

MODELAGEM ANISOTRÓPICA APLICADA NA CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO

Vanessa Maldaner¹, Rômulo Félix Nunes², Leonir Aldrighi Dutra Junior³, Luana Nunes Centeno⁴, Cláudia Liane Rodrigues de Lima⁵, Luis Carlos Timm⁶

¹ Engenheira Agrícola, Mestranda em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, (53)991357997, vanessa-maldaner@hotmail.com

² Engenheiro de Petróleo, Mestrando em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS, nunes.romulo@outlook.com

³ Engenheiro Agrônomo, Doutorando em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS, leonirdutrajr@gmail.com

⁴ Tecnóloga em Saneamento Ambiental, Doutoranda em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS, luananunescenteno@gmail.com

⁵ Engenheira Agrícola, Prof. Associada, Departamento de Solos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS, clrlima@yahoo.com.br

⁶ Engenheiro Agrícola, Prof. Associado, Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS, luisctimm@gmail.com

Apresentado no
XLVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2019
17 a 19 de setembro de 2019 - Campinas - SP, Brasil

RESUMO: A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) é uma das principais características que regem o comportamento da água no solo, sendo importante na gestão dos recursos hídricos. Apresenta-se na natureza com alta variabilidade espacial, com caracterização complexa e onerosa, devido ao longo tempo de coletas de campo e análises laboratoriais. Ferramentas matemáticas e estatísticas surgem como solução para melhor caracterizar a variabilidade espacial. Sendo assim, objetivou-se, através da modelagem anisotrópica, quantificar a continuidade espacial, identificar as direções de maior intensidade do fenômeno, e estimar os valores de K_{sat} em locais não amostrados, através da krigagem ordinária. A maior faixa de dependência espacial encontrada foi na direção de 135° com um ajuste de semivariograma experimental exponencial. Foi possível realizar a estimativa por krigagem ordinária utilizando os parâmetros de ajuste da direção de 135° onde a estimativa por krigagem se mostrou eficaz. Sendo assim, a metodologia apresentada demonstrou-se eficiente na caracterização da variabilidade espacial.

PALAVRAS-CHAVE: k_{sat} ; krigagem ordinária; semivariograma

ANISOTROPIC MODELING APPLIED TO CHARACTERIZATION OF SPACE VARIABILITY OF THE SATURATED SOIL HYDRAULIC CONDUCTIVITY

ABSTRACT: The soil saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) is one of the main characteristics that govern the behavior of water in the soil, being important in the management of water resources. It presents in the nature with high spatial variability, with complex and expensive characterization, due to the long time of field collections and laboratory analyzes. Mathematical tools and statistics appear as a solution to better characterize spatial variability. Thus, anisotropic modeling was used to quantify spatial continuity, to identify the highest intensity directions of the phenomenon, and to estimate the K_{sat} values in non-sampled locations, through ordinary kriging. The largest spatial dependence range was in the 135° direction with

an exponential experimental semivariogram adjustment. It was possible to carry out the estimation by ordinary kriging using the parameters of adjustment of the direction of 135° where the estimate by kriging proved effective. Therefore, the presented methodology was efficient in the characterization of the spatial variability.

KEYWORDS: K_{sat} ; ordinary kriging; semivariogram

INTRODUÇÃO: Diversos atributos influenciam na dinâmica da água no solo, dentre eles, ressalta-se a condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}), sendo de extrema importância para gestão dos recursos hídricos. Devido a complexidade dos processos formadores do solo e aos diferentes usos e manejo do solo a K_{sat} pode se apresentar na natureza com uma alta variabilidade espacial (SHE et al., 2017). Neste contexto a anisotropia é caracterizada por comportamentos diferentes do fenômeno espacial em função da direção de análise, por meio de ferramentas geoestatísticas (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). A geoestatística, através de modelagem variográfica e da krigagem ordinária, têm sido usada para a caracterização da variabilidade espacial, estimando valores em locais não amostrados com mínima variância (OLIVER; WEBSTER, 2014). Diante do exposto, o presente trabalho teve por objetivo estudar a anisotropia da K_{sat} em uma malha estabelecida de pontos de amostragem na sub-bacia hidrográfica Santa Rita, localizada na região sul do Brasil, afim de quantificar e identificar as direções de maior intensidade de variabilidade espacial da K_{sat} e, mapear a sua distribuição espacial para a direção de maior continuidade por meio da krigagem ordinária.

MATERIAL E MÉTODOS: A área deste estudo foi a sub-bacia hidrográfica Santa Rita - SBHSR (coordenadas geográficas 355168,619 L e 6495482,457 N), localizada na Bacia Hidrográfica do Arroio Moreira (BHAM), Pelotas, Rio Grande do Sul, com aproximadamente 10,54 km². Estabeleceu-se uma malha com distribuição espacialmente irregular, contendo 81 pontos amostrais equidistantes 300 m entre si. Em cada ponto da malha foram coletadas três amostras com estrutura preservada, na camada de 0,00--0,20 m, em anéis com dimensões de 0,05 m de altura x 0,05 m de diâmetro, para determinar a K_{sat} seguindo Libardi, (2005).

Os dados de K_{sat} foram submetidos a análise exploratória por meio de teste de aderência não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov ao nível de 5%, média, desvio padrão e coeficiente de variação. A modelagem anisotrópica foi realizada através calculando-se os semivariogramas experimentais direcionais por meio da Equação 1, conforme Andriotti (2003), em oito principais direções de busca: 0°, 22,5°, 45°, 57,5°, 90°, 112,5°, 135°, 157,5°. Ajustou-se aos semivariogramas experimentais, adotando-se um dos três modelos teóricos, a saber: Gaussiano, Exponencial e Esférico, para cada direção e determinou-se para cada ajuste os parâmetros: alcance (a), patamar (c+c₀), contribuição (c) e efeito pepita (c₀); a partir do *software* de modelagem geoestatística da Universidade de Stanford (*SGeMS*).

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

em que, $n(h)$ é o número de pares de observações da variável Z e h é a distância de separação entre os pares de observações $n(h)$ medidos em x_i e x_i+h .

O mapa de distribuição espacial da K_{sat} foi gerado através de estimativa por krigagem ordinária (OK). O valor no qual deseja-se estimar (x_0) determinado através da Equação 2 (REICHARDT; TIMM, 2016).

$$Z_{ok}^*(x_0) = \sum_{i=0}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

em que, $Z_{ok}^*(x_0)$, é definida como a estimativa de uma variável Z no ponto 0 do domínio e 0 representa a posição geométrica em que é realizada a estimativa. $Z(x_i)$ é definida como uma variável aleatória que assume diferentes valores Z em função da posição (x_i) dentro de certa área, e representa pares de coordenadas (x_i, y_i) . Já λ são pesos ou ponderados da krigagem.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A K_{sat} apresentou uma distribuição não-normal quando analisado o teste de aderência. Os valores de K_{sat} foram transformados por meio da função logaritmo neperiano ($\ln(K_{sat})$). A $\ln(K_{sat})$ apresentou uma média de 3,26 mm h⁻¹, desvio padrão de 1,51 e um coeficiente de variação de 46,28%, caracterizando-se como alta variabilidade (CV > 35%, WILDING; DREES, 1983). As direções 22,5°, 45°, 90° e 112,5° não apresentaram continuidade espacial para os dados de $\ln(K_{sat})$, assim, há a ocorrência de anisotropia geométrica uma vez que o c_0 e c são constantes, sendo assim, variável o alcance para as diferentes direções (Tabela 1). A maior faixa de dependência espacial encontrada encontra-se na direção de 135° com um ajuste do semivariograma experimental exponencial.

TABELA 1: Modelagem da anisotropia para a variável $\ln(K_{sat})$ na malha experimental estabelecida na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.

Atributos	Parâmetros	Direções			
		0°	67,5°	135°	157,5°
$\ln(K_{sat})$	c_0	1,00	1,00	1,00	1,00
	c	1,18	1,18	1,18	1,18
	Alcance (m)	867,00	408,00	1000,00	918,00
	Modelo	Esférico	Esférico	Exponencial	Esférico

C0 - Efeito Pepita; C- Contribuição

Para a direção de maior alcance encontrou-se o c_0 de 1,00 m, c de 1,28 m e 918,00 m de alcance. Os parâmetros encontrados para direção de 135° foram utilizados como dados de entrada para a estimativa por OK. O alcance que representa a distância na qual, existe correlação espacial entre os pares de amostras, portanto, somente amostras dentro do raio de alcance atribuem peso na estimativa da variável que se deseja estimar por OK. A Figura 1 mostra a disposição da malha de amostragem (1a), o mapa de distribuição espacial estimado através de OK da $\ln(K_{sat})$ (1b) e o mapa de validação visual, onde plotou-se os pontos previamente amostrados sobrepostos ao mapa de pontos estimados por OK.

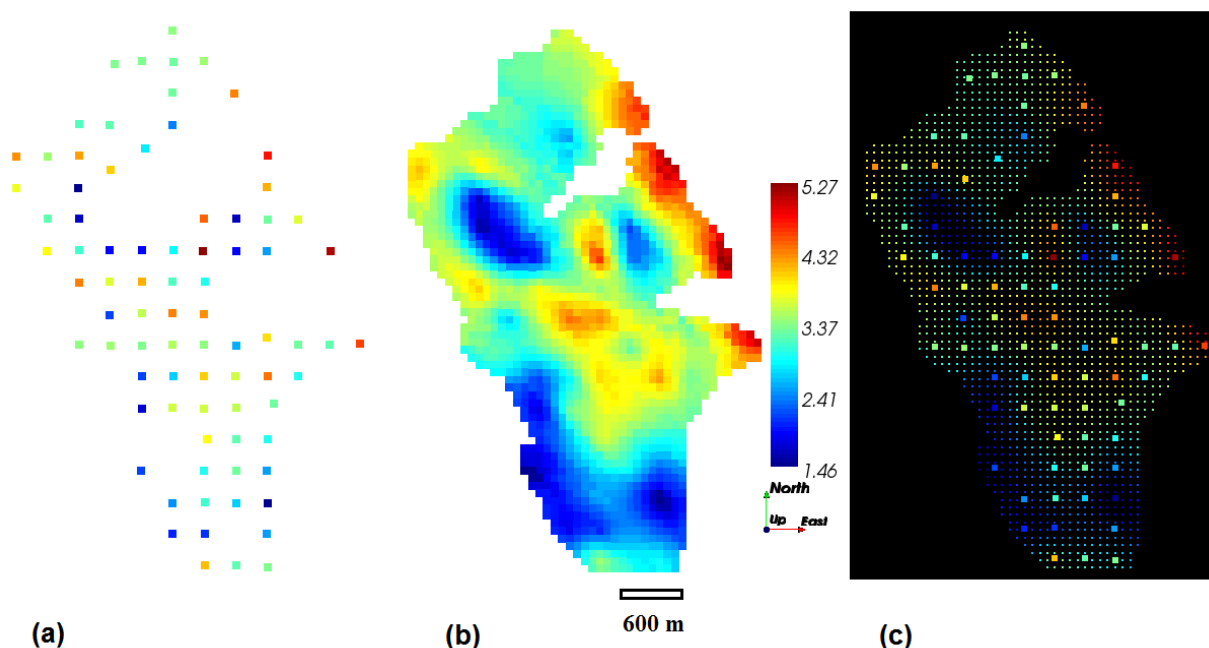


FIGURA 1. Pontos amostrais de $\ln(K_{\text{sat}})$ (a); Mapa estimado de $\ln(K_{\text{sat}})$ (b); Validação visual da estimativa de $\ln(K_{\text{sat}})$ (c).

Pela Figura 1b visualiza-se na direção de 135° a maior continuidade espacial, e na região centralizada do mapa perpendicularmente à essa direção, podemos visualizar uma faixa de maior variabilidade espacial, comportamento devido a mesma ser considerada uma variável integradora, a qual depende de outros atributos do solo. Verifica-se através da validação visual da estimativa na Figura 1c, que os valores estimados são compatíveis com os dados brutos obtidos.

CONCLUSÕES: A metodologia apresentada demonstrou eficiência na caracterização da variabilidade espacial. Foi possível através da modelagem variográfica determinar a orientação de maior continuidade espacial de $\ln(K_{\text{sat}})$, quantificar a distância máxima que as amostras se encontram correlacionadas e mapear a distribuição espacial da $\ln(K_{\text{sat}})$ considerando a anisotropia, minimizando a variância da estimativa.

REFERÊNCIAS:

- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2003. 165p.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba, EDUSP, 2005. 335p
- OLIVER M., WEBSTER R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena* 113, 56–69.2014.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2016. 478 p.
- SHE, D.L., QIANA, C., TIMM, L.C., BESKOW, S., HU, W., CALDEIRA, T.L., OLIVEIRA, L.M. Multi-scale correlations between soil hydraulic properties and associated factors along a Brazilian watershed transect. *Geoderma* 286, 15–24, 2017.
- WILDING, L.P.; DREES, L.R. **Spatial variability and pedology**, 1983.
- YAMAMOTO, J. K., LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013, 215p.