



Retenção de água aplicando aproximação geoestatística em solos do Rio Grande do Sul

Water retention applying geostatistical approximation in soils of Rio Grande do Sul

Bruno Campos Mantovanelli^{1*}
Mirta Teresinha Petry²
Juliano Dalcin Martins²
Reimar Carlesso²

¹ Universidade Federal do Acre,
69920-900, Rio Branco, Brasil.

² Universidade Federal de Santa
Maria, 97105-900, Ariquemes, Brasil.

* Autor Correspondente:
brunomantovanelli21@gmail.com

Palavras-chave:

Diagramas ternários
Krigagem
Textura

Keywords:

Ternary diagrams
Kriging
Texture

Histórico do artigo:

Recebido: 15/12/2021
Aceito: 21/05/2022

RESUMO: A estimativa de propriedades hidráulicas por meio de ferramentas estatísticas espaciais ajuda a prever esses atributos para locais não amostrados, em função da associação geográfica entre pontos amostrados e reduzindo a variância do erro de avaliação. Este estudo teve como objetivo elaborar diagramas ternários aplicando técnicas geoestatísticas para solos de áreas irrigadas do Rio Grande do Sul, Brasil. Os dados foram extraídos da base físico-hídrica de áreas irrigadas vinculada ao Sistema Irriga®, do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria. As estimativas do conteúdo de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) pelo método de krigagem, foram realizadas aplicando-se apenas a distribuição do tamanho de partículas (areia, silte e argila) considerando o conjunto de dados em um perfil de amostragem de até 0,8 m. Com base na textura, foram estimados os valores do conteúdo de água na capacidade de campo (-10 kPa e -33 kPa) e ponto de murcha permanente (-1500 kPa). Para averiguar o desempenho e a acurácia, foi realizada uma análise estatística através dos seguintes parâmetros: Coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e validação cruzada do semivariograma (VC). Diagramas ternários podem servir como ferramentas simplificadas para estimar essas propriedades hidráulicas a partir da distribuição de tamanho de partículas.

ABSTRACT: The estimation of soil hydraulic properties using spatial statistical tools helps to predict these attributes for non-sampled sites, due to the geographical association between sampled points and reducing the variance of the evaluation error. This study aimed to elaborate ternary diagrams applying geostatistical techniques to soils of irrigated areas in the Rio Grande do Sul state, Brazil. The data were extracted from the physical-hydraulic base of irrigated areas linked to the Irriga System®, from the Rural Engineering Department, of Federal University of Santa Maria. The soil water content estimates ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) by the kriging method were performed by applying only the particle size distribution (sand, silt, and clay) considering the data set in a sampling profile up to 0, 8 m. Based on the texture, the values of the water content at field capacity (-10 kPa and -33 kPa) and permanent wilting point (-1500 kPa) were estimated. To determine the performance and accuracy, a statistical analysis was performed using the following parameters: Coefficient of determination (R^2), square root mean error (RMSE) and cross-validation of the semivariogram (CV). Ternary diagrams can serve as simplified tools for estimating these hydraulic properties from the particle size distribution.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo da modelagem hidráulica do solo é fornecer uma visão simplificada e abstrata dos complexos padrões hidráulicos em uma amostra de solo (BROWN; HEUVELINK, 2006). Propriedades hidráulicas do solo e os seus modelos são associados em uma vasta gama de aplicações, incluindo a irrigação (GRASHEY-JANSEN, 2014), modelagem de manejo em áreas agrícolas (HORNE; SCOTTER, 2016) e estudos de longo prazo sobre o efeito do clima e da mudança no uso da terra (SULIS et al., 2011). Os dados necessários para modelos hidráulicos de solo usados em uma determinada aplicação usualmente são difíceis ou impossíveis de se obter diretamente a partir de detalhadas medições de campo, sendo caro e demorado coletar amostras para cada nova aplicação.

Desde 1970, um grande número de Funções de Pedotransferência (FPTs) para prever propriedades hidráulicas foram desenvolvidas em todo o mundo em escala regional ou global (MICHELON et al., 2010; MCNEILL et al., 2018). Seguindo os estudos de predição tanto de propriedades hidráulicas do solo quanto a retenção de água, técnicas baseadas na abordagem geoestatística, mais precisamente interpolações por krigagem, vem se destacando nestas quantificações, principalmente por considerarem a estrutura de distribuição espacial dos atributos envolvidos nas estimativas (RAMOS et al., 2014).

A geoestatística é um método eficiente de estudo para a distribuição espacial de propriedades do solo (BEHERA; SHUKLA, 2015). A estimativa de propriedades hidráulicas por meio de ferramentas estatísticas espaciais ajuda a prever valores em locais não amostrados, em função da associação geográfica entre pontos amostrados e reduzindo a variância do erro de avaliação (SAITO et al., 2005).

Seguindo os estudos de predição de propriedades hidráulicas do solo relacionados à retenção de água, técnicas baseadas na abordagem geoestatística, mais precisamente interpolações por krigagem, vêm se destacando, principalmente por considerarem a estrutura de distribuição espacial dos atributos envolvidos nas estimativas (RAMOS et al., 2014; RAMOS et al., 2017). A geoestatística é um método

eficiente de estudo para a distribuição espacial de propriedades do solo (LIU et al., 2014; BEHERA; SHUKLA, 2015). A estimativa de propriedades hidráulicas por meio de ferramentas estatísticas espaciais ajuda a prever valores em locais não amostrados, em função da associação geográfica entre pontos amostrados e reduzindo a variância do erro de avaliação (SAITO et al., 2005).

A aplicabilidade das técnicas geoestatísticas nos estudos voltados a ciência do solo tem sido relatada em uma série de pesquisas, principalmente aquelas que constataam a variabilidade espacial de atributos físicos. Entretanto, a aplicação das técnicas de krigagem ainda não foi estabelecida para o desenvolvimento de FPTs para derivar propriedades hidráulicas do solo a partir de propriedades físicas básicas e de fácil aquisição e que possam prever o comportamento da retenção de água com base no triângulo textural em solos brasileiros. Dos poucos estudos no desenvolvimento de FPTs aplicando aproximação geoestatística, destacam-se os trabalhos de Ramos et al., (2014) e Mantovanelli et al., (2021) aplicando técnicas de krigagem, baseando-se na continuidade espacial das propriedades texturais, concluindo que o método de krigagem foram úteis para compreender as estimativas de retenção de água no solo baseando-se em diagramas ternários.

Desta forma, este estudo teve por objetivo elaborar diagramas ternários aplicando técnicas geoestatísticas para solos de áreas irrigadas do Rio Grande do Sul, Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados foram extraídos da base físico-hídrica de áreas irrigadas vinculada ao Sistema Irriga®, do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria. Os dados incluem informações de 4262 observações abrangendo textura (areia, silte e argila) e propriedades de retenção de água (θ_{cc} e θ_{pmp}). Os grupos de referência de solos representados abrangem principalmente Argissolos e Latossolos.

O conjunto de dados foi dividido aleatoriamente em dois subconjuntos, um de desenvolvimento, composto por dois terços dos dados (2842 amostras) e um de validação, com o terço restante

dos dados (1420 amostras). As estimativas do conteúdo de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) por krigagem ordinária, foram realizadas aplicando-se apenas a distribuição do tamanho de partículas (areia, silte e argila). E assim, com base na textura, estimou-se o conteúdo de água na capacidade de campo (potenciais de -10 kPa e -33 kPa) e ponto de murcha permanente (-1500 kPa).

Conforme apresentado em Ramos et al. (2014), primeiramente, deve-se assumir que as coordenadas são dadas pela proporção relativa dos constituintes da textura (areia, silte e argila), logo, estas devem ser transformadas em um domínio cartesiano (variação de comprimento no

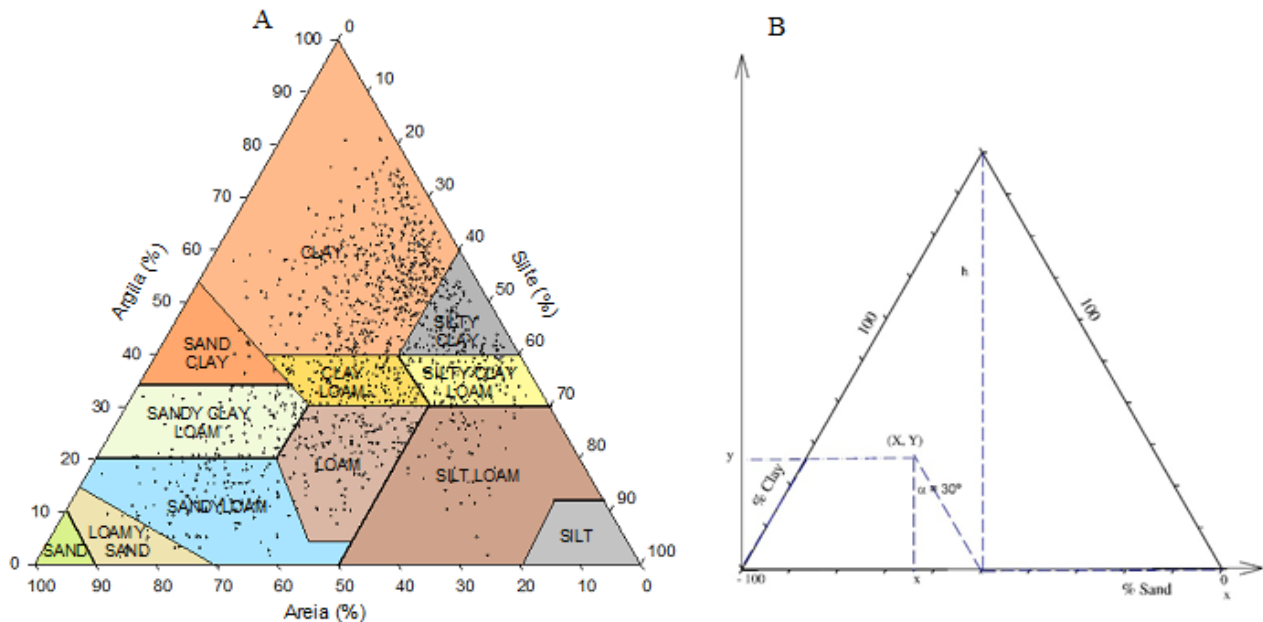
domínio cartesiano foi equivalente a % de variação de massa no triângulo textural) conforme as Equações 1 e 2 e Figura 1.

$$y = \frac{h \times \text{argila}(\%)}{100} \quad (1)$$

$$x = \left(\text{areia}(\%) + \text{argila}(\%) * \tan\left(\alpha * \frac{\pi}{180}\right) \right) \quad (2)$$

em que: h: altura do triângulo (obtida aplicando o teorema de Pitágoras); α : ângulo de 30° formado entre a direção vertical e a direção diagonal.

Figura 1 - Distribuição textural do conjunto de dados utilizado no desenvolvimento dos diagramas ternários (A); conversão das coordenadas de textura em coordenadas cartesianas (B).



Fonte: Adaptado de Ramos et al. (2014).

O semivariograma foi calculado para examinar a correlação espacial dentro dos pontos de dados medidos a partir do software GS+. A inconsistência espacial foi estimada como um semivariograma que retrata a variabilidade quadrada média entre os dois locais de amostra vizinhos da distância h (Isaaks & Srivastava, 1989). Com base na pressuposição de estacionaridade da hipótese intrínseca, o semivariograma foi estimado pela Equação 3.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

Os diagramas foram elaborados pelo programa Surfer 6.0 (Golden Software, 1995). Segundo Smith et al. (1993), o valor esperado em

um local não amostrado, derivado das variáveis indicadoras, é equivalente à distribuição cumulativa da variável. Assim, estimativas calculadas para locais não amostrados proporcionam uma medida da incerteza de que o valor nestes locais estará abaixo ou acima do valor de corte, desta forma considerou-se somente a área do triângulo textural para o cálculo das variâncias amostrais, evitando assim a aplicação das áreas extrapoladas fora do domínio cartesiano em que não havia coordenadas amostrais a partir das relações entre areia, silte e argila.

O desempenho e acurácia foi determinado a partir de análise estatística através dos seguintes

parâmetros: coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e validação cruzada do semivariograma (VC).

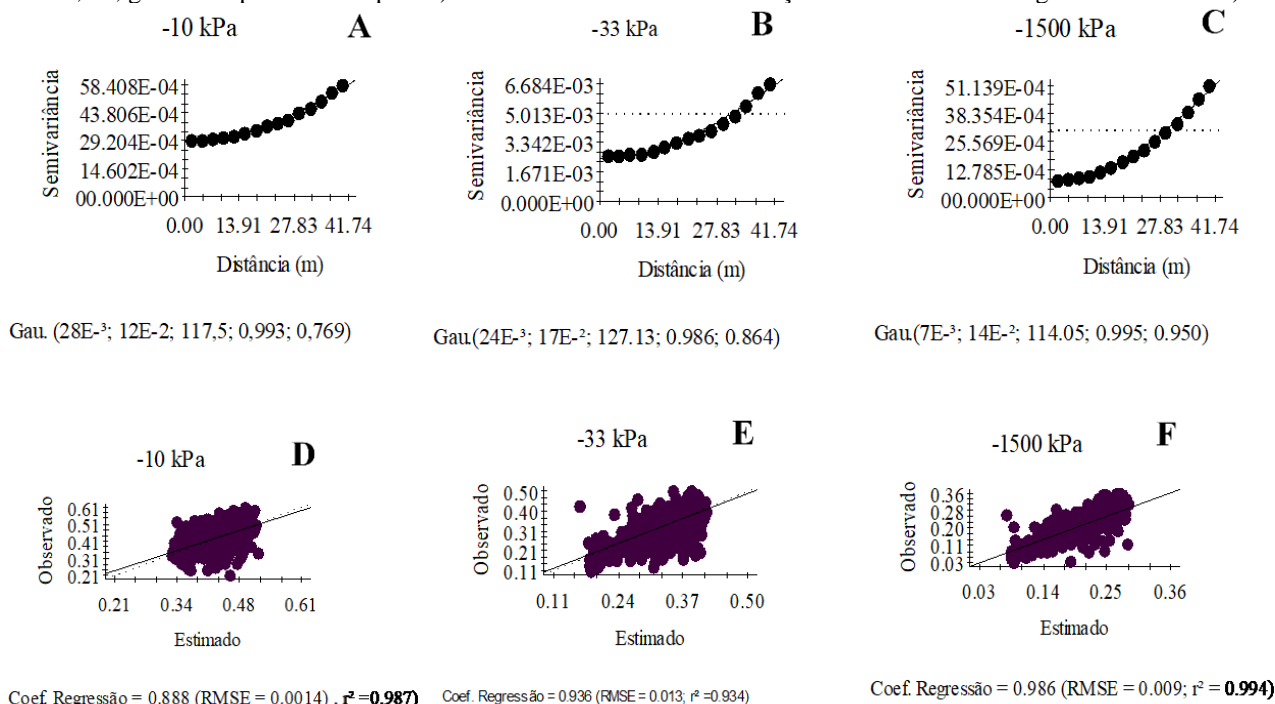
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 (A-B-C) apresenta os semivariogramas experimentais e teóricos obtidos para os potenciais de -10 kPa, -33 kPa e -1500 kPa. Os valores de efeito pepita para todas as estimativas se enquadraram ao modelo gaussiano, correspondendo a 28%, 24% e 7% da variância total, respectivamente, para -10 kPa (A), -33 kPa (B) e -1500 kPa (C). Este comportamento dos erros vinculados ao modelo, indicam que a variação ocorre em escalas muito pequenas para as estimativas a -1500 kPa, enquanto que, as demais não podem ser descritas apenas por variações na textura do solo, devendo algum atributo estrutural ser considerado, destacando aqueles mais

sensíveis ao manejo do solo (ex. densidade do solo e macroporosidade).

Os valores de dependência espacial representados para -10 kPa, -33 kPa e -1500 kPa foram, respectivamente, de 76,9%, 86,4 % e 95%. Estes valores indicam a fraca dependência espacial do conjunto amostral. Tal fato é evidenciado pelo ajuste ao modelo gaussiano e pela não distribuição geral de medidas texturais suficientes na formação de coordenadas no plano cartesiano. Dessa forma, o valor de uma variável não se assemelha ao valor de sua amostra vizinha, levando assim, a uma elevada variabilidade espacial. Ramos et al. (2014), em solos de Portugal, associaram estas estimativas elevadas de dependência espacial ao efeito da densidade do solo, matéria orgânica, estrutura, mineralogia do solo, composição química do solo e uso e manejo da terra nas propriedades de retenção de água.

Figura 2 - Padrão de distribuição espacial de modelagem geoestatística para as estimativas de retenção de água em solos do Rio Grande do Sul em diferentes potenciais matriciais. A-B-C: modelo de semivariograma (efeito pepita; patamar, alcance, R^2 , grau de dependência espacial). D-E-F: Coeficientes de validação cruzada das modelagens de estimativa).



Fonte: Autores (2021).

Os ajustes a partir das validações cruzadas (Figura 2 D-E-F), mostram RMSES extremamente baixos, variando entre 0,0014 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (-10 kPa); 0,009 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (-1500 kPa) e 0,013 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (-33 kPa), tornando real a sua aplicação nas estimativas de retenção de água para o Estado do Rio Grande do Sul. Apesar dos

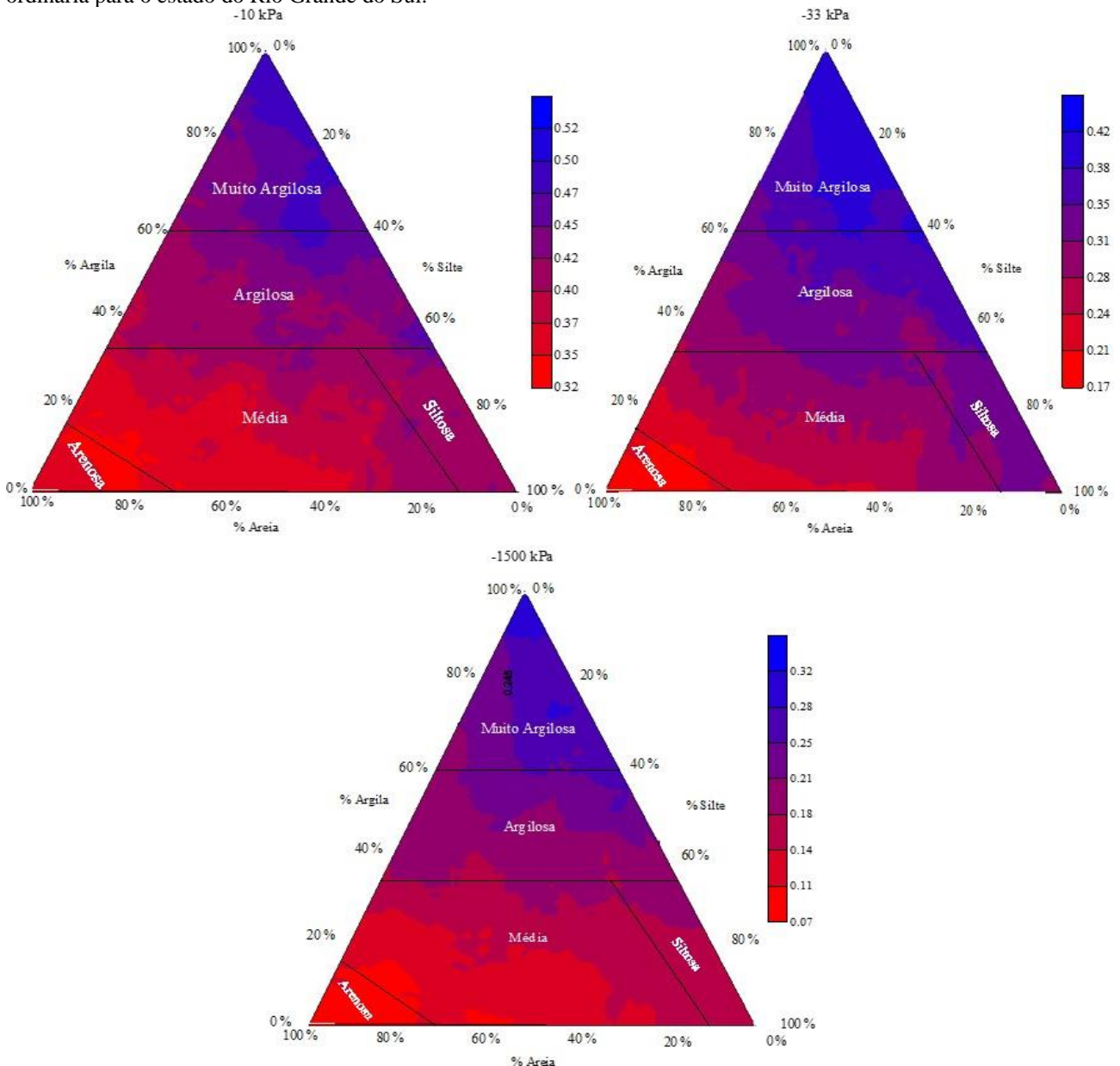
efeitos de variabilidade já evidenciados, as estimativas baseadas nas coordenadas texturais mostram variações a partir do erro médio de 28,6%, 22,4% e 1,7% respectivamente aos potenciais de -10 kPa, -33 kPa e -1500 kPa. Isso pode ser justificado pelo elevado número de observações do conjunto amostral, evidenciando assim, a forte

correlação entre os resíduos, mesmo a curtas distâncias. Assim, espera-se uma maior contribuição dos resíduos ao prever o teor de água nessas condições.

A Figura 3 apresenta os diagramas ternários desenvolvidos para estimar os conteúdos de água a partir da distribuição do tamanho de partículas. As abordagens revelaram, como esperado, que os valores de retenção de água no solo foram

menores nas classes de textura mais grosseiras e aumentaram gradualmente com o incremento dos teores de argila e silte. As previsões para as regiões do triângulo de textura onde poucas informações estavam disponíveis (por exemplo, a classe de textura arenosa e a região do triângulo de textura com teor de argila superior a 65%), tendem a evidenciar os erros já comentados de fraca dependência espacial e elevado efeito pepita.

Figura 3 - Diagramas ternários para valores de conteúdo de água no solo nos potenciais matriciais estimado com krigagem ordinária para o estado do Rio Grande do Sul.



Fonte: Autores (2021).

Verifica-se diferentes regiões do triângulo textural microvariações na distribuição de algumas classes texturais, fator este que pode ser decorrente da variabilidade exercida pela

distribuição dos dados, associados a fatores intrínsecos do solo. Desta forma, conforme destacado em Ramos et al. (2014), esta condição pode ser decorrente devido ao uso de uma tendência

espacial baseada apenas na textura do solo, combinada com resíduos espacialmente correlacionados, que também podem ser responsáveis pelas informações de textura que não foram incluídas no modelo de tendência a partir do plano cartesiano.

Esta observação é um indicativo de que, apesar da interpolação englobar coordenadas no plano cartesiano gerando novas estimativas de retenção de água, os valores são relativamente confiáveis, mesmo em função da microvariabilidade existente no conjunto amostral. Entretanto, as diferenças entre o número de observações utilizados no desenvolvimento deste estudo, comparados com os de Ramos et al. (2014) foram substancialmente superiores, evidenciando assim a importância em se utilizar um grande número de observações nas interpolações geoestatísticas mesmo tendo conhecimento da influência da variabilidade amostral do conjunto.

4. CONCLUSÕES

A abordagem geoestatística foi capaz de fornecer estimativas usando apenas a proporção relativa de diferentes partículas granulométricas (areia, silte e argila) como dados de entrada. Entretanto, o elevado erro de efeito pepita é um indicativo de possíveis modificações e inserção de variáveis físicas de domínio estrutural. Desta forma, diagramas ternários podem servir como ferramentas simplificadas para estimar essas propriedades hidráulicas a partir da distribuição de tamanho de partículas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento de bolsa de estudo que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

BEHERA, S. K.; SHUKLA, A. K. Spatial distribution of surface soil acidity, electrical Conductivity, soil organic carbon content and exchangeable Potassium, calcium and magnesium in some cropped acid Soils of India. **Land Degradation & Development**, Lewisburg, v. 26, n. 3, p. 71–79, 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.2306>. Acesso em: 02 dez. 2021.

BROWN, J.D.; HEUVELINK, G.B.M. 79 Assessing uncertainty propagation through physically based models of soil water flow and solute transport. **Encyclopedia of Hydrological Sciences**, Amsterdam, v. 32, n. 1 p. 1-15, 2006. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/0470848944.hsa081>. Acesso em: 02 dez. 2021.

GRASHEY-JANSEN, S. Optimizing irrigation efficiency through the consideration of soil hydrological properties – examples and simulation approaches. **Erdkunde**, Berlin, v. 68, n. 2 p. 33-48, 2014. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/24365168>. Acesso em: 02 dez. 2021.

HORNE, D.J.; SCOTTER, D.R. The available water holding capacity of soils under pasture. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 177, n. 4, p. 165-171, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037837741630258X>. Acesso em: 02 dez. 2021.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, p. 561, 1989.

LIU, J.H.; YANG, M.; ZHAO, X.; ZHANG, H. Spatial distribution patterns of benthic microbial communities along the Pearl Estuary, China. **Systematic and Applied Microbiology**, Berlin, v. 37, n. 4, p. 578–589, 2014. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25467555/>. Acesso em: 07 dez. 2021.

MANTOVANELLI, B.C.; PETRY, M.T.; WEILER, E.B.; CARLESSO, R. Geostatistical interpolation based ternary diagrams for estimating water retention properties in soils in the Center-South regions of Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 209, n. 104973, p. 104793, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016719872100043X>. Acesso em: 12 dez. 2021.

MCNEILL, S. J.; LILBURNE, L. R.; CARRICK, S.; WEBB, T. H.; CUTHILL, T.

Pedotransfer functions for the soil water characteristics of New Zealand soils using S-map information. **Geoderma**, Amsterdam, v. 326, n. 2, p. 96-110, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706117312715>. Acesso em: 10 dez. 2021.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. B.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 4, p. 848-853, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/B3bjVtTGFFM4VfYCS7cRQYL/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 10 out. 2021.

RAMOS, T. B.; HORTA, A.; GONÇALVES, M. C.; MARTINS, J. C.; PEREIRA, L. S. Development of ternary diagrams for estimating water retention properties using geostatistical approaches. **Geoderma**, Amsterdam, v. 230-231, n. 2, p. 229-242, 2014. Disponível em: <https://www.repository.utl.pt/handle/10400.5/13609>. Acesso em: 02 de dezembro de 2021.

SAITO, H.; MCKENNA, A.; ZIMMERMAN, D. A.; COBURN, T. C. Geostatistical interpolation of object counts collected from multiple strip transects: ordinary kriging versus finite domain kriging, *Stoch. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, San Diego, v. 19, n. 3, p. 71-85, 2005. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Geostatistical-interpolation-of-object-counts-from-Saito-McKenna/bc86a533a94bf3340bc6cfe0088fb10a9d2a3a0e>. Acesso em: 02 dez. 2021.

SULIS, M.; PANICONI, C.; RIVARDI, C.; HARVEY, R.; CHAUMONT, D. Assessment of climate change impacts at the catchment scale with a detailed hydrological model of surface-subsurface interactions and comparison with a land surface model. **Water Resources Research**, Stanford, v. 19, n. 2, p. 1-22, 2011. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2010WR009167>. Acesso em: 10 dez. 2021.