

**INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS
CAMPUS SÃO JOÃO EVANGELISTA
SARAH DIECKMAN ASSUNÇÃO RODRIGUES**

**DEPENDÊNCIA ESPACIAL E KRIGAGEM PARA A ESTIMATIVA
TEXTURAL DE SOLOS**

SÃO JOÃO EVANGELISTA – MG

2021

SARAH DIECKMAN ASSUNÇÃO RODRIGUES

**DEPENDÊNCIA ESPACIAL E KRIGAGEM PARA A ESTIMATIVA
TEXTURAL DE SOLOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Instituto Federal de Minas Gerais –
Campus São João Evangelista, como
exigência parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá

SÃO JOÃO EVANGELISTA - MG

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

R696s
2020

Rodrigues, Sarah Dieckman Assunção.

Dependência Espacial e Krigagem para a Estimativa textural de solos.
30 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Instituto Federal de
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João Evangelista, 2020

Orientador : Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá.

1. Areia. 2. silte. 3.Argila. 4.Geoestatística. 5. Método probabilístico.
6. Interpolação. I.Título.

CDD 628

SARAH DIECKMAN ASSUNÇÃO RODRIGUES

**DEPENDÊNCIA ESPACIAL E KRIGAGEM PARA A ESTIMATIVA
TEXTURAL DE SOLOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto Federal de Minas Gerais – Campus
São João Evangelista, como exigência parcial
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Florestal.

Aprovada em 23/07/2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Bruno de Oliveira Lafetá (Orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus São
João Evangelista*



Dr^a. Grazielle Wolff de Almeida Carvalho

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus São
João Evangelista*

**Tamires Mousslech
Andrade Penido**

Assinado de forma digital por
Tamires Mousslech Andrade
Penido
Dados: 2021.08.13 19:27:27 -03'00'

Dra. Tamires Mousslech Andrade Penido
ValeGeo Topografia e Serviços Ambientais

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por sua misericórdia, por iluminar o meu caminho e me dar força durante toda a minha vida. À minha avó Maria e minha tia Selma, pois sem elas de mim nada seria. Ao meu primo Ray, por cuidar da minha avó em minha ausência. Aos meus avós Vica e Ni pelo grande carinho. Ao Profº Bruno Lafetá por sua compreensão, conhecimento compartilhado, paciência e humildade.

Agradeço aos meus amigos Rafaela, Júnior Vitor, Dalila, Carolaine, Igor e Carlos, por todo apoio durante o curso. À Aparecida por sua caridade e ao Guilherme por toda ajuda em momentos que precisei. Todos contribuíram de alguma forma para esse momento.

Agradeço à todos os docentes do curso, por tamanho empenho em suas aulas ministradas. Especialmente aos professores Cleonir e Cícero, pois estes tiveram grande influência sobre a pessoa que me tornei.

Por fim, agradeço ao Instituto Federal de Minas Gerais pela oportunidade de ter acesso à educação de qualidade e por abrir novos horizontes.

“A procura da verdade é difícil e é fácil, já que ninguém poderá desvendá-la por completo ou ignorá-la inteiramente. Contudo, cada um de nós poderá acrescentar um pouco do nosso conhecimento sobre a natureza e, disto, uma certa grandeza emergirá.”

Aristóteles

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. O estudo foi conduzido em uma área de 41,07 ha, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, campus São João Evangelista. Estabeleceu-se uma grade amostral regular de 130×130 m, 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 18,48 ha 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; interpolação.

ABSTRACT

Scientific investigations on 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 mathematical models of theoretical semivariogram in textural estimation of a Red Yellow Latosol. The study area has 41.07 ha at the Federal Institute of Education, Science and Technology of Minas Gerais, campus São João Evangelista. A regular sampling grid of 130×130 m 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 accurate for estimating the silt fraction.

Keywords: sand; silt; clay; geostatistics; probabilistic method; interpolation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA AMOSTRAGEM DE SOLO E INTERPOLAÇÃO	12
2.2 TEXTURA DO SOLO	13
3 METODOLOGIA	14
3.113 14	
3.2 COLETA DE DADOS E INTERPOLAÇÃO ESPACIAL	15
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5 CONCLUSÃO	26
6 REFERÊNCIAS	27

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 é amplamente explorado.

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 et al., 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. 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 et al., 2020; LI et al., 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 et al., 1999; IAC, 2018). Entretanto, a amostragem aleatória baseada na estatística “clássica” não é apropriada diante da ocorrência de dependência espacial (GUARÇONI et al., 2017). Nestas circunstâncias, recomendam-se técnicas geoestatísticas de interpolação para a estimativa de atributos do solo (SHAHRIARI et al., 2019; SULIEMAN; ALGARNI, 2019; LI et al., 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 et al., 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 são incipientes ou recentes (SHAHRIARI et al., 2019; KHANBABAKHANI et al., 2020; LI et al., 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, considerando que é possível encontrar dependência espacial na área estudada, 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.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A agricultura de precisão é uma estratégia de gerenciamento que utiliza informações tecnológicas para a tomada de decisões e uso otimizado de áreas de cultivo agrícola e florestal (WACHOWIAK et al., 2017). Trata-se de uma abordagem inovadora que contempla distintas tecnologias, como redes de sensores para coleta de solos, imagens de satélites, Light Detection and Ranging (LiDAR), softwares para análise geoestatística, sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica, amostragem probabilística e sistema de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT's) (WACHOWIAK et al., 2017; MEDAUAR et al., 2018; BEVINGTON et al., 2019; MAES; STEPPE, 2019, SALEKIN et al., 2019).

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). A gestão dessa variabilidade é feita adotando ferramentas de análise geoestatística (SILVA et al., 2017; PHAM et al., 2019). Tem-se a expectativa de que essa abordagem reduza impactos ambientais e aumente a receita de agricultores, pois o quantitativo de insumos pode ser minimizado e a produção mantida ou aumentada (MAES; STEPPE, 2019).

A agricultura de precisão em atividades agrícolas pode ser adotada para grandes empresas e pequenos proprietários rurais, respeitando o respectivo nível do seu pacote tecnológico (WACHOWIAK et al., 2017).

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA AMOSTRAGEM DE SOLO E INTERPOLAÇÃO

Os procedimentos de coleta e envio para análise, determinação analítica e interpretação de atributos físicos e químicos do solo representam um alto custo em um projeto agrícola, devendo ser apropriadamente efetuados para se evitar interpretações equivocadas. Atualmente, a interpolação espacial possibilita a maior precisão para a representação de características ambientais, porém é pouco explorada diante de seu potencial uso.

A eficiência da aplicação geoestatística se diferencia segundo o delineamento amostral (LUNDGREN, et al., 2016); os delineamentos mais usados são a amostragem

casual simples (SHAHRIARI et al., 2019; LI et al., 2020; WANG et al., 2020) e grades regulares de amostragem (MAIMAITIJIANG et al., 2017; FERRAZ et al., 2018; PHAM et al., 2019). A geoestatística probabilística fornece dados quantitativos de variabilidade espacial e/ou temporal, dependência espacial e mapas temáticos. Esta representação espacial através de mapas facilita a visualização de agricultores e sua compreensão sobre a distribuição de atributos físicos na propriedade (GONZÁLEZ-GONZÁLEZ et al., 2020). O mapeamento é convencionalmente elaborado a partir do georreferenciamento de pontos amostrais no campo, com sistemas de informação geográfica, e podem, inclusive, ser utilizado no desenvolvimento e aplicação de modelos hidrológicos, agrícolas e ecológicos (LI et al., 2020).

O método de interpolação espacial mais empregado em estudos ambientais é a krigagem (TAKOUTSING et al., 2017; BEVINGTON et al., 2019; GALLART et al., 2019; SHAHRIARI et al., 2019; KHANBABAKHANI et al., 2020; PHAM et al., 2019; SULIEMAN; ALGARNI, 2019; LI et al., 2020; WANG et al., 2020). Este método pode ser aplicado na modelagem da distribuição de textura do solo, fornecendo estimativas precisas da granulometria de locais não amostrados (LI et al., 2020).

O processamento de dados via krigagem requer a definição de um modelo matemático ideal de semivariograma teórico. O semivariograma é uma ferramenta que descreve quantitativamente a variação de um fenômeno no espaço, propiciando a obtenção de uma importante métrica, chamada de alcance. Esta métrica representa a distância entre origem e ponto de estabilização da variabilidade de um fenômeno, ou seja, expressa o efeito de dependência espacial (LUNDGREN et al., 2016). Neste caso, a dependência espacial refere-se a distância mínima entre pontos para a obtenção aleatória de amostras compostas de solo (SHAHRIARI et al., 2019, LI et al., 2020).

2.2 TEXTURA DO SOLO

A textura é a proporção relativa de partículas sólidas com diferentes tamanhos presentes no solo. A fração fina que compõem o solo, formada por partículas minerais de até 2 mm em diâmetro, pode ser agrupada em três categorias de tamanho. A argila, silte e areia representam as menores (diâmetros menores que 0,002 mm), intermediárias (diâmetros entre 0,002 e 0,02 mm) e maiores partículas (diâmetros entre 0,05 mm e 2 mm) da fração fina do solo, respectivamente. (JOZEFACIUK et al., 2020).

Geralmente, a textura do solo exhibe heterogeneidade espacial em diferentes escalas espaciais e não se modifica significativamente ao longo do tempo (LI et al., 2020). Ressalta-se que variações em atributos físicos de solos provocam oscilações no rendimento de culturas (SHAHRIARI et al., 2019). Pesquisas já tem relatado a existência de dependência espacial de propriedades hidráulicas, físicas e químicas do solo (BEVINGTON et al., 2016; BEVINGTON et al., 2019).

A textura é um dos atributos mais importantes no planejamento e estabelecimento de diversas culturas anuais e perenes (KHANBABAKHANI et al., 2020). Esta propriedade física influencia a movimentação de água, erosão do solo e transporte de solutos, calor e nutrientes (WANG et al., 2020). A espacialização de dados texturais promove melhorias na alocação de recursos, insumos e monitoramento da produtividade, fundamental para a rentabilidade do empreendimento agrícola.

3 METODOLOGIA

3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O trabalho foi conduzido no município de São João Evangelista – MG, em área do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, nas coordenadas de 18°33'15,13" Sul e 42°45'21,92" de longitude Oeste (Datum Sirgas 2000). 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.

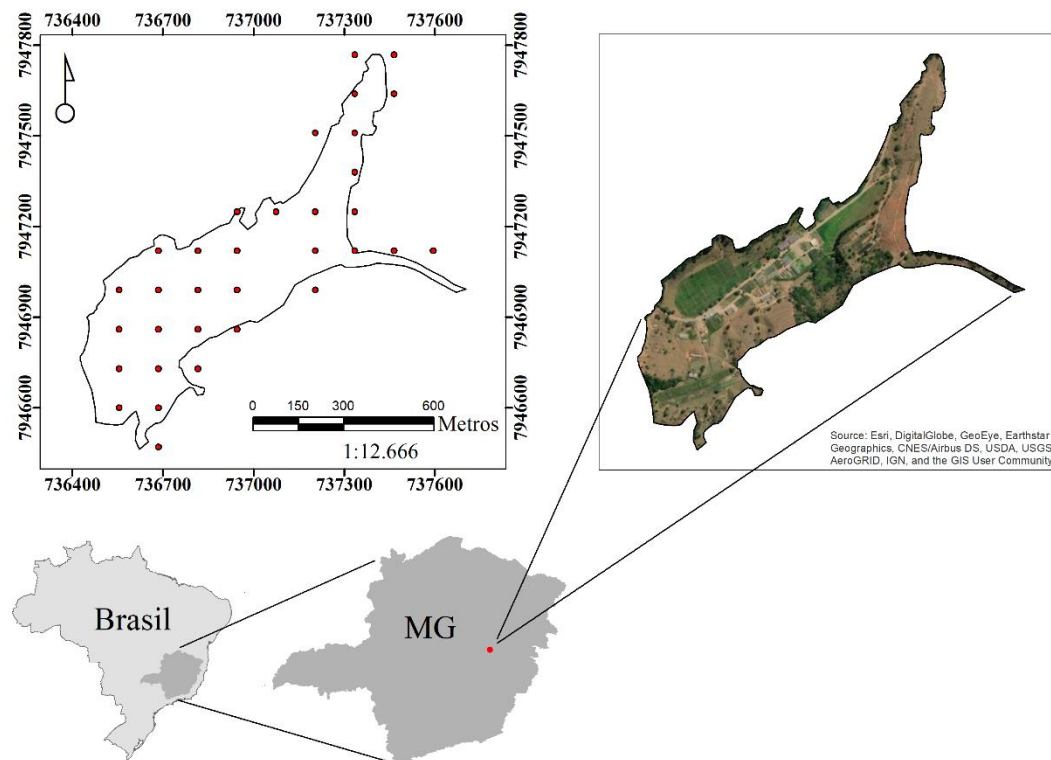


Figura 1. Área de Latossolo Vermelho situada na área do Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus São João Evangelista*.

3.2 COLETA DE DADOS E INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

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 os horizontes superficial e subsuperficial do mesmo.

As amostras compostas de solo foram acondicionadas em embalagens plásticas devidamente identificadas e encaminhadas para a análise textural. A determinação das frações de areia, silte e argila 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). A fração argila foi separada por sedimentação, de acordo com a lei de Stokes, sendo a fração silte determinada por diferença.

De modo exploratório, os dados foram submetidos à estatística descritiva (média, mínimo, máximo, desvio padrão e, pelo método dos momentos, assimetria e curtose), teste de normalidade por Shapiro Wilk e análises gráficas de tendência a partir da dispersão entre os valores texturais e o plano cartesiano. 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 dois métodos de krigagem e os três modelos matemáticos de semivariograma teórico totalizarão seis combinações.

Para cada modelo de semivariograma teórico, os seguintes parâmetros foram calculados e representados graficamente: efeito pepita (C0), contribuição (C1), patamar (C0 + C1) e alcance. O efeito pepita é o valor de semivariância encontrada quando a distância é zero e representa o componente da variação ao acaso; contribuição é a diferença entre o patamar e o efeito pepita; patamar é o valor da semivariância em que a curva estabiliza e se torna constante; 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 et al., 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 et al. (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 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 et al., 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%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fração silte apresentou a maior variabilidade (coeficiente de variação de 61,17%), com forte assimetria positiva e maiores valores de curtose – distribuição leptocúrtica (Tabela 1). A normalidade pelo teste de Shapiro Wilk ($p > 0,01$) foi constatada em todos os dados texturais, exceto para a fração silte. Para as análises subsequentes, aplicou-se a transformação logarítmica para os dados da fração silte.

Tabela 1. Estatística descritiva de aspectos texturais em área de Latossolo Vermelho, no Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista.

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

Os parâmetros dos modelos polinomiais ajustados para a estimativa textural não foram significativos ($p > 0,01$), evidenciando a ausência de tendências de primeiro e segundo grau. Além disso, não foram observadas tendências lineares ou não lineares nos dados texturais em relação ao plano cartesiano, que se distribuíram homogeneamente ao longo dos eixos das coordenadas (Figura 2). Não se verificou tendências no comportamento dos dados ao longo dos eixos cartesianos (perpendiculares entre si), ou seja, não existiu nenhum tipo de enviesamento ou tendenciosidade direcionada.

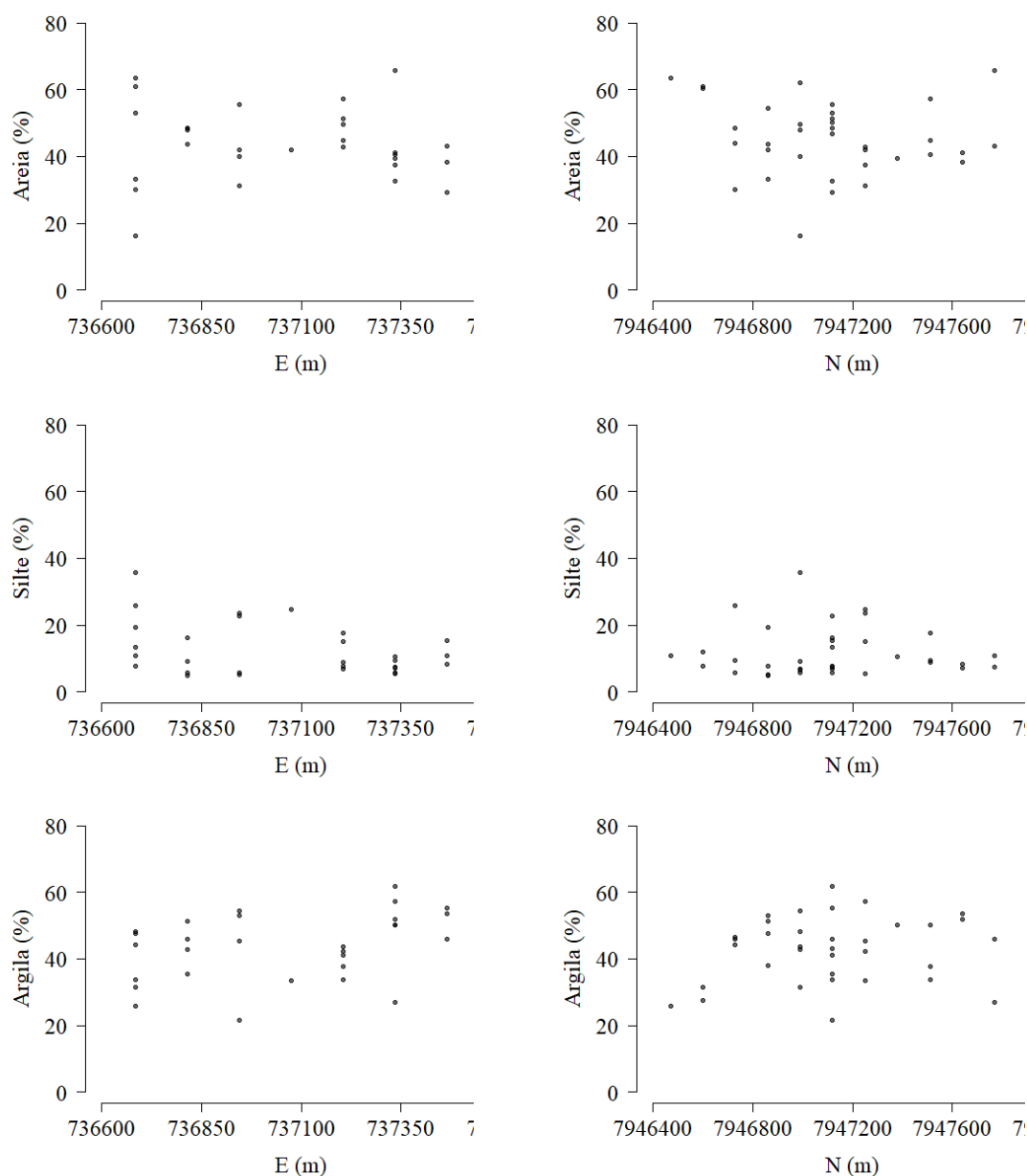


Figura 2. Dispersão de aspectos texturais em área de Latossolo Vermelho, no Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista. N = norte e E = leste.

Os valores dos parâmetros dos semivariograma estão apresentados na Tabela 2. Somente o modelo exponencial de semivariograma construídos 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 m (gaussiano) a 736,90 m (exponencial) e de 485,02 m (gaussiano) a 742,23 m (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 3).

Tabela 2. Estimativa dos parâmetros dos modelos ajustados de semivariograma teórico para aspectos texturais em área de Latossolo Vermelho, na área do Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista.

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

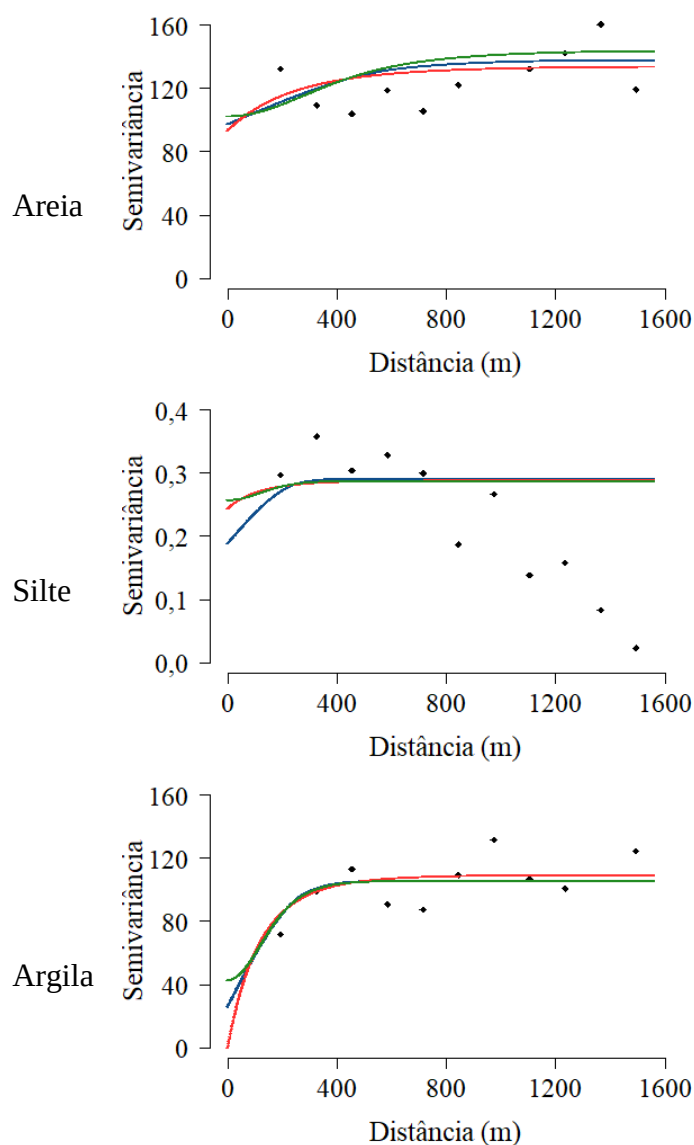


Figura 3. Semivariogramas omnidirecional ajustados a partir dos modelos Esférico, Exponencial e Gaussiano para aspectos texturais em área de Latossolo Vermelho, na área do Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista. Azul = Esférico; vermelho = Exponencial e; Verde = Gaussiano.

O desempenho preditivo oscilou pouco entre os métodos de krigagem e modelos de semivariograma teórico (Tabela3). 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. As estimativas médias para cada fração textural não se diferenciou estaticamente dos resultados analíticos pelo teste t ($p > 0,01$). Por outro lado, 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 foi 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 4).

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, na área do Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus São João Evangelista*.

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
Simples	Esférico	8,9372	11,3430	0,7598
Simples	Exponencial	8,9962	11,4048	0,7654
Simples	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
Simples	Esférico	4,9489	6,5816	0,9715
Simples	Exponencial	5,3697	7,0107	0,9916
Simples	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
Simples	Esférico	6,9623	8,5915	0,6812
Simples	Exponencial	7,3201	8,7916	0,6917
Simples	Gaussiano	6,9331	8,5499	0,6710

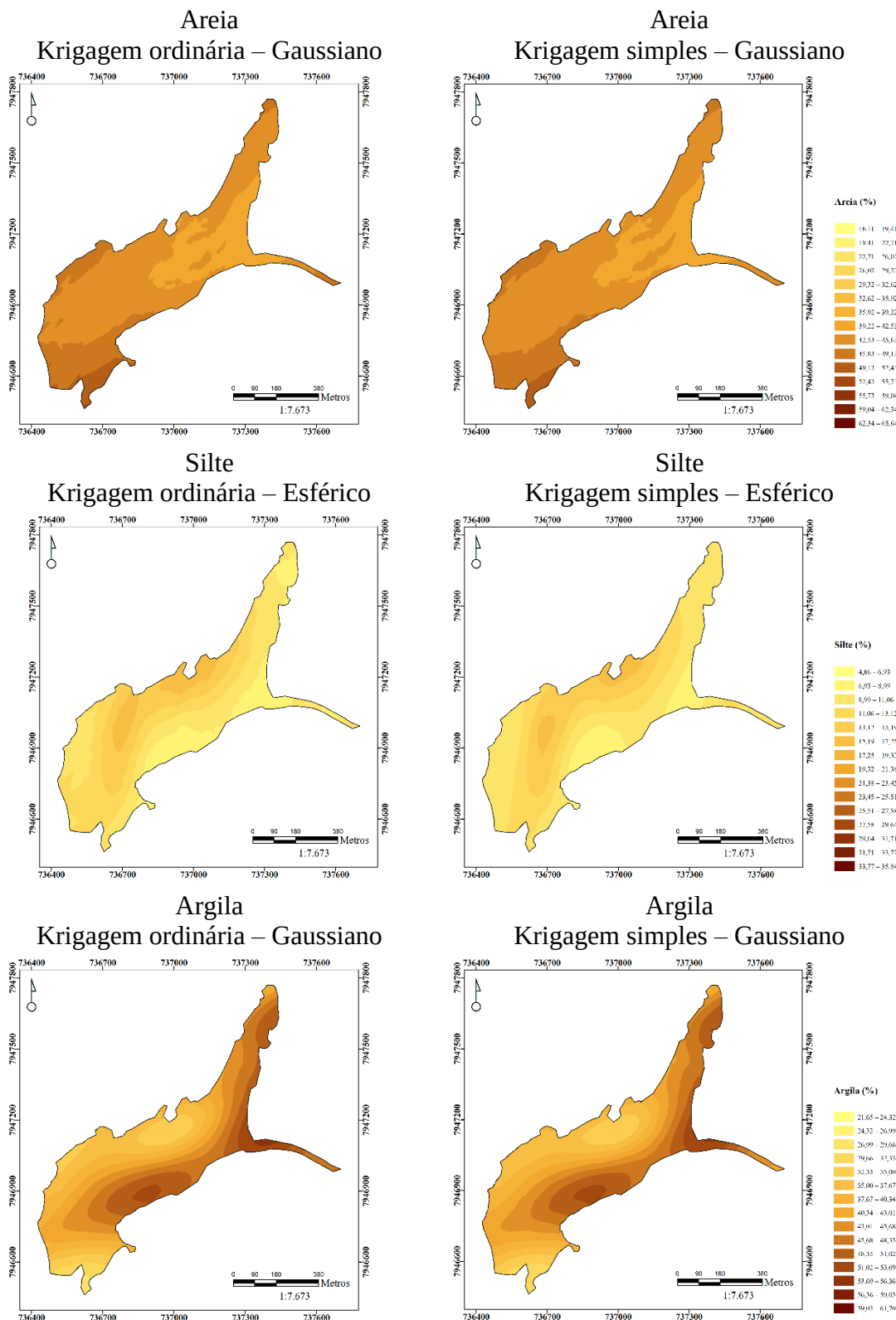


Figura 4. Interpolações relacionadas a diferentes métodos de krigagem e modelos ajustados de semivariograma teórico para aspectos texturais em área de Latossolo Vermelho, na área do Instituto Federal de Minas Gerais – Campus São João Evangelista.

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. A média da soma das três frações texturais estimadas foi de $100\% \pm 3,83\%$. Enfatiza-se que apesar da interpolação de cada fração textural ter sido independente de 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 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 et al., 2020; LI et al., 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 a adsorção de fósforo, indica-se que a amostragem aleatória de solos para fins texturais seja 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 et al., 2017). Tal valor de distância equivale à 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 ha (CANTARUTTI et al., 1999) ou 20 ha (IAC, 2018), mas para fins texturais ainda não se têm um padrão a ser seguido.

A avaliação da fertilidade deve contemplar atributos físicos e químicos do solo para melhor definição de práticas de preparo do solo, balanço e racionalização da aplicação de corretivos e fertilizantes. Os resultados obtidos fornecem subsídios para o

desenvolvimento de futuras pesquisas sobre a análise espacial de atributos físicos e químicos em distintos tipos de solo. O método de krigagem simples se mostrou eficiente para a interpolação de dados espacializados de textura do solo em estudo. Salienta-se que a escolha do procedimento de amostragem deve ser feita com atenção e considerar, também, aspectos relacionados aos custos envolvidos com o geoprocessamento, deslocamento, amostragem e determinação analítica (LAFETÁ et al., 2019).

5 CONCLUSÃO

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

A intensidade da dependência espacial das frações silte e argila tendem a ser menores que aquela da fração areia. Para fins texturais da fração argila, estimou-se o tamanho ideal de glebas circulares de 18,48 ha para a obtenção de amostras compostas aleatórias de solo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABU-HAMDEH, N. H.; ISMAIL, S. M.; AL-SOLAIMANI, S. G.; HATAMLEH, R. I. 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**, v. 65, n. 2, p. 182–196, 2019.
- BEVINGTON, J., PIRAGNOLO, D., TEATINI, P., VELLIDIS, G., MORARI, F. On the spatial variability of soil hydraulic properties in a Holocene coastal farmland. **Geoderma**, v. 262, p. 294–305, 2016.
- BEVINGTON, J.; SCUDIERO, E.; TEATINI, P.; VELLIDIS, G.; MORARI, F. Factorial kriging analysis leverages soil physical properties and exhaustive data to predict distinguished zones of hydraulic properties. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 156, p. 426–438, 2019.
- 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: Ed. UFV, 1999. p. 13-20.
- CENTENO, L. N.; GUEVARA, M. D. F.; CECCONELLO, S. T.; SOUSA, R. O. D.; TIMM, L. C. Textura Do Solo: Conceitos E Aplicações Em Solos Arenosos. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 4, n. 1, p. 31–37, 2017.
- 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.; OLIVEIRA, M. S.; SILVA, F. M.; SALES, R. S.; CARVALHO, L. C. C. Plant sampling grid determination in precision agriculture in coffee field. **Coffee Science**, v. 13, n. 1, p. 112–121, 2018.
- GALLART, M.; LOVE, J.; MEASON, D. F.; COKER, G.; CLINTON, P. W.; XUE, J.; JAMESON, P. E.; KLÁPŠTĚ, J.; TURNBULL, M. H. Field-scale variability in site conditions explain phenotypic plasticity in response to nitrogen source in *Pinus radiata* D. Don. **Plant and Soil**, v. 443, p. 353–368, 2019.
- GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, M. G.; GÓMEZ-SANCHIS, J.; BLASCO, J.; SORIA-OLIVAS, E.; CHUECA, P. Citrus yield: a dashboard for mapping yield and fruit quality of citrus in precision agriculture. **Agronomy**, v. 10, n. 128, p. 1–13, 2020.
- 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**, v. 35, n. 4, 2017.
- IAC – INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Análise do solo, plantas, substratos resíduos e fertilizantes**. Disponível em: < <http://www.iac.sp.gov.br/> > Acesso em: 15 de 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.; ADAMCZUK, A.; SKIC, K.; BOGUTA, P. New method for quantifying water stability of soil aggregates from air bubbling after immersion. **Measurement**, v. 155, p. 1-11, 2020.
- 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**, v. 13, n. 237, p. 1–14, 2020.
- LAFETÁ, B. O.; PENIDO, T. M. A.; MARTINS, N. S.; OLIVEIRA, M. L. R.; MUCIDA, D. P.; SANTANA, R. C. Sampling of chemical attributes in forest soils. **Floresta**, v. 49, n. 2, p. 305-316, 2019.
- LI, J.; WAN, H.; SHANG, S. Comparison of interpolation methods for mapping layered soil particle-size fractions and texture in an arid oasis. **Catena**, v. 190, p. 1-15, 2020.
- 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**, v. 23, n. 4, p. 511-523, 2016.
- MAES, W. H.; STEPPE, K. Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. **Trends in Plant Science**, v. 24, n. 2, p. 152–164, 2019.
- MAIMAITIJIANG, M.; GHULAM, A.; SIDIKE, P.; HARTLING, S.; MAIMAITIJIANG, M.; PETERSON, K.; SHAVERS, E.; FISHMAN, J.; PETERSON, J.; KADAM, S.; BURKEN, J.; FRITSCHI, F. Unmanned aerial system (UAS) – based phenotyping of soybean using multi-sensor data fusion and extreme learning machine. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 134, p. 43-58, 2017
- MEDAUAR, C. C.; SILVA, S. D. A.; CARVALHO, L. C. C.; TIBÚRCIO, R. A. S.; LIMA, J. S. S.; MEDAUAR, P. A. S. Monitoring of eucalyptus sprouts control using digital images obtained by unmanned aerial vehicle. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 37, n. 7, p. 739–752, 2018.
- PHAM, T. G.; KAPPAS, M.; HUYNH, C. V.; NGUYEN, L. H. K. Application of ordinary kriging and regression kriging method for soil properties mapping in hilly region of central Vietnam. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 147, p. 1-17, 2019.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2018.
- SALEKIN, S.; MASON, E. G.; MORGENROTH, J.; BLOOMBERG, M.; MEASON, D. F. 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**, v. 10, n. 857, p. 1–21, 2019.
- SANTOS, G. R.; OLIVEIRA, M. S.; LOUZADA, J. M.; SANTOS, A. M. R. T. Krigagem simples versus krigagem universal: qual o preditor mais preciso? **Energia Na Agricultura**, v. 26, n. 2, p. 49–55, 2011.
- SCOTT, D. W. On optimal and data-based histograms. **Biometrika**, Oxford, v.66, n.3, p.605-610, 1979.

- SHAHRIARI, M.; DELBARI, M.; AFRASIAB, P.; PAHLAVAN-RAD, M. R. Predicting regional spatial distribution of soil texture in floodplains using remote sensing data: a case of southeastern Iran. **Catena**, v. 182, p. 1-12, 2019.
- SILVA, V. E.; MONTANARI, R.; LIMA, E. S.; SILVA, P. R. T.; FREITAS, L. A.; PINOTTI, C. R.; NASCIMENTO, V.; LIMA, C. G. R. Liming influence on the spatial variability of the leaf chemical composition and in the initial growth of the eucalyptus. **Journal of Geospatial Modelling**, v. 2, n. 1, p. 1–11, 2017.
- 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**, v. 8, n. 1, p. 44–53, 2019.
- TAKOUTSING, B.; MARTÍN, J. A. R.; WEBER, J. C.; SHEPHERD, K.; SILA, A.; TONDOH, J. 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**, v. 178, p. 35–44, 2017.
- UYANIK, O. Estimation of the porosity of clay soils using seismic P- and S-wave velocities. **Journal of Applied Geophysics**, v. 170, p. 1-8, 2019.
- WACHOWIAK, M. P.; WALTERS, D. F.; KOVACS, J. M.; WACHOWIAK-SMOLÍKOVÁ, R.; JAMES, A. L. Visual analytics and remote sensing imagery to support community-based research for precision agriculture in emerging areas. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 143, p. 149–164, 2017.
- WANG, Z.; SHI, W.; ZHOU, W.; LI, X.; YUE, T. Comparison of additive and isometric log-ratio transformations combined with machine learning and regression kriging models for mapping soil particle size fractions. **Geoderma**, v. 365, p. 1-16, 2020.