

DEPENDÊNCIA ESPACIAL E KRIGAGEM PARA A ESTIMATIVA TEXTURAL DE SOLOS EM SÃO JOÃO EVANGELISTA, MINAS GERAIS, BRASIL¹

Bruno Oliveira Lafetá²
Pedro Bouçaz Paes
Sarah Dieckman Assunção Rodrigues
Graziele Wolff de Almeida Carvalho
Tamires Mousslech Andrade Penido
Diego dos Santos Vieira
Ivan da Costa Ilhéu Fontan

RESUMO

Investigações científicas sobre a distribuição espacial de atributos texturais de solo subsidiam o planejamento da coleta de amostras para análise granulométrica, importante para a definição de tratos culturais. O objetivo foi avaliar o desempenho de diferentes métodos de krigagem e modelos matemáticos de semivariograma teórico na estimativa textural em uma área de Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico. O estudo foi conduzido em uma área de 41,07ha no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, campus São João Evangelista. Estabeleceu-se uma grade amostral regular de 130 × 130m, totalizando 33 pontos amostrais georreferenciados. A análise de interpolação espacial adotou dois métodos de krigagem (simples e ordinária) e três modelos de semivariograma teórico (esférico, exponencial e gaussiano). A intensidade da dependência espacial das frações silte e argila tenderam a ser menores que aquela da fração areia. Para fins texturais, estimou-se o tamanho ideal de glebas circulares de 18,48ha para a obtenção de amostras compostas de solo. Conclui-se que a krigagem simples associada ao modelo de semivariograma gaussiano é eficiente para análises de interpolação espacial de frações de areia e argila. A combinação desse método de krigagem com o modelo de semivariograma esférico é preciso para a estimativa da fração silte.

Palavras-chave: Areia. Silte. Argila. Geoestatística. Método probabilístico.

SPACE DEPENDENCE AND KRIGING FOR SOILS TEXTURE ESTIMATE IN SÃO JOÃO EVANGELISTA, MINAS GERAIS, BRAZIL

ABSTRACT

Scientific investigations concerning the spatial distribution of soil textural attributes support planning of sample collection for granulometric analysis, important for definition of cultural tracts. This work aimed to evaluate the performance of different kriging methods and

¹ **Como citar este artigo:** LAFETÁ, B. O. *et al.* Dependência espacial e krigagem para a estimativa textural de solos em São João Evangelista, Minas Gerais, Brasil. **ForScience**, Formiga, v. 10, n. 1, e01081, jan./jun. 2022. DOI: [10.29069/forscience.2022v10n1.e1081](https://doi.org/10.29069/forscience.2022v10n1.e1081).

² **Autor para correspondência:** Bruno Oliveira Lafetá: bruno.lafeta@ifmg.edu.br.

mathematical models of theoretical semivariogram in textural estimation of adystrophic Red Yellow Latosol. The study area has 41.07ha at the Federal Institute of Education, Science and Technology of Minas Gerais, campus São João Evangelista. A regular sampling grid of 130 × 130m was established, totaling 33 georeferenced sample points. Spatial interpolation analysis adopted two kriging methods (simple and ordinary) and three theoretical semivariogram models (spherical, exponential and Gaussian). Spatial dependence intensity of the silt and clay fractions tended to be less than that of the sand fraction. For textural purposes, the ideal size of 18.48 ha circular plots was estimated for obtaining samples of soil. It is concluded that the simple kriging associated with gaussian semivariogram model is efficient for spatial interpolation analyzes of sand and clay fractions. The combination of this kriging method with spherical semivariogram model is required for estimating the silt fraction.

Keywords: Sand. Silt. Clay. Geostatistics. Probabilistic method.

1 INTRODUÇÃO

A demanda por investigações científicas sobre a análise da distribuição espacial de atributos químicos e físicos do solo é crescente no Brasil (SILVA *et al.*, 2017; MEDAUAR *et al.*, 2018). Avanços tecnológicos e computacionais têm estimulado a busca por precisão e melhorias no cultivo agrícola. A agricultura de precisão já é realidade em diversos sistemas de cultivo, como soja, café, citrus, eucalipto, pinus e outras culturas de interesse comercial (MAIMAITIJIANG *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2017; FERRAZ *et al.*, 2018; MEDAUAR *et al.*, 2018; GALLART *et al.*, 2019; SALEKIN *et al.*, 2019; GONZÁLEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2020).

A agricultura de precisão pode ser definida como sistema de gerenciamento fundamentado em variabilidades espacial e/ou temporal da área de cultivo, subsidiando a tomada de decisões para adequada alocação de recursos, com baixo impacto ao meio ambiente (TAKOUTSING *et al.*, 2017; WACHOWIAK *et al.*, 2017; MAES; STEPPE, 2019). Entretanto, o conhecimento sobre a espacialização de atributos físicos texturais do solo, ainda, não está completamente esclarecido.

A heterogeneidade espacial de atributos do solo pode ocorrer em amplas ou reduzidas escalas geográficas, dependendo de condições climáticas, grau de intemperismo, fisiografia e tipo de solo (WACHOWIAK *et al.*, 2017; BEVINGTON *et al.*, 2019; LI; WAN; SHANG, 2020). Pesquisas que contemplam a distribuição espacial desses atributos são essenciais para melhor compreensão do seu efeito no crescimento vegetal. A análise granulométrica do solo permite interpretações texturais, relacionadas ao tamanho de partículas, identificando a fração fina constituída por areia (diâmetros entre 0,02 mm e 2 mm), silte (diâmetros entre 0,002 e 0,02 mm) e argila (diâmetros menores que 0,002 mm). Informações das frações de argila, silte

e areia auxiliam a classificação de solos e a realização de inferências sobre a Capacidade de Trocadora de Cátions (CTC), drenagem, curva de retenção de água, fertilidade, resistência ao cisalhamento, porosidade, teor de Matéria Orgânica (MO) e outras métricas do solo (CENTENO *et al.*, 2017; ABU-HAMDEH *et al.*, 2019; BEVINGTON *et al.*, 2019; SHAHRIARI *et al.*, 2019; UYANIK *et al.*, 2019; JOZEFACIUK *et al.*, 2020; KHANBABAKHANI; TORKASHVAND; MAHMOODI, 2020; LI; WAN; SHANG, 2020; WANG *et al.*, 2020). Solos mais argilosos tendem a exibir maiores valores de CTC, capacidade de retenção de umidade, microporosidade e MO.

A amostragem de solo, por sua vez, deve ser planejada com cautela e considerar aspectos estatísticos relacionados à dependência espacial (SILVA *et al.*, 2017; TAKOUTSING *et al.*, 2017; FERRAZ *et al.*, 2018; SULIEMAN; ALGARNI, 2019; WANG *et al.*, 2020). O modo mais simples para a obtenção de muitas amostras compostas de solo se baseia em métodos aleatórios para a seleção de pontos amostrais. A amostragem casual simples é um procedimento probabilístico em que cada ponto amostral possui a mesma chance de ser selecionado, sendo precursora de todos outros procedimentos de amostragem aleatória.

A distância mínima entre pontos para a obtenção de amostras compostas de solo é, geralmente, negligenciada por diversos técnicos e proprietários rurais. Tradicionalmente, a amostragem do solo é realizada adotando a divisão de glebas homogêneas de tamanho máximo preconizado por literatura, como 10 ou 20 ha (CANTARUTTI; ALVAREZ; RIBEIRO, 1999; IAC, 2020). Entretanto, a amostragem aleatória baseada na estatística “clássica” não é apropriada diante da ocorrência de dependência espacial (GUARÇONI; ALVAREZ, SOBREIRA, 2017). Nestas circunstâncias, recomendam-se técnicas geoestatísticas de interpolação para a estimativa de atributos do solo (SHAHRIARI *et al.*, 2019; SULIEMAN; ALGARNI, 2019; LI; WAN; SHANG, 2020).

O mapeamento textural é útil para a classificação indireta da capacidade produtiva de sítios e pode ser realizado por interpolação espacial (WANG *et al.*, 2020). A krigagem é o processo de interpolação mais difundido no país, especialmente, os métodos de krigagem simples e ordinária. Tal análise de interpolação propicia a obtenção de estimativas texturais de solo precisas para locais não amostrados (LI; WAN; SHANG, 2020). Enquanto na krigagem simples se pressupõe que a média é constante para toda a área de cultivo, a ordinária envolve somente um semivariograma, cuja média é desconhecida e, portanto, estimada (SANTOS *et al.*, 2011).

O levantamento de dados texturais e sua espacialização por meio de tratamento geoestatístico são úteis para a identificação de setores na área de cultivo que requerem cuidados específicos de manejo e conservação de solo (SHAHRIARI *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2020). A maioria das pesquisas sobre a interpolação de dados físicos do solo é incipiente ou recente (SHAHRIARI *et al.*, 2019; KHANBABAKHANI; TORKASHVAND; MAHMOODI, 2020; LI; WAN; SHANG, 2020). Estas pesquisas permitem a definição de um raio mínimo para a coleta de amostras compostas para se evitar problemas de enviesamento estatístico proveniente de dependência espacial.

Mediante exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o desempenho de diferentes métodos de krigagem e modelos matemáticos de semivariograma teórico na estimativa textural em uma área de Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no município de São João Evangelista/MG, em área do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais. O clima da região é o temperado chuvoso-mesotérmico com verão chuvoso e inverno seco, classificado como Cwa pelo sistema internacional de Köppen. As médias anuais de temperatura e precipitação são de 20,2° C e 1.377 mm, respectivamente (INMET, 2020).

A área de estudo possui 41,07 ha e se encontra em uso para diversas atividades pecuárias e cultivos agrícolas (Figura 1). O tipo de solo predominante é o Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico com o horizonte A proeminente, com relevo plano a suave ondulado e altitude de 690 m.

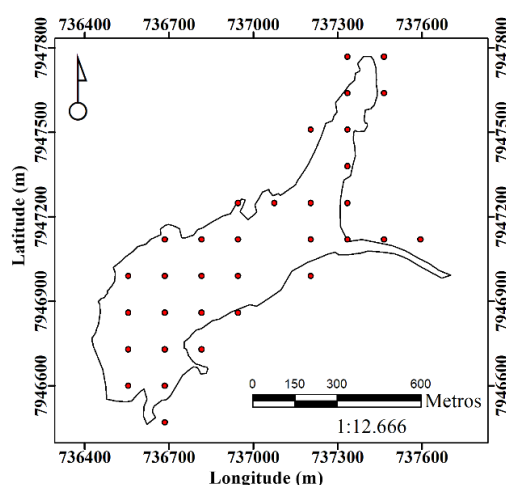


Figura 1 - Área de Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico situada no município de São João Evangelista/MG, Brasil (mapa elaborado no sistema de coordenadas UTM, Datum Sirgas 2000 Zona 23 S)
Fonte: Autores (2021).

Estabeleceu-se uma grade amostral regular de 130×130 m, totalizando 33 pontos amostrais georreferenciados. Cada ponto amostral foi constituído por uma amostra composta de solo, formada pela mistura homogênea de cinco simples. A distribuição das amostras simples seguiu o padrão de uma cruz de Malta, com coleta de solo no centro e, seguindo orientação de pontos cardeais, em raios de 1 m. A coleta de solo foi realizada na profundidade de 0 a 20 cm, contemplando o topo do horizonte A proeminente.

As amostras compostas de solo foram acondicionadas em embalagens plásticas devidamente identificadas e encaminhadas para a análise textural. A composição granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, utilizando solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa rotação por 16 h (EMBRAPA, 1997).

De modo exploratório, os dados foram submetidos à estatística descritiva (média, mínimo, máximo, desvio padrão e, pelo método dos momentos, assimetria e curtose), sob a hipótese nula de que uma amostra retirada da população tenha distribuição normal, teste de normalidade por Shapiro Wilk e análises gráficas de tendência a partir da dispersão entre os valores texturais e o plano cartesiano. Informações detalhadas sobre cada uma das estatísticas descritivas se encontram disponíveis em Ferreira (2005). Ajustaram-se modelos lineares polinomiais de primeiro e segundo grau pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) para a análise de tendências dos dados texturais em função de eixos cartesianos. A identificação de tendências se fundamentou na significância de parâmetros da modelagem.

A análise de interpolação espacial adotou dois métodos de krigagem (simples e ordinária) e três modelos matemáticos de semivariograma teórico (esférico, exponencial e gaussiano), 12 lags de 130 m cada. Os modelos de semivariograma são representações matemáticas que visam à descrição quantitativa da variação de um fenômeno no espaço (Figura 2). Os dois métodos de krigagem e os três modelos matemáticos de semivariograma teórico totalizaram seis combinações.

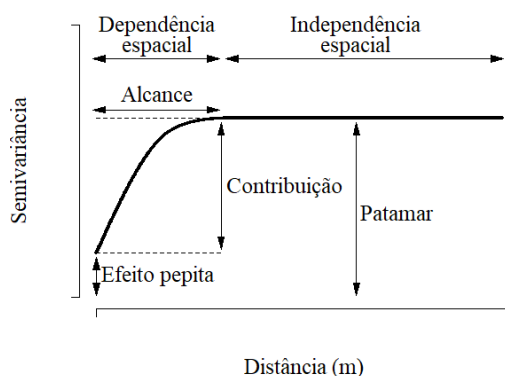


Figura 2 - Representação gráfica de um semivariograma teórico e seus parâmetros

Fonte: Autores (2021).

Para cada modelo de semivariograma teórico, os seguintes parâmetros foram calculados e representados graficamente: efeito pepita, contribuição, patamar e alcance. O efeito pepita é o valor de semivariância encontrada quando a distância é zero e representa o componente da variação ao acaso; patamar é o valor da semivariância em que a curva estabiliza e se torna constante; contribuição é a diferença entre o patamar e o efeito pepita; e o alcance é a distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, expressando até que ponto se percebe o efeito da dependência espacial (LUNDGREN; SILVA; FERREIRA, 2016). O Índice de Dependência Espacial (IDE) foi calculado pela expressão razão entre a contribuição e o patamar. O IDE foi classificado segundo critério usado por Lundgren, Silva e Ferreira (2016), que considera a dependência espacial fraca quando IDE é menor que 0,25; moderada quando está entre 0,25 e 0,75 e forte, quando IDE é maior que 0,75.

A existência de anisotropia foi investigada a partir da construção de semivariogramas nas direções 0, 45, 90 e 135° e análise do comportamento espacial. A anisotropia é evidenciada quando os semivariogramas apresentam patamar, alcance e efeito pepita distintos para alguma das direções (LUNDGREN; SILVA; FERREIRA, 2016). A correção da anisotropia foi realizada para a interpolação de todos os dados texturais.

A técnica de validação cruzada *leave-one-out*, também conhecida como Jackknife, foi utilizada para definir a melhor combinação entre método de krigagem e modelo de semivariograma teórico. A qualidade preditiva contemplou as estatísticas de Média dos Desvios Absolutos (MDA), Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM) e teste *t* pareado. Menores valores de MDA e RQEM implicam em maior qualidade preditiva. Para as ocasiões de interpretação contraditória (maior MDA e menor RQEM ou vice-versa), definiu-se como referência de comparação aquela estatística de maior diferença percentual. Selecionou-se uma combinação para cada método de Krigagem e fração de textura para a elaboração dos mapas de interpolação.

As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio do *software* R versão 3.5.2 (R CORE TEAM, 2018) e ESRI ArcMap 10.3.1, ao nível de significância de 1 % de probabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conhecimento da variabilidade espacial de fatores que influenciam a produtividade é premissa para a aplicação da agricultura de precisão (FERRAZ *et al.*, 2018; MAES; STEPPE,

2019). Geralmente, a textura do solo exibe heterogeneidade espacial em diferentes escalas espaciais e não se modifica significativamente ao longo do tempo (LI; WAN; SHANG, 2020).

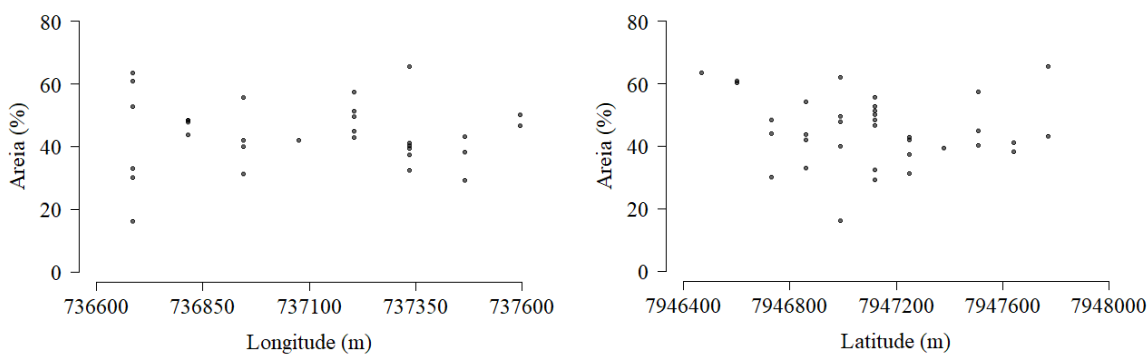
Os dados desse experimento, submetidos à análise estatística descritiva (Tabela 1), indicaram que a fração silte apresentou a maior variabilidade (coeficiente de variação de 61,17 %), com forte assimetria positiva e maiores valores de curtose – distribuição leptocúrtica. A normalidade pelo teste de Shapiro Wilk ($p > 0,01$) foi constatada em todos os dados texturais, exceto para a fração silte. Logo, com vistas à normalidade, aplicou-se a transformação logarítmica para os dados da fração silte.

Tabela 1 - Estatística descritiva de aspectos texturais em área de Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, no município de São João Evangelista/MG, Brasil

Atributos	Textura		
	Areia	Silte	Argila
Média (%)	45,33	11,90	42,77
Mínimo (%)	16,11	4,86	21,65
Máximo (%)	65,64	35,84	61,70
Desvio padrão (%)	10,9697	7,2810	9,8099
Assimetria	-0,2390	1,5600	-0,3157
Curtose	0,2498	2,2501	-0,5748
Shapiro-Wilk (p)	0,7621	< 0,0001	0,6224

Fonte: Autores (2021).

Os parâmetros dos modelos polinomiais ajustados para a estimativa textural não foram significativos ($p > 0,01$), ou seja, não foram obtidas equações polinomiais, evidenciando a ausência de tendências de primeiro e segundo graus. Além disso, não foram observadas tendências lineares ou não lineares nos dados texturais em relação ao plano cartesiano, pois se distribuíram homoganeamente ao longo dos eixos das coordenadas (Figura 3). Não se verificaram tendências no comportamento dos dados ao longo dos eixos cartesianos (perpendiculares entre si), ou seja, não existiu nenhum tipo de enviesamento ou tendenciosidade direcionada.



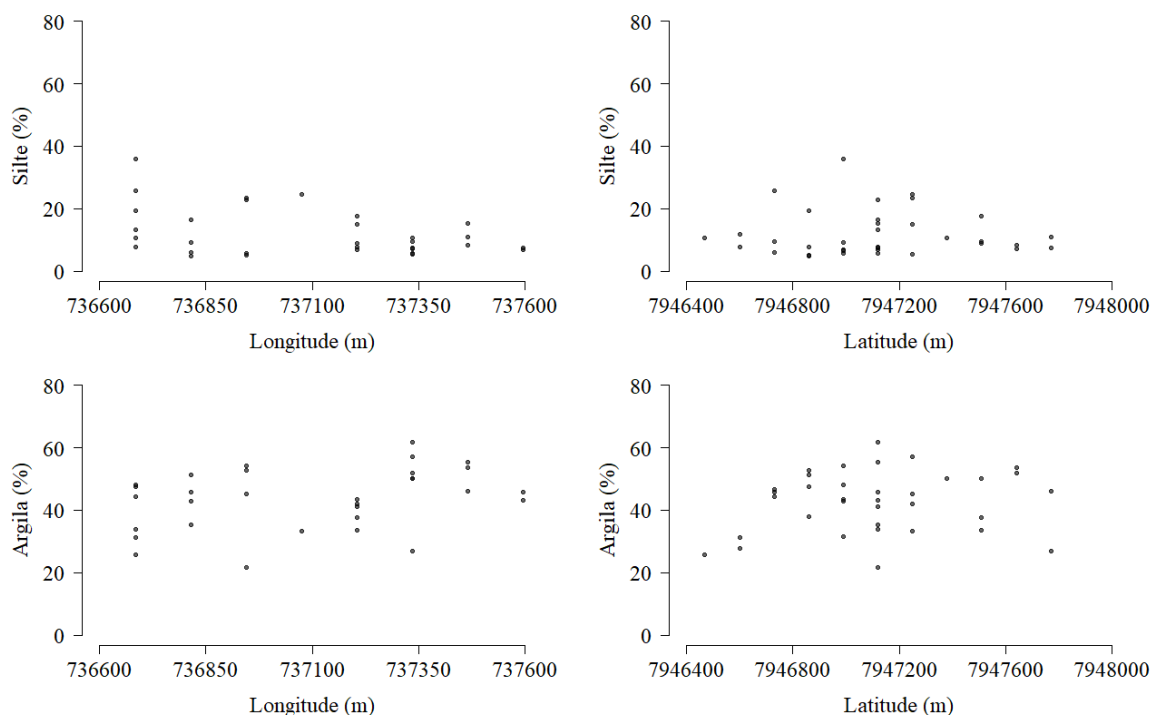


Figura 3 - Dispersão de aspectos texturais em área de Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, no município de São João Evangelista-MG, Brasil (sistema de coordenadas UTM, Datum Sirgas 2000 Zona 23 S)
Fonte: Autores (2021).

Os valores dos parâmetros dos semivariograma estão apresentados na Tabela 2. A dependência espacial das frações texturais de argila, areia e silte foi classificada como forte, moderada e fraca para a maioria dos modelos ajustados de semivariograma teórico, respectivamente. Somente o modelo exponencial de semivariograma construído para a fração argila exibiu o efeito pepita puro. Para a fração areia, o alcance, que representa a distância na qual há dependência espacial entre amostras, foi de 1560 m em todos os modelos matemáticos de semivariograma teórico. O alcance relacionado às frações silte e argila variaram de 396,34 (gaussiano) a 736,90 m (exponencial) e de 485,02 (gaussiano) a 742,23 (exponencial), respectivamente. As estatísticas geradas com o modelo gaussiano exibiram maior efeito pepita. O modelo gaussiano apresentou os menores valores do grau de dependência espacial, ou variação estruturada, em todas as frações texturais (Figura 4).

Tabela 2 - Estimativa dos parâmetros dos modelos ajustados de semivariograma teórico para aspectos texturais em área de Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, no município de São João Evangelista/MG, Brasil

Modelo	Efeito pepita	Contribuição	Patamar	Alcance (m)	IDE
----- Areia -----					
Esférico	97,44	40,44	137,88	1560,00	0,2933
Exponencial	93,44	40,72	134,16	1560,00	0,3035
Gaussiano	102,39	41,51	143,90	1560,00	0,2885
----- Silte -----					
Esférico	0,19	0,10	0,29	432,16	0,3517
Exponencial	0,24	0,04	0,29	736,90	0,1547
Gaussiano	0,26	0,03	0,29	396,34	0,1054
----- Argila -----					
Esférico	25,99	79,47	105,46	544,34	0,7536
Exponencial	0,00	109,41	109,41	742,23	1,0000
Gaussiano	42,75	62,85	105,60	485,02	0,5951

Fonte: Autores (2021).

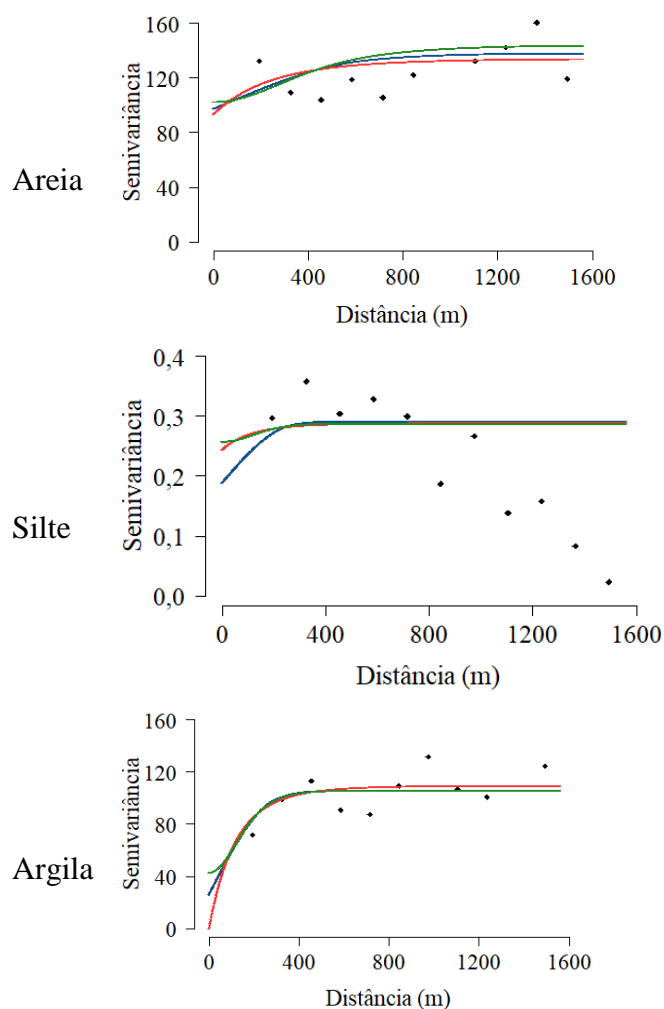


Figura 4 - Semivariogramas omnidirecional ajustados a partir dos modelos Esférico, Exponencial e Gaussiano para aspectos texturais em área de Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, no município de São João Evangelista-MG, Brasil. Azul = Esférico; vermelho = Exponencial e; Verde = Gaussiano
Fonte: Autores (2021).

No que se refere à validação cruzada, os coeficientes de variação da MDA e RQEM foram de 0,56 e 1,02 % para a fração areia, de 4,70 a 3,41 % para a fração silte e de 2,97 e 1,41 % para a fração argila, respectivamente (Tabela 3). Tal resultado foi um indicativo de pouca oscilação do desempenho preditivo entre os métodos de krigagem e modelos de semivariograma teórico. Ressalta-se, ainda, que as estimativas médias para cada fração textural não se diferenciaram estatisticamente dos resultados analíticos pelo teste t ($p > 0,01$).

Tabela 3 -Estatísticas de qualidade do desempenho preditivo das combinações entre métodos de krigagem e modelos ajustados de semivariograma teórico para aspectos texturais em área de Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, no município de São João Evangelista/MG, Brasil

Krigagem	Modelo	MDA	RQEM	Teste t (p)
----- Areia -----				
Ordinária	Esférico	9,0281	11,5170	0,7378
Ordinária	Exponencial	9,0327	11,6241	0,7885
Ordinária	Gaussiano	9,0038	11,4552	0,7297
Simple	Esférico	8,9372	11,3430	0,7598
Simple	Exponencial	8,9962	11,4048	0,7654
Simple	Gaussiano	8,9082	11,3071	0,7503
----- Silte -----				
Ordinária	Esférico	4,9578	6,6168	0,9173
Ordinária	Exponencial	5,5597	7,1701	0,9555
Ordinária	Gaussiano	5,1835	6,8738	0,9782
Simple	Esférico	4,9489	6,5816	0,9715
Simple	Exponencial	5,3697	7,0107	0,9916
Simple	Gaussiano	5,3667	7,0034	0,9926
----- Argila -----				
Ordinária	Esférico	6,9416	8,5447	0,6376
Ordinária	Exponencial	7,3801	8,7881	0,6368
Ordinária	Gaussiano	6,9449	8,5383	0,6123
Simple	Esférico	6,9623	8,5915	0,6812
Simple	Exponencial	7,3201	8,7916	0,6917
Simple	Gaussiano	6,9331	8,5499	0,6710

Fonte: Autores (2021).

Contudo, as estimativas mais precisas das frações areia e argila foram obtidas com a adoção do modelo gaussiano, tanto para a krigagem ordinária quanto para a simples. O modelo esférico se destacou como o mais adequado para a estimativa da fração silte em ambos os métodos de krigagem. Logo, selecionou-se um modelo semivariograma para cada método de krigagem e fração textural para a elaboração de mapas de interpolação subsequentes (Figura 5).

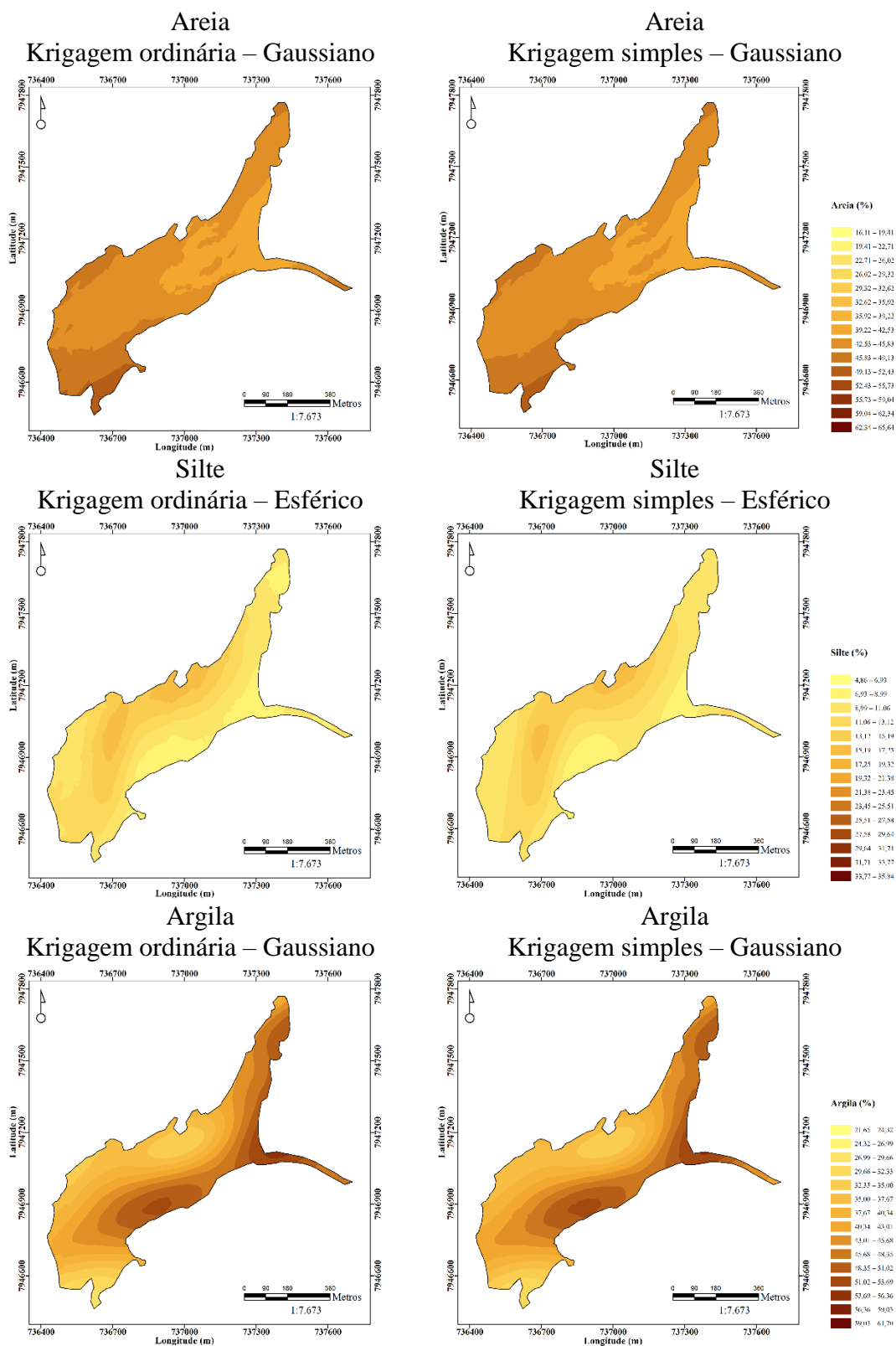


Figura 5 - Interpolações relacionadas a diferentes métodos de krigagem e modelos ajustados de semivariograma teórico para aspectos texturais em área de Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, no município de São João Evangelista/MG, Brasil (mapas elaborados no sistema de coordenadas UTM, Datum Sirgas 2000 Zona 23 S) Fonte: Autores (2021).

Em termos gerais, para um mesmo modelo de semivariograma, o método de krigagem simples tendeu a fornecer estimativas mais precisas do que aquele da krigagem ordinária. A

maior precisão das estimativas da fração areia, silte e argila foi observada para a interpolação do método de krigagem simples adotando os modelos gaussiano, esférico e gaussiano, respectivamente. Tal precisão foi coerente com a média da soma das três frações texturais estimadas foi de $100,04 \pm 3,83$ %. Enfatiza-se que embora a interpolação de cada fração textural ter sido realizada independente uma da outra, o valor da soma das frações foi condizente do ponto de vista analítico, próximo a 100 %.

Visualmente, os mapas apresentaram padrões que diferenciaram relativamente pouco entre si, e permitiram a identificação de regiões com diferentes frações texturais. Tem-se a expectativa de que o solo nas porções central e direita mapeada apresente maior retenção hídrica e baixa condutividade hidráulica devido à maior fração argila, enquanto que aquela à esquerda possua maior capacidade de drenagem hídrica em virtude da característica arenosa (JOZEFACIUK *et al.*, 2020; KHANBABAKHANI; TORKASHVAND; MAHMOODI, 2020; LI; WAN; SHANG, 2020; WANG *et al.*, 2020).

Assumindo que a fração argila é a mais explorada em estudos relacionados à fertilidade do solo, especialmente devido suas características inerentes à adsorção de fósforo, indica-se que a amostragem aleatória de solos para fins texturais, em se tratando desse solo em estudo, deveria ser realizada considerando a distância de pelo menos 485 m (alcance) entre pontos para a coleta de amostras compostas. Esta afirmação se pautou na premissa de que a amostragem aleatória não é apropriada diante da dependência espacial de atributos do solo (GUARÇONI; ALVAREZ; SOBREIRA, 2017; SHAHRIARI *et al.*, 2019; LI; WAN; SHANG, 2020). Tal valor de distância equivale a uma gleba circular de, aproximadamente, 18,48 ha (uma amostra composta de solo a cada 18,48 ha – proporção 1:18). Este resultado possui grande relevância prática, pois favorece o planejamento da caracterização física de solos para implantações agrícolas e florestais. Além disso, está coerente com o preconizado em literaturas clássicas generalistas para a distribuição de pontos de coleta de solo para fins químicos analíticos, como a divisão em glebas nunca maiores que 10 (CANTARUTTI; ALVAREZ; RIBEIRO, 1999) ou 20 ha (IAC, 2020).

Considerou-se que a avaliação da fertilidade do solo deve contemplar os seus atributos físicos e químicos para melhor definição de práticas de preparo do mesmo, balanço e racionalização da aplicação de corretivos e fertilizantes. O método de krigagem simples se mostrou eficiente para a interpolação de dados espacializados de textura na área em estudo, com Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico. Os resultados obtidos estão alinhados com a necessidade de desenvolvimento de futuras pesquisas sobre a análise espacial de atributos físicos e químicos em distintos tipos de solo. Salienta-se que a escolha do procedimento de

amostragem deve ser feita com atenção, levando em conta aspectos relacionados aos custos envolvidos com o geoprocessamento, deslocamento, amostragem e determinação analítica (LAFETÁ *et al.*, 2019).

4 CONCLUSÃO

A krigagem é uma abordagem geoestatística promissora para um eficiente planejamento amostral com vistas a análise textural de solos, subsidiando a agricultura de precisão.

O método de krigagem simples associado ao modelo de semivariograma gaussiano mostrou-se eficiente para análises de interpolação espacial de frações de areia e argila em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico. A combinação desse método de krigagem com o modelo de semivariograma esférico mostrou-se preciso para a estimativa da fração silte.

O alcance da dependência espacial das frações silte e argila tende a ser menor que aquela da fração areia. Por outro lado, a intensidade da dependência espacial foi mais proeminente na fração argila. Para fins texturais da fração argila, estimou-se o tamanho ideal de glebas circulares de 18,48ha para a obtenção de amostras compostas de solo.

REFERÊNCIAS

- ABU-HAMDEH, N. H. *et al.* Effect of tillage systems and polyacrylamide on soil physical properties and wheat grain yield in arid regions differing in fine soil particles. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Londres, v. 65, n. 2, p. 182-196, 2019. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03650340.2018.1492114>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- BEVINGTON, J. *et al.* Factorial kriging analysis leverages soil physical properties and exhaustive data to predict distinguished zones of hydraulic properties. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdã, v. 156, p. 426-438, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169917305173>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- CANTARUTTI, R. B.; ALVAREZ V. V. H.; RIBEIRO, A. C. Amostragem do solo. *In*: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. (eds). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (5ª Aproximação)**. Viçosa: UFV, 1999. p. 13-20.
- CENTENO, L. N. *et al.* Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, Pelotas, v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/RBES/article/view/11576>. Acesso em: 10 jul. 2021.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212p.

FERRAZ, G. A. S. *et al.* Plant sampling grid determination in precision agriculture in coffee field. **Coffee Science**, Lavras, v. 13, n. 1, p. 112-121, 2018. Disponível em: <http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1391>. Acesso em: 10 jul. 2021.

FERREIRA, D. F. **Estatística básica**. Lavras: UFLA, 2005. 664p.

GALLART, M. *et al.* Field-scale variability in site conditions explain phenotypic plasticity in response to nitrogen source in *Pinus radiata* D. Don. **Plant and Soil**, Berna, v. 443, p. 353-368, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-019-04237-0>. Acesso em: 10 jul. 2021.

GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, M. G. *et al.* Citrus yield: a dashboard for mapping yield and fruit quality of citrus in precision agriculture. **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 128, p. 1-13, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/1/128>. Acesso em: 10 jul. 2021.

GUARÇONI, A.; ALVAREZ, V. H.; SOBREIRA, F. M. Fundamentação teórica dos sistemas de amostragem de solo de acordo com a variabilidade de características químicas. **Terra Latinoamericana**, Chapingo, v. 35, n. 4, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v35n4/2395-8030-tl-35-04-00343.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2021.

IAC – INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Análise do solo, plantas, substratos resíduos e fertilizantes**. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/>. Acesso em: 15 mar. 2020.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa**. Brasília. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/>. Acesso em: 15 mar. 2020.

JOZEFACIUK, G. *et al.* New method for quantifying water stability of soil aggregates from air bubbling after immersion. **Measurement**, Amsterdã, v. 155, p. 1-11, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224120301068>. Acesso em: 10 jul. 2021.

KHANBABAKHANI, E.; TORKASHVAND, A. M.; MAHMOODI, M. A. The possibility of preparing soil texture class map by artificial neural networks, inverse distance weighting, and geostatistical methods in Gavoshan dam basin, Kurdistan Province, Iran. **Arabian Journal of Geosciences**, Amsterdã, v. 13, n. 237, p. 1-14, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-020-5134-1>. Acesso em: 10 jul. 2021.

LAFETÁ, B. O. *et al.* Sampling of chemical attributes in forest soils. **Floresta**, Curitiba, v. 49, n. 2, p. 305-316, 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/57705>. Acesso em: 10 jul. 2021.

LI, J.; WAN, H.; SHANG, S. Comparison of interpolation methods for mapping layered soil particle-size fractions and texture in an arid oasis. **Catena**, Amsterdã, v. 190, p. 1-15, 2020.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816220300631>. Acesso em: 10 jul. 2021.

LUNDGREN, W. J. C.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C. Influência do tipo de amostragem na estimativa de volume de madeira de eucalipto por krigagem. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, n. 4, p. 511-523, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/RbPDJpKHwYvNmbsCMSr3Hqc/?lang=pt>. Acesso em: 10 jul. 2021.

MAES, W. H.; STEPPE, K. Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. **Trends in Plant Science**, Amsterdã, v. 24, n. 2, p. 152–164, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1360138518302693>. Acesso em: 10 jul. 2021.

MAIMAITIJIANG, M. *et al.* Unmanned aerial system (UAS) – based phenotyping of soybean using multi-sensor data fusion and extreme learning machine. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdã, v. 134, p. 43-58, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924271617303246>. Acesso em: 10 jul. 2021.

MEDAUAR, C. C. *et al.* Monitoring of eucalyptus sprouts control using digital images obtained by unmanned aerial vehicle. **Journal of Sustainable Forestry**, Londres, v. 37, n. 7, p. 739-752, 2018. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10549811.2018.1478309>. Acesso em: 10 jul. 2021.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2018. Disponível em: <https://cran.r-project.org/bin/windows>. Acesso em: 10 jul. 2021.

SALEKIN, S. *et al.* Modelling the effect of microsite influences on the growth and survival of juvenile *Eucalyptus globoidea* (Blakely) and *Eucalyptus bosistoana* (F. Muell) in New Zealand. **Forests**, Basel, v. 10, n. 857, p. 1-21, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/10/857>. Acesso em: 10 jul. 2021.

SANTOS, G. R. *et al.* Krigagem simples versus krigagem universal: qual o preditor mais preciso? **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 26, n. 2, p. 49-55, 2011. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/209/123>. Acesso em: 10 jul. 2021.

SHAHRIARI, M. *et al.* Predicting regional spatial distribution of soil texture in floodplains using remote sensing data: a case of southeastern Iran. **Catena**, Amsterdã, v. 182, p. 1-12, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816219302917>. Acesso em: 10 jul. 2021.

SILVA, V. E. *et al.* Liming influence on the spatial variability of the leaf chemical composition and in the initial growth of the *Eucalyptus*. **Journal of Geospatial Modelling**, São Luís, v. 2, n. 1, p. 1-11, 2017. Disponível em: <http://periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/geospatial/article/view/5885>. Acesso em: 10 jul. 2021.

SULIEMAN, M. M.; ALGARNI, A. M. Soil organic carbon mapping and prediction based on depth intervals using kriging technique: a case of study in alluvial soil from Sudan. **Eurasian Journal of Soil Science**, Samsun, v. 8, n. 1, p. 44-53, 2019. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/88fca6712825e86eb427d4da570d9cd3/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2040500>. Acesso em: 10 jul. 2021.

TAKOUTSING, B. *et al.* Landscape approach to assess key soil functional properties in the highlands of Cameroon: repercussions of spatial relationships for land management interventions. **Journal of Geochemical Exploration**, Amsterdã, v. 178, p. 35-44, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375674217302157>. Acesso em: 10 jul. 2021.

UYANIK, O. Estimation of the porosity of clay soils using seismic P- and S-wave velocities. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdã, v. 170, p. 1-8, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926985119304550>. Acesso em: 10 jul. 2021.

WACHOWIAK, M. P. *et al.* Visual analytics and remote sensing imagery to support community-based research for precision agriculture in emerging areas. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdã, v. 143, p. 149-164, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169916309401>. Acesso em: 10 jul. 2021.

WANG, Z. *et al.* Comparison of additive and isometric log-ratio transformations combined with machine learning and regression kriging models for mapping soil particle size fractions. **Geoderma**, Amsterdã, v. 365, p. 1-16, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706118313582>. Acesso em: 10 jul. 2021.

DADOS DOS AUTORES:

Bruno Oliveira Lafetá

E-mail: bruno.lafeta@ifmg.edu.br

Curriculum Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7137536896294497>

Doutorado, mestrado e graduação em Engenharia Florestal pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). Atualmente é professor no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) - *Campus* São João Evangelista. Tem experiência na área de Recursos Florestais e Engenharia Florestal, com ênfase em Silvicultura, Mensuração, Amostragem, Modelagem e Manejo Florestal. Também, atua com redes neurais artificiais, support vector machine (SVM) e Random Forest.

Pedro Bouçaz Paes

E-mail: pedro.boucaz@gmail.com

Curriculum Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5013302660304665>

Graduado em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa. Discente do curso Técnico em Agrimensura no Instituto Federal de Minas Gerais.

Sarah Dieckman Assunção Rodrigues

E-mail: sarinhadieckman2012@gmail.com

Curriculum Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0047277127085758>

Graduanda em Engenharia Florestal pelo Instituto Federal Minas Gerais, campus São João Evangelista.

Graziele Wolff de Almeida Carvalho

E-mail: graziele.wolff@ifmg.edu.br

Curriculum Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3142266654701014>

Possui graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (2006), mestrado em Ecologia Aplicada (UFLA) e doutorado em Ecologia Aplicada pela mesma instituição. Atualmente é professora no IFMG. Atua na área de Ecologia Aplicada com a utilização de bioindicadores e estudos de sistemas agroflorestais.

Tamires Mousslech Andrade Penido

E-mail: penidotma@gmail.com

Curriculum Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9574491245202619>

Possui graduação em Engenharia Florestal (2015), mestrado em Ciência Florestal (2017) e doutorado em Ciência Florestal (2021), todos pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Foi docente voluntária das disciplinas de Proteção Florestal (área de Incêndios Florestais), Geoprocessamento e Geotecnologias Aplicadas à Engenharia Florestal e docente substituta das disciplinas de Inventário Florestal e Manejo Florestal na UFVJM. Tem experiência na área de Recursos Florestais e Engenharia Florestal, com ênfase em Silvicultura, Modelagem e Manejo Florestal.

Diego dos Santos Vieira

E-mail: diegovieir4@gmail.com

Curriculum Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6024757874943323>

Doutor em Ciência Florestal pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). Mestre em Ciência Florestal pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (2015). Graduação em Engenharia Florestal pela Universidade Federal Rural da Amazônia (2014). Foi bolsista do Banco Santander onde realizou intercâmbio em Engenharia Florestal na Universidade de Talca (Chile). Tem experiência nas áreas de Estatística e Manejo Florestal, com ênfase em Mensuração Florestal, Estrutura e Valoração de Florestas, Dendrometria e Inventário Florestal.

Ivan da Costa Ilhéu Fontan

E-mail: ivan.fontan@ifmg.edu.br

Curriculum Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2851092835077975>

Possui graduação em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Viçosa (2005), Mestrado em Ciência Florestal pela Universidade Federal de Viçosa (2007), Especialização em Proteção de Plantas pela Universidade Federal de Viçosa (2013) e Licenciatura em Biologia (2016) pelo Claretiano - Centro Universitário. Atuou como Analista Ambiental do Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais - IEF/MG (2006-2007), Analista Florestal (2007-2009) e Especialista de Pesquisa e Desenvolvimento (2009-2014) na PLANTAR S/A. Foi Professor no Instituto de Ensino Superior da Região Serrana - FARESE/ES (2014-2015), Professor Substituto e Pesquisador no Instituto Federal do Espírito Santo - IFES, Campus Ibatiba (2015-2017). Atualmente é Professor Efetivo e Pesquisador no Instituto Federal de Minas Gerais - IFMG, Campus São João Evangelista (2017-atual). Tem experiência nas áreas de Recursos Florestais, Engenharia Florestal, Silvicultura, Viveiros Florestais, Meio Ambiente, Manejo Fitossanitário e Sistemas Agroflorestais.