

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 28/02/2025.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CAMPUS DE JABOTICABAL

**SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA COMO COVARIÁVEL DE
ATRIBUTOS DE SOLO**

Tayna Lara Serantoni da Silveira

Engenheira Agrônoma

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CAMPUS DE JABOTICABAL

SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA COMO COVARIÁVEL DE
ATRIBUTOS DE SOLO

Tayna Lara Serantoni da Silveira

Orientador: Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

2023

S587 Silveira, Tayna Lara Serantoni da
Suscetibilidade magnética como covariável de atributos de
solo /Tayná Lara Serantoni da Silveira. -- Jaboticabal, 2023
50 p. : tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias,
Jaboticabal

1. Geoestatística. 2. Krigagem. 3. Regressão. I.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA COMO COVARIÁVEL DE ATRIBUTOS DE SOLO

AUTORA: TAYNA LARA SERANTONI DA SILVEIRA

ORIENTADOR: GENER TADEU PEREIRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. GENER TADEU PEREIRA (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia e Ciências Exatas DECEX / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br GENER TADEU PEREIRA
Data: 11/12/2023 19:20:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia e Ciências Exatas DECEX / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br ALAN RODRIGO PANOSSO
Data: 11/12/2023 20:46:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. DANIEL DE BORTOLI TEIXEIRA (Participação Virtual)

Grupo São Martinho S/A / Pradópolis/SP

Documento assinado digitalmente
gov.br DANIEL DE BORTOLI TEIXEIRA
Data: 13/12/2023 05:26:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jaboticabal, 28 de agosto de 2023

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

TAYNA LARA SERANTONI DA SILVEIRA – nascida em 13 de junho de 1995 em Votuporanga – SP, graduada em Engenharia Agrônômica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho pelo Campus de Ilha Solteira em 2018. Foi bolsista CNPq de iniciação científica no período de 2015 a 2017. Atualmente é aluna de Mestrado do curso de Pós-Graduação em Agronomia Ciência do Solo pela FCAV/UNESP Jaboticabal (sendo bolsista CAPES no período de 2020 a 2022). Atua na área de Agronomia, com ênfase em Geoestatística.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por me dar forças e me guiar em todo esse trajeto.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Jaboticabal, a seu corpo docente e todas as pessoas que nela exercem uma função, pelo apoio e incentivo aos alunos.

Ao docente Gener Tadeu Pereira, pela orientação e confiança durante esses anos pandêmicos de pós-graduação.

Aos meus pais, Maria e Carlos por me permitirem almejar uma boa formação e seguir com meus planos.

Obrigada minhas irmãs, Tayla, Tanielle e Tayane por serem meu Porto Seguro, pelo apoio e força, nunca me permitindo desistir.

A todos os companheiros de estudos, pela ajuda, a qual foi de grande importância para a estruturação deste trabalho.

Aos meus amigos, pelo suporte para enfrentar todas as dificuldades e por proporcionar ótimos momentos.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que muitos de meus objetivos fossem alcançados.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	xi
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Métodos de mapeamento de solos.....	3
2.2 Definição de unidades de mapeamento com o auxílio da suscetibilidade magnética (SM) e atributos do solo	4
2.3 Geoestatística.....	7
3 MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1 Descrição da área e amostragem.....	17
3.2 Análises de dados	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	18
5 CONCLUSÕES	28
6 REFERÊNCIAS	29

SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA COMO COVARIÁVEL DE ATRIBUTOS DE SOLO

RESUMO- Solos brasileiros apresentam grande diversidade dos fatores e processos de formação do solo o que, aliado a grande extensão territorial nacional, dificulta a obtenção de mapas em escalas detalhadas para todo o território. Diversas metodologias propõem auxiliar a identificação e mapeamento das unidades de solos e de seus atributos. Entretanto, há alguns fatores que podem dificultar o estudo sobre o solo e a variabilidade espacial de seus atributos, como o grande número de amostras, elevado custo e tempo de coleta e análises, além dos impactos ambientais. Um método que tem se mostrado uma alternativa para estimar atributos do solo é o mapeamento da suscetibilidade magnética (SM), que cada vez mais vem ganhando destaque, sendo que a SM é covariativa dos fatores e processos de formação dos solos e, está diretamente relacionada à mineralogia destes. Com a hipótese de que o método de predição por krigagem de regressão tem maior precisão do que as estimativas por krigagem ordinária, este trabalho tem como objetivo utilizar a SM como covariável nas estimativas por krigagem dos atributos de solo para auxiliar no delineamento de unidades de mapeamento, bem como na readequação dos limites entre unidades de solo incorporando simultaneamente informações sobre a variabilidade espacial destes atributos. A área de estudo considerada neste trabalho localiza-se no município de Guataporã/SP, possuindo 870 ha e caracterizada pela presença de Latossolos e Neossolo. Foram coletadas 349 amostras na profundidade de 0-0,25 m para a avaliação da SM, argila, areia, silte e H₂O₂, desta malha foram retirados, aleatoriamente, 20 pontos para serem utilizados nas estimativas das estatísticas dos erros da validação. A utilização da suscetibilidade magnética como covariável nas estimativas por krigagem dos atributos de solo para auxiliar no delineamento de unidades de mapeamento, bem como na readequação dos limites entre unidades de solo incorporando simultaneamente informações sobre a variabilidade espacial destes atributos se mostrou promissora.

Palavras-chave: argila, geoestatística, krigagem de regressão, variabilidade espacial.

MAGNETIC SUSCEPTIBILITY AS A COVARIABLE OF SOIL ATTRIBUTES

ABSTRACT - Brazilian soils present a great diversity of soil formation factors and processes, which, combined with the large national territorial extension, makes it difficult to obtain maps on detailed scales for the entire territory. Several methodologies propose to help identify and map soil units and their attributes. However, there are some factors that can make it difficult to study the soil and the spatial variability of its attributes, such as the large number of samples, high cost and time for collection and analysis, in addition to environmental impacts. A method that has proven to be an alternative for estimating soil attributes is the mapping of magnetic susceptibility (SM), which is increasingly gaining prominence, given that SM is a covariant of soil formation factors and processes and is directly related to their mineralogy. With the hypothesis that the regression kriging prediction method has greater precision than ordinary kriging estimates, this work aims to use SM as a covariate in kriging estimates of soil attributes to assist in the delineation of mapping units, as well as readjusting the limits between soil units, simultaneously incorporating information on the spatial variability of these attributes. The study area considered in this work is located in the municipality of Guatapar/SP, measuring 870 ha and characterized by the presence of Oxisols and Neosols. 349 samples were collected at a depth of 0-0.25 m for the evaluation of SM, clay, sand, silt and H_{Al}. From this mesh, 20 points were randomly removed to be used in estimating validation error statistics. The use of magnetic susceptibility as a covariate in kriging estimates of soil attributes to assist in the delineation of mapping units, as well as in readjusting the limits between soil units while simultaneously incorporating information on the spatial variability of these attributes has shown to be promising.

Keywords: clay, geostatistics, regression kriging, spatial variability.

Lista de tabelas

Tabela 1 - Estatísticas Descritivas das variáveis Argila, Areia Total, H_AI, Silte, SM	20
Tabela 2 - Com resultados da regressão SM com Argila, Areia Total, H_AI, Silte.	21
Tabela 3 -Variogramas ajustados às variáveis Argila, Argila com SM, Areia Total, Areia Total com SM, H_AI, H_AI com SM, Silte, Silte com SM e SM	22
Tabela 4 -Valores da validação da Krigagem Ordinária e Krigagem de regressão: SM das variáveis Argila, Areia Total, H_AI e Silte.....	28

Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo esquemático do conceito de krigagem de regressão em uma transeção regionalizada (Adaptado de Hengl, 2009)	8
Figura 2 - Caracterização da área de estudo. Localização da área amostral (a); mapa geológico na escala 1:500000 (SG – Serra Geral; AD – Depósito Aluvionar; ECD – Depósito ColúvioEluvionar) (b); mapa geomorfológico na escala de Escala 1:100000 (Cc – côncava; Cx – Convexa) (c); mapa pedológico na escala 1:12000 (LVAd - Latossolo Vermelho Amarelo distrófico textura média; LVd - Latossolo Vermelho distrófico textura média; LVdf - Latossolo Vermelho distroférrico textura argilosa; LVef - Latossolo Vermelho eutroférrico textura argilosa; RQod – NeossoloQuartzarênicoórtico distrófico textura arenosa) (d); distribuição espacial das amostras (e). Extraído de Teixeira (2015).	17
Figura 3 -Painel dos gráficos de dispersão, histogramas e correlações entre as variáveis Argila, Areia Total, H_AI, Silte e SM.	21
Figura 4 -Gráficos dos variogramas das variáveis: a) SM, b) Argila, c) Argila com SM, d) Areia, e) Areia com SM, f) H_AI, g) H_AI com SM, h) Silte, e i) Silte com SM..	23/24
Figura 5 -Mapas de Krigagem simples da SM (a) e das variáveis Argila (b), da Argila com a covariável SM (c), Areia total (d), Areia total com a covariável SM (e), H_AI (f), H_AI com a covariável SM (g), Silte (h) e Silte com a covariável SM (i).	25/26/27

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

O entendimento das relações complexas que existem entre os atributos do solo é possibilitado ao conhecer e modelar os padrões do comportamento espacial dos mesmos (Sánchez et al., 2009). Diversas atividades relacionadas aos processos agrícolas são beneficiadas pelo mapeamento dos atributos do solo, entre eles estão: a otimização do uso de insumos agrícolas (White; Zasoski, 1999), a otimização amostral (Pereira et al., 2013), planejamento agrícola, implantação de sistemas de cultivo para cana-de-açúcar (Campos et al., 2008), dentre outras.

Para melhor orientação sobre as práticas de manejo e um desenvolvimento de agricultura sustentável, o conhecimento do solo é fundamental, possibilitando as realizações de ações que garantem segurança alimentar de um território (Ramos et al., 2018). O crescente desenvolvimento sustentável das atividades do setor agropecuário vem sendo influenciado pela intensificação do uso da tecnologia no setor, que possibilita o aumento gradativo da produtividade. Esses avanços tecnológicos têm mostrado a importância de se medir a variação espacial e temporal dos atributos do solo das propriedades, objetivando otimizar o aproveitamento de recursos e a redução de custos (Carvalho et al., 2002). Segundo Oliveira et al. (2017), especialistas têm notado, que os diversos setores da agricultura não podem ser tratados de maneira homogênea no que diz respeito à medição de variáveis nas áreas de produção.

De acordo com Angelico (2006) as análises estatísticas de dados, no passado, consideravam as variáveis aleatórias independentes entre si, ou seja, acreditavam que as observações vizinhas não exerciam influências umas sobre as outras. Entretanto, fenômenos naturais apresentam-se frequentemente com certa estruturação entre vizinhos. Assim, pode-se dizer que as variações não ocorrem ao acaso, apresentando certo grau de dependência espacial. Considera-se indispensável a caracterização da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo por meio de amostragem capaz de representar tais variações (Bottega et al., 2013)

Em conformidade com Oliveira et al. (2005) a variabilidade espacial das propriedades físicas do solo de campos agrícolas é ligada à natureza, como fatores

geológicos e pedológicos de formação do solo, bem como uma parcela da variabilidade pode ser induzida também pelo tipo de cultivo e das práticas de manejo adotadas.

Segundo Webster (1985) o estudo das variações do solo de uma região, acontece há vários anos. Atualmente, a utilização de tecnologias na agricultura tem se mostrado crescente quando se diz respeito a realização do mapeamento dos atributos qualitativos e quantitativos das características do solo, os quais estão ligados à produtividade das culturas, incluindo a adesão ao GPS (Global Positioning System) associado às técnicas de geoestatística (Bottega, E. et al., 2011). Para Campinas et al. (2013) as técnicas de geoestatística permitem quantificar a existência de variações espaciais dos diversos atributos físicos do solo, tornando possível obter uma descrição detalhada destas propriedades no tempo e no espaço.

Para Souza, Marques Júnior e Pereira (2004) conhecer a variabilidade espacial de atributos físicos do solo em cultivos como o da cana-de-açúcar, que são altamente tecnificados, é fundamental no que diz respeito à redução dos custos associados aos sistemas de produção. Entretanto, há alguns fatores que podem dificultar o estudo sobre a variabilidade espacial, haja vista que para que seja realizado é necessário um grande número de amostras, acarretando no aumento dos custos, além do tempo de coleta e das análises dos atributos e os impactos ambientais que podem ser provocados pela utilização de reagentes.

De acordo com Demattê et al. (2007) relata que os altos custos das análises de solos podem interferir, por exemplo, na adesão à agricultura de precisão na América do Sul. Para melhores resultados para determinação de atributos do solo são necessárias metodologias que sejam menos agressivas ao meio ambiente, menos onerosas, e que contribuam para um mapeamento da variabilidade desses atributos com maiores níveis de detalhe. Também utilizados pela agricultura de precisão, esses princípios podem ser a explicação dos altos valores investidos no melhoramento genético das culturas agrícolas, por exemplo (Marques Júnior et al., 2009).

Ao considerar todos esses critérios, um método que tem se mostrado uma alternativa para estimar atributos do solo é o mapeamento da suscetibilidade

magnética (Grimley&Vepraskas, 2000), que cada vez mais vem ganhando destaque como um dos métodos mais utilizados para fins ambientais (Grimley et al., 2004). A suscetibilidade magnética é covariativa dos fatores e processos de formação do solo, e está diretamente relacionada à mineralogia dos mesmos (Camargo et al., 2014). Sua utilização crescente deve-se a simplicidade e baixo custo em sua determinação (Dearing, 1994), e a sua alta relação com os atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo (Siqueira et al., 2010). Para Dearing et al. (1996) a suscetibilidade magnética é ideal para estudos que demandam uma quantidade considerável de amostras. E, de acordo com Marques Júnior et al. (2009), além da importância do tamanho da amostra para representar uma área, outro fator que merece atenção é a metodologia estatística utilizada para o estudo.

Com a hipótese de que o método de predição por Krigagem de regressão tem maior precisão do que as estimativas por KO, este trabalho tem como objetivo utilizar a SM como covariável nas estimativas por krigagem dos atributos de solo para auxiliar no delineamento de unidades de mapeamento, bem como na readequação dos limites entre unidades de solo incorporando simultaneamente informações sobre a variabilidade espacial destes atributos.

5. CONCLUSÕES

- Os erros da validação cruzada por meio da KR foram, de forma geral, menores na área de estudo quando comparados a KO;
- A KR se mostrou muito robusta no mapeamento da variabilidade espacial das variáveis do solo estudadas neste trabalho;
- A utilização da suscetibilidade magnética como covariável nas estimativas por krigagem dos atributos de solo para auxiliar no delineamento de unidades de mapeamento, bem como na readequação dos limites entre unidades de solo

incorporando simultaneamente informações sobre a variabilidade espacial destes atributos se mostrou promissora.

6. REFERÊNCIAS

Andriotti, J. L. S. Introdução à Geoestatística. Acta Geologica. Acta Geológica Leopoldensia, São Leopoldo, v. 11, n.27, p. 5-81, 1988.

Angelico, J. C. (2006). Desempenho da co-krigagem na determinação da variabilidade de atributos do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 30(6), 931-936.

Barbosa, R. S. Erodibilidade de Latossolos predita pela suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa. 2014. 65 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.

Barrón, V.; Mello, J. W. V.; Torrent, J. Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de Reflectância Difusa. In: Novais, R. F.; Alvarez, V. V. H.; Schaefer, C. E. G. R. (Ed.). Tópicos em ciência do solo, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.139-162.

Becegato, V. A., Ferreira, F. J. F. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e suscetibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. Revista Brasileira de Geofísica, v.23, p.371–405, 2005.

Bishop, T F A e McBratney, A B, 2001. A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps, Geoderma, 103:149-160.

Bottega, E. L.; Bottega, S. P.; Silva, S. de A.; Queiroz, D. M. de; Souza, C. M. A. de; Rafull, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v.6, n.2, p. 331- 336, 2011.

Bottega, E. L., Queiroz, D. M., Pinto, F. A. C., & Souza, C. M. A. (2013). Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. *Revista Ciência Agronômica*, 44(1), 1-9.

Brenning, A., Koszinski, S., Sommer, M. Geostatistical homogenization of soil conductivity across field boundaries. *Geoderma*, Amsterdam, v.143, p.254-260, 2008.

Bui, E. A review of digital soil mapping in Australia. In: Lagacherie, P.; McBratney, A.B.; Voltz, M. (Ed.). *Digital soil mapping: an introductory perspective*. Amsterdam: Elsevier, 2007. p.25-37.

Camargo, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. In: Câmara, G. & Medeiros, J.S. eds. *Geoprocessamento para projetos ambientais*. São José dos Campos: INPE, 1998. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf.

Camargo, L. A. Mineralogia da argila por difração de raios x e espectroscopia de reflectância difusa em Latossolos sob diferentes superfícies geomórficas. 2013. 125 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.

Camargo, L.A., Marques Jr, J., Pereira, G.T, Bahia, A.S.R.S., 2014. Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. *Sci. Agric.* 71, 244-256.

Campinas, D. do S. N.; Farias, P. R. da S.; Lima, H. V. de; Oliveira, F. J. de. Variabilidade espacial dos atributos físicos de solos em dois sistemas de manejo na Amazônia Oriental. *Revista Científica Eletrônica de Agronomia*, Garça, v.24, n.2, p.78-87, dez. 2013.

Campos, M.C.C., Marques Jr., J., Pereira, G.T., Souza, Z.M., Barbieri, D.M., 2008. Fertilizer and limestone applications after the harvest of sugarcane as determined by geostatistics techniques. *Cienc. Rural* 38, 974-980.

Carvalho, J. R. P., Da Silveira, P. M., & Vieira, S.R. (2002). Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37(8), 1151-1159.

Carvalho, T. M. Modelagem digital de atributos de solo da Fazenda Edgárdia – Botucatu – SP. 145 f. 2016. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.

Castrignanò, A.; Costantini, E. A. C.; Barbetti, R.; Sollitto, D. Accounting for extensive topographic and pedologic secondary information to improve soil mapping. *Catena*, Amsterdam, v. 77, n. 1, p. 28-38, 2009.

Christensen, R., 2001. *Linear Models for Multivariate, Time Series, and Spatial Data*, 2nd Edition. Springer Verlag, New York, p. 393.

Craik, D. *Magnetism, Principles and Applications*, John Wiley and Sons, p. 1-459. 1995.

Cressie, N. A. C., 1993. *Statistics for Spatial Data*, revised edition. John Wiley & Sons, New York, p. 416.

Crosbie, R. S. et al. Estimating groundwater recharge and its associated uncertainty: Use of regression kriging and the chloride mass balance method. *Journal of Hydrology*, v. 561, p. 1 063-1080, 2018.

Costa, A.C.S., Bigham, J.M., Rhoton, F.E., Traina, S.J., 1999. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. *Clay. Clay. Miner.* 4, 466-473.

De Laco, S. et al. Radon Predictions with Geographical Information System Covariates: From Spatial Sampling to Modeling. *Geographical Analysis*, v. 49, p. 215 - 235, 2017.

Dearing, J. A. *Environmental magnetic susceptibility. Using the BartingtonMS2 System*. British Library, England. 1994. 104 p.

Dearing, J.A., Hay, K.L., Baban, S.M.K., Huddleston, A.S., Wellington, E.M. H., Loveland, P.J. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conicting theories using a national data set. *Geophysical Journal International*, v.127, p.728–734, 1996.

Demattê, J.A.M., Galdos, M.V., Guimarães, R.V., Genú, A.M., Nanni, M.R., Zullo Jr., J. 2007. Quantification of tropical soil attributes from ETM+/LANDSAT -7 data. *Int. J. Remote Sens.* 28, 3813-3829

Dixon, B; Uddameri, V. *GIS and Geocomputation for Water Resource Science and Engineering*. West Sussex: Wiley, 2016. 568 p.

EMBRAPA, 1995. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Normative Procedures for SoilSurveys. Embrapa, Brasília. (in Portuguese).

EMBRAPA, 2007. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual ofsoilanalysismethods. Embrapa, Rio de Janeiro. (in Portuguese)

Englund, E. J.; Sparks, A. R. *GEO-EAS (Geostatistical environmental assessment software) user's guide*. Washington: Battelle Columbus Labs, 1991. 132 p. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/geostatistical-environmental-assessment-software-geoeas>. Acesso em: jun. de 2022.

Forrester, A. I. J.; Sóbester, A.; Keane, A. J. *Engineering design via surrogate modelling: A practical guide*. University of Southampton. 2008. 218 p.

Garrity, D.P.; Agustin, P.C. Historical land use evolution in a tropical acid upland agroecosystem *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Amsterdam, v.53, n.1, p.83- 95, 1995.

Ge, Y. et al. Regression-kriging for characterizing soils with remote sensing data. *Frontiers of Earth Science*, v. 5, p. 239–244, 2011.

Giacomin, G. et al. Análise comparative entre métodos interpoladores de modelos de superfícies. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 66, p. 1315-1329, 2014.

Gonzalez, O. J.; Zak, D. R. Geostatistical analysis of soil properties in a secondary tropical dry forest, St. Lucia, West Indies. *Plant and Soil*, Berlin, v.163, p. 45-54, 1994.

Goovaerts, P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. New York: Oxford University Press, 1997. 483 p.

Gotway, C. A., Stroup, W. W., 1997. A Generalized Linear Model approach to spatial data analysis and prediction. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 2 (2): 157–198.

Grimley, D.A., Arruda, N.K., Bramstedt, M.W. Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible, and precise delineation of hydric soils in the midwestern USA. *Catena*, Amsterdam, v.58, p.183–213, 2004.

Grimley, D.A., Vepraskas, M.J. Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.64, p.2174-2180, 2000.

Grunwald, S.; Vasques, G.M.; Rivero, R.G. Fusion of soil and remote sensing data to model soil properties. *Advances in Agronomy*, v.131, p.1-109, 2015. DOI: 10.1016/bs.agron.2014.12.004.

Hengl, T. *A practical guide to geostatistical mapping*. 2 ed. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2009.

Hengl, T. et al. Comparison of kriging with external drift and regression-kriging: Technical note, ITC. Enschede, 2003.

Hengl, T. et al. Methods to interpolate soil categorical variables from profile observations: lessons from Iran. *Geoderma*, Amsterdam, v.140, p. 417-427, 2007.

Hengl, T.; Heuvelink, G. B. M; Rossiter, D. G. About regression-kriging: from equations to case studies. *Elsevier*, v. 33, p. 1301-1315. 2007.

Hengl, T.; Jesus, J. M.; Macmillan, R. A.; Batjes, N. H.; Heuvelink, G. B. M.; Ribeiro, E.; Samuel-Rosa, A.; Kempen, B.; Leenaars, J. G. B.; Walsh, M. G.; Gonzalez, M. R.

SoilGrids1km — Global Soil Information Based on Automated Mapping. Plos One, San Francisco, v. 9, n. 8, 2014.

Hengl, T., Heuvelink, G. B. M. e Stein, A., 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging, *Geoderma*, 120:75-93.

Huijbregts, C. J. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: Davis, J. C.; McCullagh, M. J. (Eds.). *Display and analysis of spatial data*. New York: J. Wiley, 1975. p.38-53.

Johnson, C.K., Doran, J.W., Duke, H.R., Wienhold, B.J., Eskridge, K.M., Shanahan, J.F. Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 65, p. 1829– 1837, 2001.

Kitanidis, P. K., 1994. Generalized covariance functions in estimation. *Mathematical Geology* 25: 525–540.

Knotters, M.; Brus, D.J.; Oude Voshaar, J.H. A comparison of kriging, co-kriging and kriging combined with regression for spatial interpolation of horizon depth with censored observations. *Geoderma*, v.67, p.227-246, 1995.

Kravchenko, A.N.; Robertson, G.P. Can topographical and yield data substantially improve total soil carbon mapping by regression kriging? *Agronomy Journal*, v.99, p.12-17, 2007. DOI:10.2134/agronj2005.0251.

Kumar, S. V.; Reichle, R. H.; Harrison, K. W.; Peters-Lidard, C. D.; Yatheendradas, S.; Santanello, J. A. A comparison of methods for a priori bias correction in soil moisture data assimilation. *Water Resources Research*, v.48, W03515, 2012.

Leal, F. T.; França, A. B. C.; Siqueira, D. S.; Teixeira, D. D. B.; Marques Jr., J.; La Scala Jr., N. Characterization of potential CO₂ emissions in agricultural areas using magnetic susceptibility. *Scientia Agricola*, Piracicaba, 2015.

Legros, J. P. Mapping of the soil. Science Pub Inc, 2006. 411 p.

Luque, E. C. L. Propiedades magnéticas de los óxidos de hierro en suelos mediterráneos. 2008. 179 f. Tese de doutorado - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes, Universidad de Córdoba, Córdoba, 2008.

Mallarino, A. P.; Mazhar, U. H.; Wittry, D.; Bermudez, M. Variation in Soybean Response to Early Season Foliar Fertilization among and within Fields, *Agronomy Journal*, Madison, v. 93, n. 6, p.1220-1226, 2001.

Marques Jr, J. Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo. 2009. 113 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

Marques Jr., J.; Siqueira, D. S.; Camargo, L. A.; Teixeira, D. D. B.; Barron, V.; Torrent, J. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. *Geoderma*, Amsterdam, v. 219-220, p. 63-71, 2014.

Matheron, G., 1969. Le krigeage universel. Vol. 1. Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, École des Mines de Paris, 79 Fontainebleau, p. NA.

McBratney, A. B.; Odeh, I. O. A.; Bishop, T. F. A.; Dunbar, M. S.; Shatar, T. M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, Amsterdam, v. 97, n. 3-4, p. 293-327, 2000.

McBratney, A.B., Minasny, B., Cattle, S.R., Vervoort, R.W., 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma* 109, 41–73.

McBratney, A. B.; Santos, M. L. M.; Minasny, B. On digital soil mapping. *Geoderma*, Amsterdam, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003.

Mello, C.R. Hidrologia: Princípios e Aplicações. Lavras: UFLA, 2013. 455 p.

Menezes, M. D. et al. Spatial prediction of soil properties in two contrasting physiographic regions in Brazil. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 73, n. 3, p. 274- 285, May/June 2016.

Milone, G.; Angelini, F. Estatística aplicada. São Paulo: Atlas, 1995. 286 p.

Minasny, B.; ALEX, B.; McBratney, A. B.; Hartemink, A. E. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. *Geoderma*, Amsterdam, v. 155, n. 3-4, p. 132–139, 2010.

Minasny, B., McBratney, A. B., 2007. Spatial prediction of soil properties using EBLUP with Matérn covariance function. *Geoderma* 140: 324–336.

Odeh, I O A, McBratney, A B e Chittleborough, D J, 1994. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model, *Geoderma*, 63:197-214.

Odeh, I. O. A. et al. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. *Geoderma*, Amsterdam, v. 67, n. 3/4, p. 215-226, 1995.

Oliveira, R. B.; Silva, S. A., Souza, G. S., Passos, R. R., Prezotti, L. C., & Lima, J. S. S. (2017). Análise espacial de variáveis indicadoras de fertilidade do solo sob cultivo de cafeeiro conilon. *Anais. X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba*, 2787-2790.

Omuto, C. T.; Vargas, R. R. Re-tooling of regression-kriging in R for improved digital mapping of soil properties. *Geosciences Journal*, v. 19, n. 1, p. 157-165, 2015.

Pebesma, E.J. The Role of External Variables and GIS Databases in Geostatistical Analysis. *Transactions in GIS*, v.10, p.615-632, 2006. DOI: 10.1111/j.1467-9671.2006.01015.x.

Peluco, R. G.; Marques Jr., J.; Siqueira, D. S.; Pereira, G. T.; Barbosa, R. S.; Teixeira, D. D. B. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 50, n. 3, p. 259-266, 2015.

Peluco, R. G.; Marques Jr., J.; Siqueira, D. S.; Pereira, G. T.; Barbosa, R. S.; Teixeira, D. D. B.; Adame, C. R.; Cortez, L. A. Suscetibilidade magnética do solo na estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 48, n. 6, p. 661-672, 2013.

Pereira, G. T.; Souza, Z. M.; Teixeira, D. D. B.; Montanari, R.; Marques JR., J. Optimization of the sampling scheme for maps of physical and chemical properties estimated by kriging. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1128-1135, 2013.

Resende, M. D. V.; Sturion, J. A. Análise Genética de Dados com Dependência Espacial e Temporal no Melhoramento de Plantas Perenes via Modelos Geoestatísticos e de Séries Temporais Empregando REML/BLUP ao Nível Individual. Colombo: Embrapa Florestas, 2001, 79 p.

Rivero, R G, Grunwald, S e Bruland, G L, 2007. Incorporation of spectral data into multivariate geostatistical models to map soil phosphorus variability in a Florida wetland, *Geoderma*, 140:428-443.

Royall, D. Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain. *Catena*, Amsterdam, v.46, p.15-34, 2001.

Sanchez, P. A.; Ahamed, S.; Carre, F.; Hartemink, A. E.; Hempel, J.; Huising, J.; Lagacherie, P.; McBratney, A. B.; McKenzie, N. J.; Mendonça-Santos, M. L.; Minasny, B.; Montanarella, L.; Okoth, P.; Palm, C. A.; Sachs, J. D.; Shepherd, K. D.; Vagen, T. G.; Vanlauwe, B.; Walsh, M. G.; Winowiecki, L. A.; Zhang, G. L. Digital soil map of the world. *Science*, v. 325, n. 5941, p. 680-681, 2009.

Sassi, C. P. et al. Modelos de regressão linear múltipla utilizando os softwares R e Statistica: uma aplicação a dados de conservação de frutas. São Carlos: ICMC-USP, n. 377, 2012. Disponível em: http://conteudo.icmc.usp.br/CMS/Arquivos/arquivos_enviados/BIBLIOTECA_113_RT_377.pdf. Acesso em: ago. de 2021.

Schabenberger, O., Gotway, C., 2004. Statistical methods for spatial data analysis. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL, p. 524.

Scolforo, H. F. Interpoladores espaciais na estimativa da distribuição do estoque de carbono da vegetação arbórea em Minas Gerais, Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

Silva, F.D., Couceiro, PR.C., Fabris, J.D., Goulart, A.T., Ker, J.C. Magnesioferrita e caminho pedogenético de transformação de óxidos de ferro magnéticos em dois perfis de solo derivados de tufito da Região do Alto Paranaíba (MG). Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.29, p.763-775, 2005.

Siqueira, D.S., Marques JR., J., Pereira, G.T. The use of landform to predict the variability of soil and orange attributes. Geoderma v. 155, 55-66, 2010.

Siqueira, D. S. Mapeamento de atributos e planejamento amostral para Latossolos utilizando suscetibilidade magnética, cor e relação solo-paisagem. 2013. 109 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.

Souza, Z. M. de; Marques JR., J.; Pereira, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, n. 6, p. 937-944, 2004.

Stein, M. L., 1999. Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging. Series in Statistics. 36 Springer, New York, 247 p.

Teixeira, D. D. B.; Bicalho, E. S.; Panosso, A. R.; Cerri, C. E. P.; Pereira, G. T.; La Scala, N. Spatial variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area characterized by secondary information. Scientia Agricola, Piracicaba, v. 70, n. 3, p. 195-203, 2013b.

Teixeira, D. D. B. Suscetibilidade magnética e análise de incertezas em mapeamento de solos. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2016.

Tobler, W. R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, v. 46, p. 234, jun. 1970.

Vasques, G.M.; Grunwald, S.; Comerford, N.B.; Sickman, J.O. Regional modelling of soil carbon at multiple depths within a subtropical watershed. *Geoderma*, v.156, p.326-336, 2010. DOI: 10.1016/j.geoderma.2010.03.002.

Vicente, J. Estudo comparativo de métodos geoestatísticos aplicados em agricultura de precisão. 163 f. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente prudente, 2004.

Wang, Y.; Hou, S. A new interpolation method for Antarctic surface temperature. *Progress in Natural Science: Materials International*. v. 19, n. 12, p. 1843 - 1849, 2009.

Webster, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Advances in Soil Science*. New York, 3:1-70, 1985.

White, J. G.; Zasoski, R. J. Mapping Soil Micronutrients. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 60, n. 1-2, p. 11-26, 1999.

Yan, L I, Zhou, S H I, Ci-fang, W U, Hong-yi, L I e Fend, L I, 2007. Improved prediction and reduction of sampling density for soil salinity by different geostatistical methods, *Agricultural Sciences in China*, 6(7):832-841.