}}$ : umidade em  $-5\text{kPa}$ , AD: teor de água disponível, CE: condutividade elétrica,  $D_p$ : densidade das partículas, RP: resistência à penetração,  $\theta$ : umidade do solo

Os coeficientes de ajuste dos modelos de semivariogramas obtidos para todos os parâmetros medidos são apresentados na Tabela 2. O modelo esférico foi o que melhor se ajustou aos variogramas experimentais para os parâmetros AD,  $\theta_{-5kPa}$ ,  $\theta_{-1500kPa}$ ,  $D_p$ ,  $RP_{30-60cm}$ , condutividade elétrica, umidade do solo e média da produtividade em 3 anos. No caso da argila, silte, areia e resistência à penetração na camada 0 a 30 cm os melhores ajustes foram obtidos com o modelo exponencial. A dependência espacial apresentada na Tabela 2 foi estabelecida com base nos critérios de Cambardella et al. (1994), que é considerada forte quando o efeito pepita é maior ou igual a 25% do patamar, moderada entre 26 e 75%, e fraca quando acima de 76%. Dessa forma apenas as variáveis AD,  $\theta_{-5kPa}$ ,  $\theta_{-1500kPa}$  e CE apresentaram dependência moderada, sendo que os demais parâmetros apresentaram forte dependência espacial.

Os mapas obtidos pela krigagem dos dados (Figura 2) mostram que a produtividade do milho apresenta boa similaridade com os mapeamentos de AD, teor de silte,  $D_p$  e RP. No geral, os coeficientes de correlação aumentaram a partir do uso do conjunto de dados preditos pelos semivariogramas (Tabela 3). A análise de correlação entre as variáveis mostrou uma forte correlação positiva entre a produtividade e AD ( $r = 0,81$ ), silte ( $r = 0,68$ ) e  $D_p$  ( $r = 0,65$ ).

Tabela 2. Modelos utilizados e parâmetros interpolados para os parâmetros físicos do solo e a produtividade do milho (média de três anos).

| Variável   | $C_0$                | $C_1$                | a     | ajuste | dependência | correspondência |
|--|----------------------|----------------------|-------|--------|-------------|-----------------|
| argila (g kg <sup>-1</sup> )                           | 31,1                 | 1497                 | 161   | exp.   | 2,0         | forte           |
| silte (g kg <sup>-1</sup> )                            | 9,2                  | 240                  | 291   | exp.   | 3,7         | forte           |
| areia (g kg <sup>-1</sup> )                            | 40,5                 | 1502                 | 246   | exp.   | 2,6         | forte           |
| $\theta_{1500kPa}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) | 4,0x10 <sup>-5</sup> | 2,1x10 <sup>-4</sup> | 214   | esf.   | 16,0        | moderada        |
| $\theta_{5kPa}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )    | 4,6x10 <sup>-5</sup> | 2,5x10 <sup>-4</sup> | 227   | esf.   | 15,4        | moderada        |
| AD (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )                 | 3,6x10 <sup>-5</sup> | 2,4x10 <sup>-5</sup> | 119   | esf.   | 60,0        | moderada        |
| CE (dS m <sup>-1</sup> )                               | 5,6x10 <sup>-2</sup> | 3,8x10 <sup>-2</sup> | 154   | esf.   | 60,0        | moderada        |
| $D_s$ (g cm <sup>-3</sup> )                            | 1,5x10 <sup>-5</sup> | 4,8x10 <sup>-4</sup> | 385   | esf.   | 3,0         | forte           |
| $RP_{0-30cm}$ (MPa)                                    | 0,46                 | 3,5                  | 304   | esf.   | 11,8        | forte           |
| $RP_{30-60cm}$ (MPa)                                   | 1,16                 | 53                   | 10000 | exp.   | 2,2         | forte           |
| $\theta$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )           | 1,8x10 <sup>-4</sup> | 1,1x10 <sup>-3</sup> | 184   | esf.   | 14,8        | forte           |
| produtividade  | 2,1x10 <sup>5</sup>  | 2,1x10 <sup>6</sup>  | 145   | exp.   | 9,7         | forte           |

$C_0$ : efeito pepita,  $C_1$ : variância estrutural, a: alcance, dependência:  $(100[C_0 / (C_0 + C_1)]^{-1})$

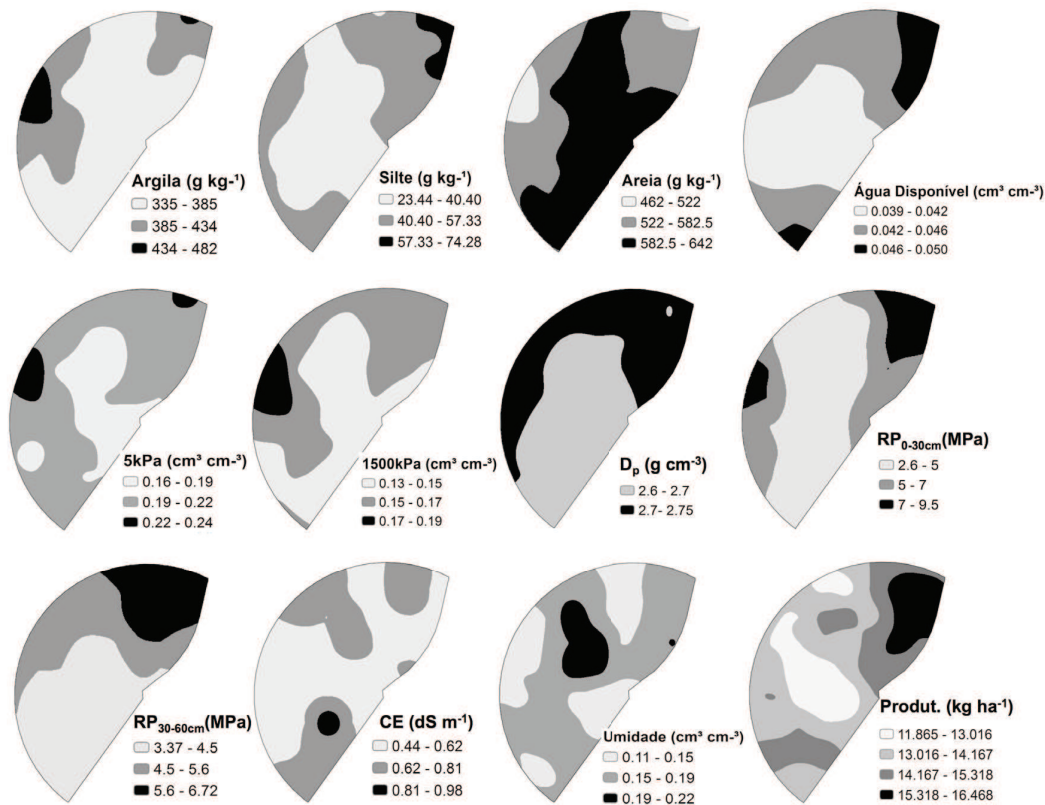


Figura 2. Mapas dos parâmetros argila, silte, areia, água disponível (AD), umidades nos potenciais de -5kPa ( $\theta_{5kPa}$ ) e -1500kPa ( $\theta_{1500kPa}$ ), densidade das partículas ( $D_p$ ), resistência à penetração de 0- 30cm ( $RP_{0-30cm}$ )

e 30-60cm (RP<sub>0-30cm</sub>), condutividade elétrica (CE), umidade do solo ( $\theta$ ) e média da produtividade em 3 anos (produtividade).

Tabela 3. Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre a produtividade do milho (média de três anos) e os parâmetros físicos do solo, com os dados observados e preditos pelos semivariogramas.

|   | argila           | silte | areia | $\theta_{1500kPa}$ | $\theta_{5kPa}$ | AD   | CE   | D <sub>p</sub> | RP <sub>0-30cm</sub> | RP <sub>0-30cm</sub> | $\theta$ |
|---|------------------|-------|-------|--------------------|-----------------|------|------|----------------|----------------------|----------------------|----------|
|   | dados observados |       |       |                    |                 |      |      |                |                      |                      |          |
| r | 0,03             | 0,57  | 0,15  | 0,11               | 0,16            | 0,12 | 0,01 | 0,53           | 0,51                 | 0,40                 | 0,06     |
|   | dados preditos   |       |       |                    |                 |      |      |                |                      |                      |          |
|   | 0,19             | 0,68  | 0,22  | 0,44               | 0,54            | 0,81 | 0,34 | 0,65           | 0,55                 | 0,53                 | 0,29     |

#### 4. Conclusões

Dentre os parâmetros físicos do solo medidos e estimados o teor de silte, densidade das partículas, água disponível e resistência à penetração de 0-30 cm apresentaram as melhores correlações com a produtividade de matéria seca de milho para silagem. A avaliação dos dados interpolados pelo ajuste do modelo do semivariograma melhorou a correlação dos dados quando comparado com os valores obtidos diretamente dos dados medidos.

#### Agradecimentos

CNPq (304951/2013-7, 375121/2014-5) e Embrapa (01.12.01.0.19.00.04)

#### Referências

- CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H. G.; FONSECA, O. O. M.; SANTOS, R. D.; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. Os solos da fazenda Canchim. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1998. 95 p. (EMBRAPA-CNPS. Boletim de Pesquisa, 7).
- CAMBARDELLA, C. A.; KARLEN, D. L. Spatial analysis of soil fertility parameters. *Precision Agriculture*, v.1, p.5-14, 1999.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) Inc., ArcGIS® 10.1: getting started with ArcGIS. Redlands, ESRI. 2009.
- MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B.; WHELAN, B.M. 2005. VESPER version 1.62. Australian Centre for Precision Agriculture, McMillan Building A05, The University of Sydney, NSW 2006. Disponível em: <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>. Consultado em 22 julho 2010.
- PEREZ, N. B.; NEVES, M. C.; SISTI, R. N.; NUNES, C. L. R.; LEITÃO, F. M. L. Condutividade elétrica do solo e produtividade: uso no sistema de integração lavoura-pecuária para determinar zonas de manejo durante o cultivo de soja. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 252-259.
- VAZ, C.M.P.; IOSSI, M.F.; NAIME, J.M.; MACEDO, A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; COOPER, M. Validation of the Arya and Paris water retention model for Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.69, p.577-583, 2005.