

Modelando Variabilidade Espacial da Compactação do Solo: Uma Aplicação à Geoestatística

Raphael Antonio Prado Dias - LCE, ESALQ-USP ¹

Carlos Tadeu dos Santos Dias - LCE, ESALQ-USP ²

Ricardo Alves de Olinda - LCE, ESALQ-USP ³

José Paulo Molin - LER, ESALQ-USP ⁴

Paulo Justiniano Ribeiro Junior - LEG, UFPR ⁵

Resumo: *O objetivo deste trabalho foi explorar a variabilidade espacial do índice de cone, por meio de análises geoestatísticas afim de descrever o modelo e gerar mapas de resistência do solo à penetração causada pelo tráfego de máquinas. Os dados foram obtidos em uma área agrícola no município de Pirassununga - SP, com cerca de 18 ha, nas coordenadas geográficas 21°97' de latitude sul e 47°47' de longitude oeste. Estes dados de índice de cone foram coletados utilizando uma grade regular, com espaçamento de 20 metros entre os pontos, coletados de forma contínua na camada de 0,15-0,20m. A área é cultivada com milho e soja em semeadura direta desde 1997. Obteve-se as estimativas dos parâmetros pelo método da máxima verossimilhança e estas foram utilizadas na construção de mapas de krigagem. Os resultados da análise de krigagem, indicam um provável efeito do tráfego de máquinas em área sob semeadura direta, que provoca compactação superficial, o que pode causar prejuízos às culturas. Os fatos observados sugerem que a compactação, acima de tudo, não é uniformemente distribuída na área. Algumas regiões da lavoura apresentaram índices de cone com valores elevados, induzindo à busca de soluções de intervenção, que podem ter sua área de ação facilmente definida pela análise dos mapas de krigagem para o índice de cone.*

Palavras-chave: *Agricultura de Precisão, Dependência Espacial, Krigagem.*

Introdução

Valores da resistência a penetração podem ser usados para caracterizar os solos em termos de habilidade de crescimento das culturas, de resistência à penetração das raízes e de emergência das sementes (Taylor & Gardner, 1963). Segundo Miller (1987), a penetração das raízes pode ser reduzida, se a resistência do solo atingir valores maiores que 3 MPa, o que pode resultar em decréscimo no suprimento de água e de nutrientes para as plantas.

A compactação do solo tem variabilidade espacial e pode influenciar na produção das lavouras. O estudo dessa variabilidade pode ser executado a partir de uma abordagem geoestatística. Dessa forma, mapas podem ser construídos para exibir a distribuição do atributo na região estudada, para fazer estimativas, para ter parâmetros a fim de verificar viabilidade e para orientar estratégias (Ribeiro Júnior, 1995).

¹Doutorando do PPG Estatística e Experimentação Agronômica, Agradecimento a CAPES pelo apoio financeiro. rapdias@esalq.usp.br

²Professor Titular da Universidade São Paulo. ctsdias@esalq.usp.br

³Doutorando do PPG Estatística e Experimentação Agronômica. ricardoestatistico@usp.br

⁴Professor Associado da Universidade de São Paulo. jpmolin@esalq.usp.br

⁵Professor Adjunto da Universidade Federal do Paraná. paulojus@ufpr.br

O objetivo deste trabalho foi explorar a variabilidade espacial da compactação do solo através do índice de cone (IC), por meio de análises geoestatísticas afim de descrever o modelo geoestatístico, obter as estimativas dos parâmetros pelo método da máxima verossimilhança e gerar mapas de resistência do solo à penetração a partir de amostras georeferenciadas para avaliar a compactação, causada pelo tráfego de máquinas.

Metodologia

Os dados deste trabalho foram obtidos em uma área agrícola no município de Pirassununga - SP, com cerca de 18 ha, nas coordenadas geográficas 21°97' de latitude sul e 47°47' de longitude oeste com solo classificado como Latossolo Roxo Eutrófico. Estes dados de IC foram coletados utilizando uma grade regular, com espaçamento de 20 metros entre os pontos, coletados de forma contínua na camada de 0,15-0,20m. A área é cultivada com milho e soja intercaladas em semeadura direta desde 1997.

As análises e resultados foram obtidos através de ambiente *R* de programação (*R Development Core Team, 2007*), utilizando o pacote *geoR* (Ribeiro Jr. & Diggle, 2001).

Na geoestatística, as estimativas dos parâmetros são utilizadas nas predições espaciais. Assumindo que o campo aleatório possui estacionariedade forte, pode-se optar por estimadores baseados na verossimilhança. Esta abordagem consiste em utilizar os valores observados da variável resposta para encontrar um vetor $\hat{\theta} = (\beta, \sigma^2, \phi, \nu^2)$ que maximiza a função de verossimilhança associada a θ . A estimativa do vetor de parâmetros é obtida a partir de métodos numéricos de maximização de funções que por simplicidade matemática, utiliza-se o logaritmo neperiano da função de verossimilhança, que associado ao modelo:

$$Y(x) = \mu(x) + S(x) + \varepsilon$$

tem a seguinte forma:

$$l(\theta; Y(x)) = -0,5(n \ln(2\pi) + \ln(|\Sigma_Y|) + (Y(x) - X\beta)^t \Sigma_Y^{-1} (Y(x) - X\beta)).$$

Como o objetivo geral dos estudos com dados georeferenciados é fazer predições espaciais em locais não amostrados, esse processo de predição é denominado Krigagem e o interesse é fazer predição para S nas localizações x^* tal que o erro quadrático médio seja mínimo. A distribuição de probabilidade de $(S(x^*)|Y(x))$ gera as predições com melhor precisão. Em particular a esperança desta distribuição minimiza o erro quadrático médio de predição e a variância fornece a precisão das estimativas. Assim, tem-se que:

$$E(S(x^*)|Y(x)) = \mu_S + \Sigma_{S,Y} \Sigma_Y^{-1} (Y(x) - X\beta)$$

sendo que μ_S é a média de $S(x^*)$ e $\Sigma_{S,Y}$ é a matriz de covariância entre $S(x^*)$ e $Y(x)$. E:

$$Var(S(x^*)|Y(x)) = \Sigma_S - \Sigma_{S,Y} \Sigma_Y^{-1} \Sigma_{Z,Y}^t$$

em que Σ_S é a matriz de covariância de $S(x^*)$.

As krigagens mais utilizadas são a simples e a ordinária que diferenciam quanto a suposição

de conhecimento prévio sobre os parâmetros da média do processo (Diggle & Ribeiro Jr., 2007).

Resultados

Observou-se a partir do envelope simulado para o variograma empírico utilizando 1000 simulações (FIGURA 1) que existe uma dependência espacial aparentemente fraca pois alguns pontos ficaram fora do mesmo, evidenciando a necessidade de uma abordagem geoestatística.

Uma análise exploratória dos dados foi realizada obtendo uma média de 7,015 Mpa e um desvio padrão de 3,056257 Mpa para as 444 localizações amostradas. Como houve uma pequena fuga da distribuição gaussiana, utilizou-se a transformação raiz quadrada e obteve-se o modelo que melhor se ajustou aos dados a partir do teste de razão de verossimilhança, AIC e BIC.

As estimativas dos parâmetros obtidas pelo método da máxima verossimilhança para o modelo sem efeito de tendência foram $\hat{\beta} = 3,2468$ que é o componente da média, $\hat{\tau}^2 = 1,0425$, $\hat{\sigma}^2 = 0,2336$ e $\hat{\phi} = 41,4347$. Como para $\kappa = 0,5$, $a = 3\phi$ e assim o alcance prático foi $\hat{a} = 124,1273$ metros. Pelo critério de AIC e BIC, o modelo com dependência espacial se ajustou melhor aos dados comparado com o modelo que desconsiderou a correlação espacial. O modelo ajustado a partir das estimativas dos parâmetros juntamente com o semivariograma estão na FIGURA 2 abaixo.

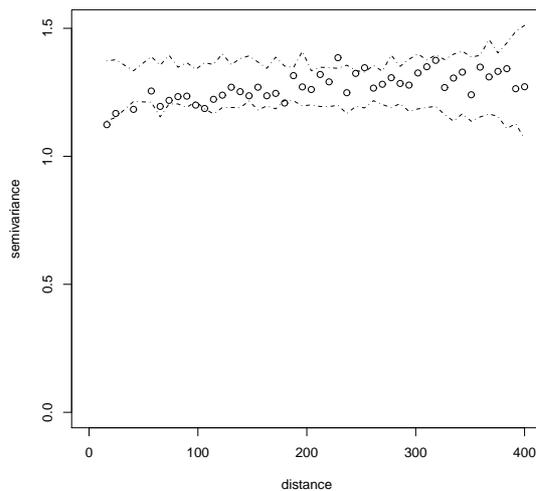


Figura 1: Envelope simulado para verificar dependência espacial

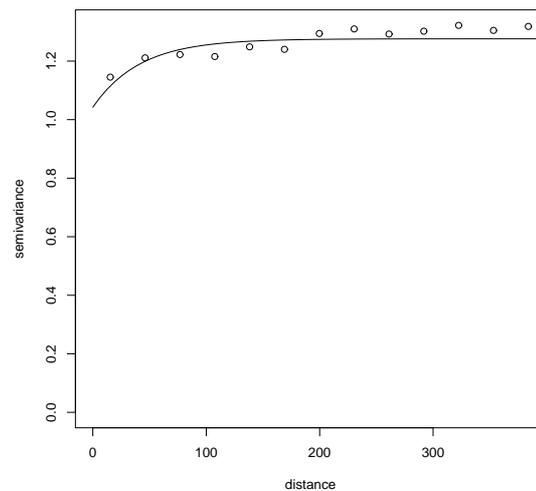


Figura 2: Modelo ajustado juntamente com o semivariograma amostral

Com o modelo estabelecido, foram calculadas as previsões espaciais para a variável índice de cone em uma malha regular de pontos com distância mínima de 5 metros, dentro da região de estudo, sendo que, as estimativas paramétricas obtidas pelo método da máxima verossimilhança foram substituídas nas suas respectivas fórmulas de krigagem da média e da krigagem condicional $Y(x) > 3$ como mostrado na FIGURAS 3 e 4.

Conclusões

Os resultados da análise de krigagem pelo método da máxima verossimilhança, indicam um provável efeito do tráfego de máquinas em área sob semeadura direta, que provoca compactação

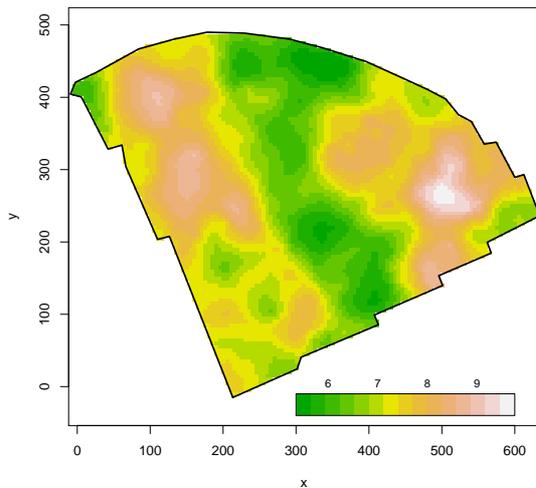


Figura 3: Krigagem da média a partir das estimativas obtidas pelo método da máxima verossimilhança

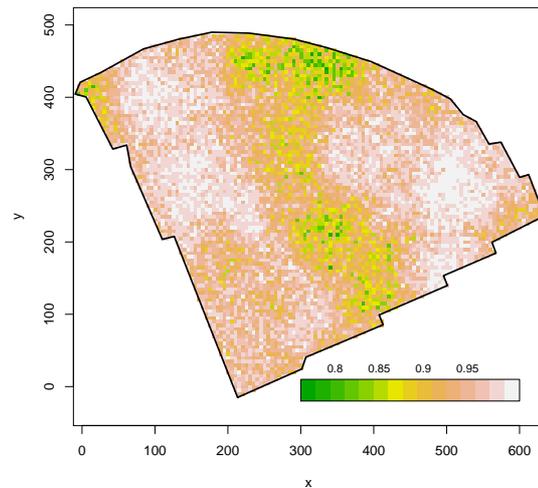


Figura 4: Krigagem da probabilidade condicional de $Y(x) > 3$

superficial, o que pode causar prejuízos às culturas. Tais resultados são semelhantes aos encontrados por Kayombo et al. (1985), que estudaram o efeito da compactação dos rodados sobre o desenvolvimento dessas culturas, em sistema de semeadura direta em um solo tropical, no oeste da Nigéria.

Os fatos observados sugerem que a compactação, acima de tudo, não é uniformemente distribuída na área. Algumas regiões da lavoura apresentaram índices de cone com valores mais elevados. Isso induz à busca de soluções de intervenção, que podem ter sua área de ação facilmente definida pela análise dos mapas de krigagem para o índice de cone.

Referências

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO Jr., P. J. **Model-Based geostatistics**. New York: Springer, 2007. 230p.

KAYOMBO, B.; LAL, R.; MREMA, G.C. Traffic-induced and no-tillage: Soil physical properties. **Journal of Science in Food and Agriculture**, v.37, p.969-78, 1985

MILLER, D.E. Effect of subsoiling and irrigation regime on dry bean production in the Pacific Northwest. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, p.784- 787, 1987.

R. Development Core Team. R Foundation for Statistical Computing. **R: A language and environment for statistical computing**, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL. Disponível em: <<http://R-project.org>>. Acesso em: 24 ago 2009.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo.** 1995. 99p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995

RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE P. J. geoR: A package for geostatistical analysis, **RNEWS**, Vienna, v.1, n.2, p. 14-18, 2001. ISSN 1609-3631.

TAYLOR, H.M.; GARDNER, H.R. Penetration of cotton seedling tap roots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. **Soil Science**,v.96, n.3, p.153-156, 1963.