

ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESTRUTURAL DO SOLO UTILIZANDO GEOESTATÍSTICA EM CULTIVO DE SORGO FORRAGEIRO

THIAGO BEZERRA DOS SANTOS¹, FRANCISCA PRISCILA DE LIMA PINHEIRO²,
MARISA PORFÍRIO GOMES SOARES³, VINICIUS BITENCOURT CAMPOS CALOU⁴,
ALEXANDRE REUBER ALMEIDA DA SILVA⁵

¹Departamento de Engenharia Agrícola, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – (IFCE) - Campus Iguatu, Rodovia Iguatu / Várzea Alegre, km 05, s/n, Vila Cajazeiras, CEP: 63503-790, Iguatu, Ceará – Brasil, santos.bezerra08@aluno.ifce.edu.br

²Departamento de Engenharia Agrícola, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – (IFCE) - Campus Iguatu, Rodovia Iguatu / Várzea Alegre, km 05, s/n, Vila Cajazeiras, CEP: 63503-790, Iguatu, Ceará – Brasil, francisca.priscila07@aluno.ifce.edu.br

³Departamento de Engenharia Agrícola, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – (IFCE) - Campus Iguatu, Rodovia Iguatu / Várzea Alegre, km 05, s/n, Vila Cajazeiras, CEP: 63503-790, Iguatu, Ceará – Brasil, marisa.porfirio.gomes61@aluno.ifce.edu.br

⁴Departamento de Engenharia Agrícola, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – (IFCE) - Campus Iguatu, Rodovia Iguatu / Várzea Alegre, km 05, s/n, Vila Cajazeiras, CEP: 63503-790, Iguatu, Ceará – Brasil, vinicius.calou@ifce.edu.br

⁵Departamento de Engenharia Agrícola, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – (IFCE) - Campus Iguatu, Rodovia Iguatu / Várzea Alegre, km 05, s/n, Vila Cajazeiras, CEP: 63503-790, Iguatu, Ceará – Brasil, alexandre.reuber@ifce.edu.br

RESUMO: Entender como se dá a funcionalidade dos atributos físicos do solo é necessário para que haja um manejo apropriado para o cultivo. Deste modo, o presente estudo teve como objetivo avaliar diferentes interpoladores geoespaciais para a espacialização de atributos físicos do solo em área cultivada com sorgo (*Sorghum bicolor*). O experimento foi realizado no IFCE - Campus Iguatu, em um solo de classe textural Franco Arenosa. Foram coletados 56 pontos amostrais, em uma malha regular de 15,5 m em uma área de 1,2 ha e inferidas a densidade do solo (DS), a densidade de partículas (DP) e a porosidade total do solo (PTS). Os algoritmos foram avaliados pelo cálculo da raiz quadrada do erro médio (RMSE, do inglês *root mean squared error*), para recomendação do melhor algoritmo para cada atributo físico do solo, sendo o IDW (*Inverse Distance Weighting*) mais recomendado para a DS, o TIN (*Triangulated Irregular Network*) para a DP e a Krigagem ordinária para PTS. Por meio da geoestatística é possível visualizar áreas com necessidade de manejo, aplicando uma prática ao solo para melhorar a sua estrutura em um determinado ponto crítico afim de que se tenha uma boa produção, possibilitando um solo adequado para o cultivo.

Palavras-chave: Atributos físicos, *Sorghum bicolor*, interpolador.

SOIL STRUCTURAL VARIABILITY ANALYSIS USING GEOSTATISTICS IN FORAGE SORGHUM CULTIVATION

ABSTRACT: Understanding the functionality of soil physical attributes is necessary to provide appropriate management for cultivation. Thus, the present study aimed to evaluate different geospatial interpolators for the spatialization of soil physical attributes in an area cultivated with sorghum (*Sorghum bicolor*). The experiment was carried out at IFCE - Campus Iguatu, in a soil of textural class “Franco Arenosa”. 56 sample points were collected in a regular 15.5 m mesh in 1.2 ha, and soil density (SD), particle density (PD) and total soil porosity (TDP) were inferred. The algorithms were evaluated by calculating the root mean squared error (RMSE), to recommend the best algorithm for each physical attribute of the soil, being the IDW (*Inverse Distance Weighting*) most recommended for DS, the TIN (*Triangulated Irregular Network*) for DP and the Ordinary Kriging for PTS. Through geostatistics it is possible to visualize areas in need of management,

applying a practice to the soil to improve its structure at a certain critical point in order to have a good production, enabling a soil suitable for cultivation.

Keywords: Physical attributes, *Sorghum bicolor*, interpolator.

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da distribuição espacial das propriedades do solo é de suma importância para determinação dos parâmetros responsáveis pelo rendimento das culturas, sendo indispensável para alcançar uma agricultura sustentável (Weirich Neto *et al.*, 2006). Nesse contexto, a geoestatística já é realidade consolidada, sendo utilizada nas análises dos processos pedogenéticos do solo para caracterizar e interpretar as suas propriedades, no âmbito da agricultura de precisão (Bernardi; Perez, 2014).

Os mapas de distribuição espacial são gerados a partir de modelagem matemática por métodos de interpolação, estimando valores para locais não amostrados, a partir de um determinado número de pontos observados em campo (Souza *et al.*, 2010). É necessário comparar os métodos de interpolação, pois os resultados obtidos na geração dos mapas poderão ser diferentes dependendo do método utilizado (Taghizadeh-Mehrjardi *et al.*, 2022). Os métodos de interpolação usados tornam-se ferramentas imprescindíveis, pois os resultados gerados podem subestimar ou superestimar o valor do atributo em estudo (Couto; Scaramuzza; Maraschini, 2002). Nesse sentido, a qualidade da estimativa depende dos atributos em estudo como também na escolha do método de interpolação indicado para características particulares.

Diversos pesquisadores buscaram a avaliação de algoritmos de interpolação para criação de mapas temáticos (Souza *et al.*, 2010; Mendes *et al.*, 2018; Kingsley *et al.*, 2019) obtendo resultados promissores para a espacialização de atributos físicos do solo. Assim, o entendimento da variabilidade dos atributos do solo e da geoestatística, auxilia a aumentar a produtividade das culturas e realizar de modo mais assertivo, o manejo ideal que cada tipo de solo necessita em áreas heterogêneas, a obtenção da correta

distribuição espacial para tais atributos é relevante no planejamento agrícola, no que diz respeito à instalação e manejo das culturas (Silva *et al.*, 2008). Um solo que não possui um manejo adequado para conservar sua estrutura poderá provocar uma compactação, interferindo o sistema radicular das culturas. Diversos autores têm citado e buscado métodos para que se resolvam os problemas gerados por um manejo fora dos padrões técnicos.

Deste modo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar diferentes interpoladores para a criação de mapas temáticos de parâmetros físicos do solo que auxiliem na tomada de decisão do manejo agrícola adequado em uma área de produção.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em área agrícola de 1,2 ha, no município de Iguatu, Ceará, com altitude de 214 m, cujas coordenadas centrais são 6°23'47,8"S e 39°15'52,2"W (Figura 1).

Foram coletados 56 pontos amostrais de solos em malha regular de 15,5 m de distância entre tradagens, em cultivo de sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor*) "ponta negra". Essa espécie é cultivada na área a fim de produzir silagem para alimentar os animais, pois apresenta alta produção de biomassa com baixo custo, adaptada à região do semiárido nordestino, tolerante à seca, à toxicidade por Alumínio e à acidez do solo, tolerante ao fotoperiodismo e resistente a doenças.

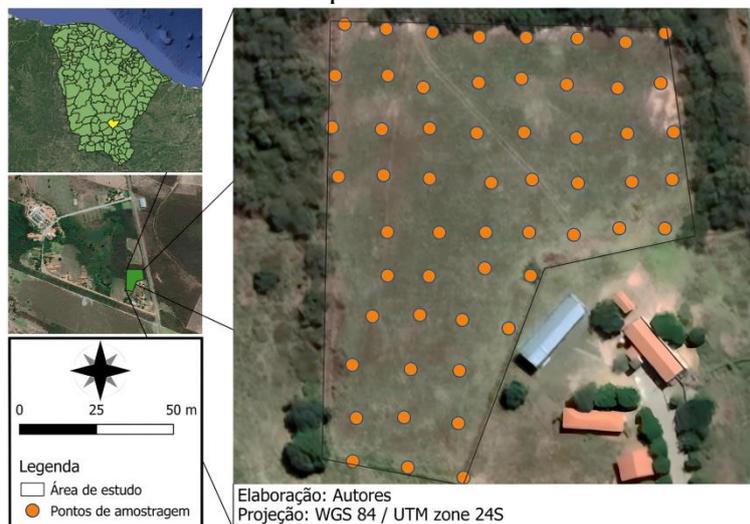
As amostras indeformadas foram coletadas em profundidade de 0 a 10 cm do perfil do solo, utilizando o trado do tipo castelinho e georreferenciadas com GNSS de navegação (Figura 1).

Para obterem-se os parâmetros de densidade do solo (DS), densidade de partículas (DP) e a porosidade total do solo (PTS), utilizou-se o método do balão volumétrico (Embrapa, 1997). Com o

excedente das amostras foi feita análise granulométrica afim de que se pudessem obter os teores de areia, silte e argila, após a secagem por meio de estufa a 105°C pelo método de peneiramento em malha de 2 mm,

dispersão e sedimentação. O solo da área é classificado como Argissolo Vermelho Amarelo, cuja classe textural na camada superficial (0 - 10 cm) classifica-se como Franco Arenoso.

Figura 1. Localização da área amostral e dos pontos de coleta



Fonte: elaborada pelos autores

Os interpoladores utilizados foram a krigagem ordinária, um método de interpolação espacial utilizado para estimar valores em locais onde não há medições, com base em dados observados em outros pontos, o IDW (*Inverse Distance Weighting*) gera dados atribuindo pesos aos pontos, então quanto mais próximo do ponto maior vai ser o peso atribuído e a TIN (*Triangulated Irregular Network*), que gera valores com uma rede de triângulos com qualquer valor amostral.

Foi aplicado o cálculo da raiz quadrada do erro médio (RMSE), responsável por mensurar a diferença entre os valores previstos e os valores reais de um modelo de previsão ou regressão, sob os interpoladores.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\hat{y}_i - y_i}{n}} \quad (1)$$

Em que:

n- número de observações;

y_i - valor real da observação i ;

\hat{y}_i - é o valor predito da observação i .

Dos 56 pontos amostrados, foram utilizados 36 pontos para o processamento dos algoritmos avaliados e 20 pontos para o cálculo do RMSE, no intuito de se obter o interpolador que melhor apresenta assertividade para porosidade, densidade do solo e densidade dos sólidos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os RMSE obtidos em cada um dos processos geoestatísticos são apresentados na Tabela 1, em que os interpoladores que apresentaram uma maior precisão nas previsões de valores observados em campo para locais não amostrados foram: TIN para a densidade dos sólidos com valor de 0,0986; IDW para a densidade do solo com valor de 0,0533e krigagem ordinária para a porosidade do solo com valor de 3,7574.

Tabela 1. Valores do RMSE para todos os atributos de solo interpolados na área de produção de sorgo forrageiro, Iguatu, Ceará, Brasil.

Atributos do solo	Krigagem	TIN*	IDW**
Densidade dos sólidos	0,1103	0,0986	0,1091
Densidade do solo	0,0551	0,0642	0,0533
Porosidade do solo	3,7574	3,9918	3,8531

*: TIN (*Triangulated Irregular Network*); **: IDW (*Inverse Distance Weighting*);

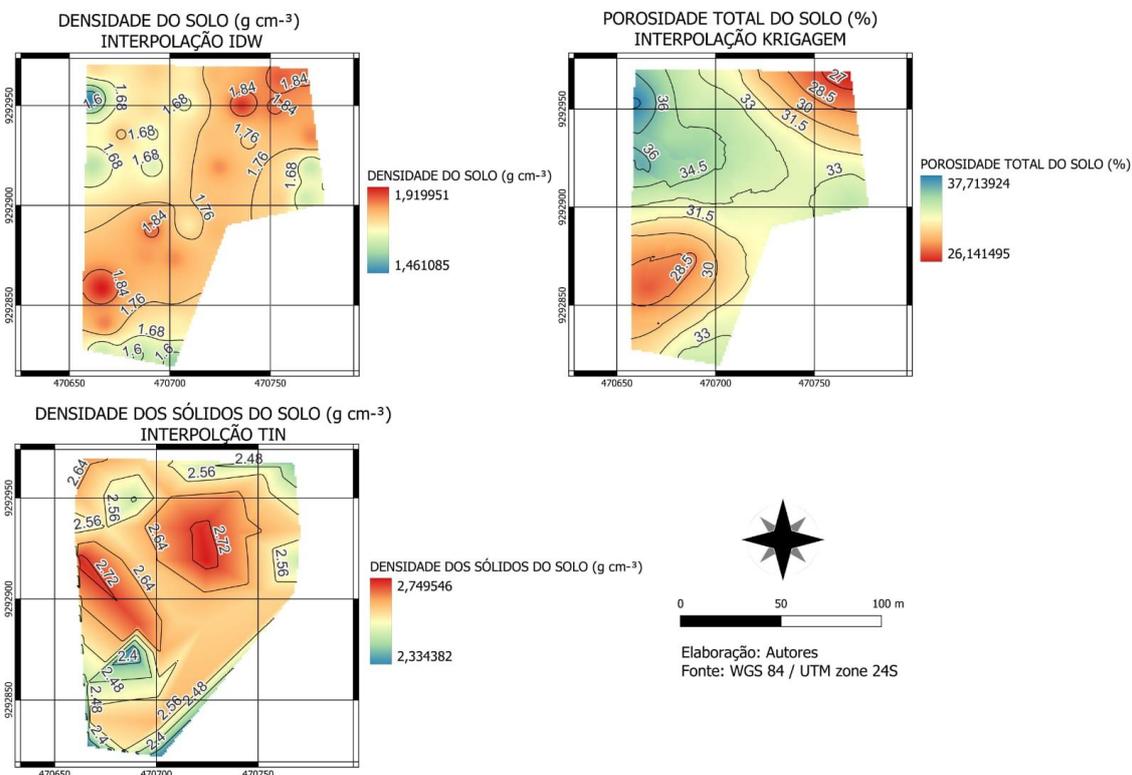
Fonte: elaborada pelos autores

A predição dos atributos físicos do solo apresentou resultados representativos dentro de cada método de interpolação espacial dos dados (Mendes *et al.*, 2018). A qualidade da estimativa depende tanto da escolha dos métodos de interpolação, como também da aplicação apropriada de métodos indicados para as características dos dados em estudo (Souza *et al.*, 2010). Como se pode observar a aplicabilidade do RMSE nos distintos interpoladores trouxeram valores com estimativas próximas de zero com exceção da porosidade do solo que apresentou erros mais

elevados, até mesmo para o interpolador que melhor lhe representou, a krigagem ordinária.

Os três métodos de interpolação foram eficientes na estimativa de valores para locais não amostrados. Assim, todos os interpoladores utilizados no presente trabalho apresentaram valores considerados aceitáveis para sua utilização, com uma margem de erro com baixa amplitude. Os pontos amostrados proporcionaram mapas temáticos dos atributos físicos do solo, que podem embasar melhor tomadas de decisões e auxiliar no manejo agrícola a partir da composição de áreas de manejo, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2. Mapas temáticos dos atributos de solo representados pelo algoritmo que apresentou melhor desempenho. Produção de sorgo forrageiro, Iguatu, Ceará, Brasil



Fonte: elaborada pelos autores

Diferentemente dos resultados obtidos por Mendes *et al.* (2018), a interpretação da análise de regressão linear dos atributos mensurados em campo e preditos usando os métodos de interpolação, permite inferir que para todos os atributos mensurados no seu estudo, o IDW mostrou-se o melhor método e, conseqüentemente, o cálculo da NC apresentou RMSE variando de 20 kg ha⁻¹ (IDW) a 270 kg ha⁻¹ (*Simple Kriging* e *Random Forest*). Em seu estudo, o IDW foi o que apresentou melhor resposta aos atributos analisados, com altas correlações na regressão e erro quadrado médio baixo, enquanto os outros interpoladores apresentaram valores maiores. Como aconteceu ao submeter os dados de densidade do solo, onde mesmo com uma diferença pequena, o IDW conseguiu atingir uma menor margem de erro quando comparado aos demais interpoladores (krigagem ordinária e TIN).

Já para Souza *et al.* (2010), a Krigagem ordinária apresentou um maior coeficiente de determinação do semivariograma (R^2_{VC}) e os menores erros médios absolutos (EMA) e erro médio relativo (EMR) para os três atributos químicos estudados em relação ao inverso do quadrado da distância (IDW). Porém, os dois métodos de interpolação foram eficientes na estimativa de valores para locais não amostrados.

Os pontos amostrados proporcionaram mapas detalhados das condições em que área se encontra (Figura 2), podendo auxiliar na tomada de decisões no preparo desse solo para receber a cultura que será plantada. É no preparo do solo que a planta terá, segundo Singer e Ewing (2000), profundidade efetiva de enraizamento, porosidade total, distribuição e tamanho dos poros, distribuição do tamanho das partículas, densidade do solo, resistência do solo à penetração das raízes, intervalo hídrico ótimo, índice de compressão e estabilidade dos agregados.

Estima-se que a porosidade total da maioria dos solos normalmente situa-se na faixa de 30% a 60% (Hillel, 1970; Kiehl, 1979). Para Libardi (2012), a porosidade do solo está inversamente relacionada com a densidade do solo, isto é, quanto maior essa

densidade, menor a porosidade. Valores representativos de porosidade total do solo para a classe textural arenosa variam dentre 32,1 a 47,2%. Sabendo que o solo estudado é classificado como franca arenosa, os valores se aproximam bastante dos determinados por Libardi (2012).

No geral, os valores da densidade dos solos agrícolas variam de 0,9 a 1,8 g cm⁻³, dependendo da textura e do teor de matéria orgânica do solo (Klein, 2014). Segundo Reichert, Reinert e Braida (2003), o limite crítico de densidade que é capaz de propiciar um intervalo hídrico ótimo para os vegetais para um solo de textura arenosa deve situar-se entre 1,7 e 1,8 g cm⁻³. Para Libardi (2012), em termos gerais, a densidade de amostras de solos minerais naturais varia de 0,70 a 2,0 g cm⁻³. Para os autores, os valores da densidade da camada superficial representativa dos solos cuja classe textural é arenosa variam entre 1,3 e 1,8 g cm⁻³.

Van Lier (2016) acredita que na maior parte dos solos minerais, a densidade dos sólidos varia de 2,6 a 2,7 g cm⁻³, refletindo a presença dominante do quartzo, cuja densidade das partículas é 2,65 g cm⁻³. Para o autor, a presença de óxidos de ferro e metais pesados tende a aumentar o valor, enquanto a matéria orgânica cuja densidade dos sólidos se situa ao redor de 1,2 g cm⁻³, contribui para o seu abaixamento e que em determinado solo, os valores da densidade das partículas das camadas mais superficiais, ricas em matéria orgânica, são relativamente inferiores aos das camadas superficiais. Assim, é razoável admitir que o manejo do solo poderá modificar a densidade dos sólidos ao longo do tempo, se com esse manejo houver alteração significativa no conteúdo de matéria orgânica. Para Libardi (2012), um solo mineral médio, pode-se, numa primeira aproximação, assumir o valor da densidade das partículas como sendo igual a 2,65 g cm⁻³. Este valor aumenta quando o solo contém alta porcentagem de minerais como dióxido de manganês e dióxido de titânio e diminui quando se aumenta o seu teor de matéria orgânica. Para esse autor, a densidade da matéria orgânica varia de 1,30 a 1,50 g cm⁻³.

Como se pode observar, os atributos estudados estão todos dentro dos limites ditados por alguns autores levando em consideração que o perfil estudado é caracterizado como franco arenoso, tendo como base esses conhecimentos dos limites desejáveis para cada atributo, pode melhor definir zonas de manejo que necessitam de práticas agrícolas para a operação de descompactação do solo, como escarificadores e subsoladores que são os implementos mais usados devido à maior capacidade de penetração e menor desagregação do solo, em relação aos arados e grades de discos (Araújo *et al.*, 2001).

4 CONCLUSÕES

Foi possível realizar a espacialização dos atributos físicos do solo como também assumir os interpoladores que melhor estimou os atributos físicos do solo em pontos não amostrados, tendo conhecimento que para diferentes atributos os interpoladores se comportam de maneira diferente, onde cada um deles foi apresentado como melhor opção para pelo menos um dos parâmetros estudados, gerando mapas temáticos de densidade do solo (DS), densidade de partículas (DP) e porosidade total do solo (PTS), auxiliando no manejo agrícola em áreas que se encontram em estado crítico ou adequado em sua estrutura.

Com base em mapas deste tipo, é possível propor estratégias de manejo, como a adoção de práticas conservacionistas do solo, como cultivo por meio da adubação orgânica, cobertura morta, rotação de cultura e plantio direto, assim contribuindo para melhorar a produção de sorgo forrageiro na área estudada.

5 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. G.; CASÃO JÚNIOR, R.; SIQUEIRA, R. **Mecanização do plantio direto**: Problemas e soluções. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná, 2001. (Informativo de Pesquisa, 137).

BERNARDI, A. C. C.; PEREZ, N. B. Agricultura de precisão em pastagens. *In*: BERNARDI, A. C. C. PEREZ, N. B. **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 492-499. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1002959/agricultura-de-precisao-resultados-de-um-novo-olhar>. Acesso em: 30 out. 2023.

COUTO, E. G.; SCARAMUZZA, J. F.; MARASCHINI, L. Influência dos métodos de interpolação dos dados nos mapas usados na agricultura de precisão. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2002, Viçosa. **Anais [...]**. Viçosa: SIAP, 2002. p. 1-5. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Eduardo-Couto-5/publication/242193177_INFLUENCIA_DO_S_METODOS_DE_INTERPOLACAO_DOS_DADOS_NOS_MAPAS_USADOS_NA_AGRICULTURA_DE_PRECISAO/links/54e602e30cf277664ff1d656/INFLUENCIA-DOS-METODOS-DE-INTERPOLACAO-DOS-DADOS-NOS-MAPAS-USADOS-NA-AGRICULTURA-DE-PRECISAO.pdf. Acesso em: 30 out. 2023.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA: CNPS, 1997. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/169149/1/Manual-de-metodos-de-analise-de-solo-2-ed-1997.pdf>. Acesso em: 30 out. 2023.

HILLEL, D. **Solo e água**: fenômenos e princípios físicos. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. Disponível em: <https://www.skoob.com.br/livro/pdf/manual-de-edafologia/322270/edicao:361058>. Acesso em: 30 out. 2023.

KINGSLEY, J.; LAWANI, S. O.; ESTHER, A. O.; NDIYE, K. M.; SUNDAY, O. J.; PENÍŽEK, V. Predictive mapping of soil properties for precision agriculture using geographic information system (GIS) based geostatistics models. **Modern Applied Science**, Richmond Hill, v. 13, n. 10, p. 60-77. 2019. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/ibn/masjnl/v13y2019i10p60.html>. Acesso em: 30 out. 2023.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. 3. ed. Passo Fundo: UPF Editora, 2014.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: https://www.academia.edu/39131092/DIN%C3%82MICA_DE_%C3%81GUA_NO_SOLO_Libardi. Acesso em: 30 out. 2023.

MENDES, S. W.; MELO, D. J. A.; MOLIN, J. P.; CORRÊDO, L. P.; TAVARES, P. A. Geoestatística na variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos em solo tropical. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 3., 2018, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: IIDV, 2018. p. 1-13. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330835584_GEOESTATISTICA_NA_VARIABILIDADE_ESPACIAL_DOS_ATRIBUTOS_FISICOS_E_QUIMICOS_EM_SOLO_TROPICAL. Acesso em: 30 out. 2023.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, n. 27, p. 29-48, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/274250019_Qualidade_dos_solos_e_sustentabilidade_de_sistemas_agricolas. Acesso em: 30 out. 2023.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; OLIVEIRA, R. B. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agricultura de precisão.

Idesia, Arica, v. 26, n. 2, p. 75-81, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/262467662_AVALIACAO_DE_INTERPOLADOS_ESTADISTICOS_E_DETERMINISTICOS_NA_ESTIMATIVA_DE_ATRIBUTOS_DO_SOLO_EM_AGRICULTURA_DE_PRECISAO. Acesso em: 30 out. 2023.

SINGER, M.; EWING, S. Soil quality. *In*: SUMNER, M. E. (ed.). **Hand book of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. 271-298.

SOUZA, S. G.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; ROCHA, W. S. D. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 11, n. 1, p. 73-81, 2010. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/agraria/article/view/15939%26gt%3B>. Acesso em: 30 out. 2023.

TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R.; KHADEMI, H.; KHAYAMIM, F.; ZERAATPISHEH, M.; HEUNG, B.; SCHOLTEN, T. A comparison of model averaging techniques to predict the spatial distribution of soil properties. **Remote Sensing**, Basiléia, v. 14, n. 3, p. 472-488, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/3/472>. Acesso em: 30 out. 2023.

VAN LIER, Q. de J. (ed.). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.

WEIRICH NETO, P. H.; BUZOLINI JUNIOR, O.; ROCHA, J. V.; BORGHI, E.; SVERZUT, C. B. Um estudo da variabilidade espacial do conteúdo de areia do solo, utilizando diferentes métodos de interpolação. **Ciências Agrárias e Engenharias**, Ponta Grossa, v. 12, n. 1, p. 41-49, 2006. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/exatas/article/view/863>. Acesso em: 30 out. 2023.