

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – JÚLIO DE MESQUITA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**MÉTODOS DE COLOCALIZAÇÃO DE DADOS ESPACIAIS DE
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE E TEOR DE ARGILA DO SOLO**

Luís Augusto Gervásio Junqueira

Jaboticabal - SP
1º Semestre/2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**MÉTODOS DE COLOCALIZAÇÃO DE DADOS ESPACIAIS DE
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE E TEOR DE ARGILA DO SOLO**

Luís Augusto Gervásio Junqueira

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Corá

Coorientador: Prof. Dr. Lucas Rios do Amaral

Trabalho apresentado à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP,
Câmpus de Jaboticabal, para graduação
em ENGENHARIA AGRONÔMICA.

Jaboticabal - SP

1º Semestre/2025

J95m

Junqueira, Luis Augusto Gervásio

Métodos de colocação de dados espaciais de condutividade elétrica aparente e teor de argila do solo / Luis Augusto Gervásio Junqueira. -- Jaboticabal, 2025 40 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônoma) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias,
Jaboticabal

Orientador: José Eduardo Corá

Coorientador: Lucas Rios do Amaral

1. Agricultura de precisão. 2. Condutividade elétrica do solo. 3. Colocação. 4.
Evento espacial. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.

Dados fornecidos pelo autor(a).

Luís Augusto Gervásio Junqueira

**MÉTODOS DE COLOCALIZAÇÃO DE DADOS ESPACIAIS DE CONDUTIVIDADE
ELÉTRICA APARENTE E TEOR DE ARGILA DO SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Área de Concentração: Ciência do Solo

Data da defesa: 17/03/2025

(x) Aprovado

() Reprovado

Banca Examinadora:

 Documento assinado digitalmente
JOSE EDUARDO CORÁ
Data: 17/03/2025 15:22:35-0300
Verifique em <https://validar.itu.gov.br>

Prof. Dr. José Eduardo Corá

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

 Documento assinado digitalmente
DOUGLAS HENRIQUE BANDEIRA
Data: 17/03/2025 16:15:38-0300
Verifique em <https://validar.itu.gov.br>

Prof Dr. Douglas Henrique Bandeira

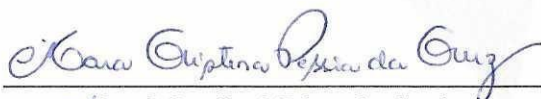
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

 Documento assinado digitalmente
GUILHERME MARTINELI SANCHES
Data: 17/03/2025 15:56:35-0300
Verifique em <https://validar.itu.gov.br>

Dr. Guilherme Martineli Sanches

CCarbon - Centro de Estudos de Carbono em Agricultura Tropical – ESALQ/USP

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: ____/____/____



p/ Prof. Dr. José Eduardo Corá
Chefe do Departamento

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por sempre me proteger e guiar em todos os momentos e situações. Aos meus pais, José Geraldo Junqueira e Luciana Inês Gervásio Junqueira, que são meus maiores exemplos de educação, comprometimento e amor, sem vocês nada disso seria possível. A minha irmã, Marina Gervásio Junqueira, que sempre me inspira com pensamentos e discussões. Aos meus avós que são parte inesquecíveis da minha vida. Agradeço a minha namorada, Marina Guimarães Brum de Castro, pelo companheirismo e amor nesse período. Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. José Eduardo Corá, pela oportunidade em desenvolver pesquisa e me transmitir conhecimento de forma tão natural. Ao coorientador, Prof. Dr. Lucas Rios Amaral, pelo suporte e pelas oportunidades em desenvolver o meu conhecimento. Um agradecimento especial à UNESP-FCAV, Jaboticabal-SP, por toda a estrutura oferecida nesses anos de graduação, e por ter sido local que encontrei diversos amigos para vida.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1.	Agricultura de Precisão	3
2.2.	Dados Geográficos	5
2.3.	Condutividade elétrica aparente do solo (CEa).....	9
3.	MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1.	Área experimental	10
3.2.	Coleta dos dados.....	12
3.3.	Modelos de colocação entre CEa e argila	15
3.3.1.	Eventos discretos	15
3.3.2.	Eventos contínuos.....	18
3.4.	Análise dos dados.....	19
4.	RESULTADOS	20
5.	DISCUSSÃO	31
6.	CONCLUSÃO	34
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
8.	Apêndice	40

MÉTODOS DE COLOCALIZAÇÃO DE DADOS ESPACIAIS DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE E TEOR DE ARGILA DO SOLO

RESUMO - O setor agrícola é um grande consumidor de tecnologia. Atualmente, o campo busca por mais informação para viabilizar e impulsionar a lucratividade e sustentabilidade. A agricultura de precisão se mostra então como uma saída para melhor alocação de recursos considerando a variabilidade espacial da lavoura. No entanto, encontrar essas variabilidades pode ser uma tarefa laboriosa pelos métodos amostrais tradicionais. No caso do entendimento da variação do solo, uma solução que vem sendo utilizada é o uso de sensores a campo, que geram uma grande densidade amostral e auxiliam na melhor escolha de pontos de coleta. Contudo, em muitos casos se faz necessário a colocalização das amostras de duas ou mais variáveis coletadas, como nos estudos de causa e efeito. Existem diversos processos que podem ser utilizados, como região de influência (buffers) e interpolações e, a depender de qual processo aplicado, altera-se o valor final da análise. A fim de comprovar a influência desses processos em uma análise de correlação, foram realizadas avaliações de condutividade elétrica aparente do solo e coleta de amostras de solo, para mensuração do teor de argila. Posteriormente, foi realizada a colocalização, utilizando os métodos de buffer com 15 e 30 metros, média por zonas homogêneas, interpolação por inverso da distância, inverso da distância ao quadrado e ao cubo, krigagem universal, krigagem em bloco de três por três e krigagem em bloco de seis por seis. Os valores pareados e com as mesmas localizações foram correlacionados por meio do método de Pearson. O buffer com raio de 30 metros foi o que ofereceu maior correlação dos dados do sensor com o teor de argila encontrado nas amostras de solo. Já a clusterização por k-means aplicando três classes foi a que apresentou menor valor de correlação. Os métodos utilizados para colocalização influenciam a correlação entre os atributos CEa e teor de argila.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Condutividade elétrica do solo; Colocalização; Evento espacial.

Methods for collocating spatial data on apparent electrical conductivity and soil clay content

ABSTRACT - The agricultural sector is a major technology consumer. Currently, the field is seeking more information to enable and generate profitability and sustainability. Precision agriculture is thus seen as a way to better allocate resources considering the spatial variability of labor. However, finding these variabilities can be a laborious task using traditional sampling methods. In the case of understanding soil variation, one solution that has been used is the use of field sensors, which generate a high sampling density and assist in the best choice of collection points. However, in many cases it is necessary to colocalize samples of two or more collected variables, as in cause and effect studies. There are several processes that can be used, such as region of influence (buffers) and interpolations, and depending on the process applied, the final value of the analysis changes. To prove the influence of these processes on a surface analysis, assessments of the apparent electrical conductivity of the soil and collection of soil samples to measure the clay content were carried out. Subsequently, colocalization was performed using the 15 and 30 meters buffer methods, wetland average, inverse distance interpolation, inverse distance squared and cubed, universal kriging, three by three block kriging, and six by six block kriging. Paired values with the same locations were correlated using the Pearson method. The 30 meters buffer provided the greatest exposure of the sensor data with the clay content found in the soil samples. The k-means clustering applying three classes presented the lowest clarification value. The methods used for colocalization influence the brightness between the CEa and clay content attributes.

Keywords: Precision agriculture; Soil electrical conductivity; Co-locate; Spatial event.

1. INTRODUÇÃO

A interdisciplinariedade das diversas áreas do conhecimento é fundamental para resolução de problemas que afligem a sociedade. Nesse sentido, o agronegócio brasileiro tem se destacado por demandar, absorver e adotar soluções tecnológicas, conhecimento e gestão (EMBRAPA, 2018). No setor há empresas voltadas para oferecer soluções tecnológicas para o agronegócio que recebem uma classificação própria Agtech (Blanco, 2019). Porém, adotar tecnologias recém-lançadas não é tudo, mas sim alterar a forma de produção, tornando-as mais eficientes e competitivas em todas as etapas da cadeia produtiva (Tagliani, 2016).

No contexto do agronegócio, conhecer a unidade produtiva é fundamental para a alocação adequada dos recursos que são escassos e as necessidades ilimitadas, uma das leis que regem a economia. Nesse sentido, o termo agricultura de precisão (AP) apresenta-se, na atualidade, muito difundido e utilizado no sistema produtivo do agronegócio. No Google acadêmico (2024) são encontrados, aproximadamente, 213.000 resultados de trabalhos relacionados ao tema agricultura de precisão. É consenso que, para a implementação do sistema de AP, é necessário investigar, compreender e ter certeza se há uma variabilidade, dentro da unidade produtiva e ser economicamente rentável tratar (Inamasu et al., 2024).

No sistema de AP, a maneira mais utilizada de investigação para conhecer a variabilidade se refere à amostragem do solo da unidade produtiva e construir um plano de intervenção agrônômica. A amostragem de solo utilizando técnicas de AP, por exemplo, deve permitir quantificar os atributos desejados e mostrar

sua variação na região via mapa temático (Molin et al., 2015). Para isso, é fundamental que sejam respeitados padrões mínimos referentes aos métodos de interpolações utilizados, análises estatísticas, adequado tratamento das amostras, análises no laboratório e espacialização dos dados (Peets et al., 2012). Após a espacialização, é comum que seja realizada a interpolação, que visa a estimar valores de um atributo contínuo a partir de valores conhecidos para toda a área (Miranda, 2005). Diante desse desafio, instrumentos, sensores e métodos de amostragens, que são testados e disponibilizados por pesquisadores de solo, visando facilitar a coleta e a qualidade das medições (Vaz et al., 2007).

Dados obtidos por meio de sensores são sensíveis a variabilidade espacial das unidades produtivas (SANCHES et al., 2017). Isso pelo fato de obterem um grande número de dados sobre o terreno, como acontece na avaliação da situação geral da fertilidade do solo (SUDDUTH et al., 2005, SANCHES et al., 2017), da compactação do solo (Castioni et al., 2018) e até para mapear a produtividade em algodão (BRANDÃO et al., 2024), por meio da avaliação da condutividade elétrica aparente do solo. Contudo, para analisar dados de diferentes densidades amostrais, posições no terreno e formatos de arquivos, é necessário adotar diferentes estratégias: analisar dados interpolados (rasters) ou dados absolutos, relações entre os atributos vetoriais.

O método de colocação entre diferentes densidades amostrais e posições dos pontos deve buscar a manutenção da realidade amostrada. Nesse sentido, os dados podem ser tratados como evento discreto, ou seja, ter a sua representação em polígonos (vetores), isto é, áreas delimitadas. Neste caso à

região de influência, buffers, nos quais criam-se círculos em volta das amostras menos densas e extraem-se resultados de estatística descritiva dos dados (Molin et al., 2015), ou tratamento de zonas (polígonos) que abrangem toda a área e recebem um valor representativo dessa, como é o caso de zona homogêneas e a própria divisão da propriedade, normalmente dívida em talhões. Outra forma de processo é por meio de eventos contínuos, ou seja, busca-se reconstruir toda a superfície da área estimando valores faltantes, neste caso, os métodos mais comuns em ciências naturais são os interpoladores inversos da distância e krigagem (Li e Heap, 2011).

Nesse sentido, a hipótese do presente trabalho é que a krigagem universal é o método que gera valores mais significativamente correlacionados entre variáveis. Portanto, o presente trabalho teve como objetivo comparar métodos de colocação de dados espaciais de condutividade elétrica aparente e teor de argila do solo, utilizando diferentes métodos de interpolação de dados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Agricultura de Precisão

A agricultura de precisão (AP) vem se popularizando com o decorrer dos anos como um termo associado a eficiência, sustentabilidade e lucratividade no setor agrícola (Pires et. al., 2024). A Sociedade Internacional de Agricultura de Precisão (International Society of Precision Agriculture - ISPA) em 2024 trouxe a seguinte descrição traduzida para o português: “Agricultura de Precisão é uma estratégia de gestão que reúne, processa e analisa dados temporais, espaciais, individuais de plantas e animais e os combina com outras informações para apoiar as decisões de gerenciamento de acordo com a variabilidade estimada para melhorar a eficiência no uso de

recursos, produtividade, qualidade, rentabilidade e sustentabilidade da produção agropecuária”. Sendo assim, para implementar o sistema de gestão de AP é necessário investigar e compreender a variabilidade espacial do solo, das plantas e animais que caracterizam uma unidade produtiva e para tratá-la de forma correta (Inamasu et. al., 2024).

A primeira etapa do sistema de gestão AP está relacionada a investigação, compreensão e determinação da variabilidade na área. A investigação se refere ao levantamento de informação sobre a variabilidade, podendo ser por amostragem de solo no formato de grid (Cherubin et al., 2022), dados de produtividade (Molin et al., 2015) ou sensoriamento proximal como condutividade elétrica aparente. A compreensão passa por processar e analisar os dados levantados da área, como exemplo de processo, quando se tem a colocação de duas ou mais variáveis, para que seja possível prosseguir com realização de agrupamento entre diversas variáveis (Speranza, 2017) ou prosseguir análise de causa e efeito (Molin et al., 2015). O processo de análise espacial, da variação na área, finaliza com a delimitação de regiões diferenciadas que podem ter metros (Molin et al., 2015) ou regiões, que se forem áreas com mesmo potencial produtivo, limitações e demanda nutricional podem caracterizar uma zona de manejo (Luchiari Jr. et al., 2000). Após isso, na segunda etapa ocorre a intervenção por meio de tratamento localizado considerando as variações encontradas na primeira etapa. Os benefícios da adoção do manejo localizado são diversos se destacando aumento da qualidade final do produto, melhor aplicação de insumos agrícolas, redução dos danos ambientais, além disso, em alguns casos, pode ocasionar na redução do uso de insumos e aumento da

produtividade (Molin et al., 2015). A aplicação de taxa variada de fertilizante e calcário é o principal uso de tratamento localizado, utilizando a variabilidade espacial/temporal da área (Cherubin et al., 2022).

2.2.Dados Geográficos

Os estudos de fenômenos incorporando os aspectos espaciais visam a compreensão da distribuição, relacionamentos e propriedades de uma variável no espaço geográfico (Câmara, 2004). O fenômeno localizado no espaço é chamado de evento (Câmara, 2001). O trabalho considerado pioneiro em análise espacial foi feito pelo médico inglês John Snow, no século XIX. John mapeou as residências em que houve mortes pela doença de cólera e as bombas de água distribuídas em uma região de Londres (Johnson, 2007). Após o mapeamento, Snow encontrou um padrão espacial de que o epicentro da epidemia ocorreu justamente no entorno de uma das bombas, na Broad Street (Figura 1). Cabe ressaltar que na época não se conheciam os meios de propagação da doença.

A exemplo dos casos de cólera na região das bombas de água contaminada, os fenômenos espaciais são aqueles que sofrem com interferências ligadas à sua localidade. Por esse motivo, o geógrafo Waldo Rudolph Tobler (1970) formulou a considerada primeira lei da geografia: “Tudo está relacionado com tudo, mas as coisas mais próximas estão mais relacionadas entre si do que as mais distantes” (Geographers, 2024).

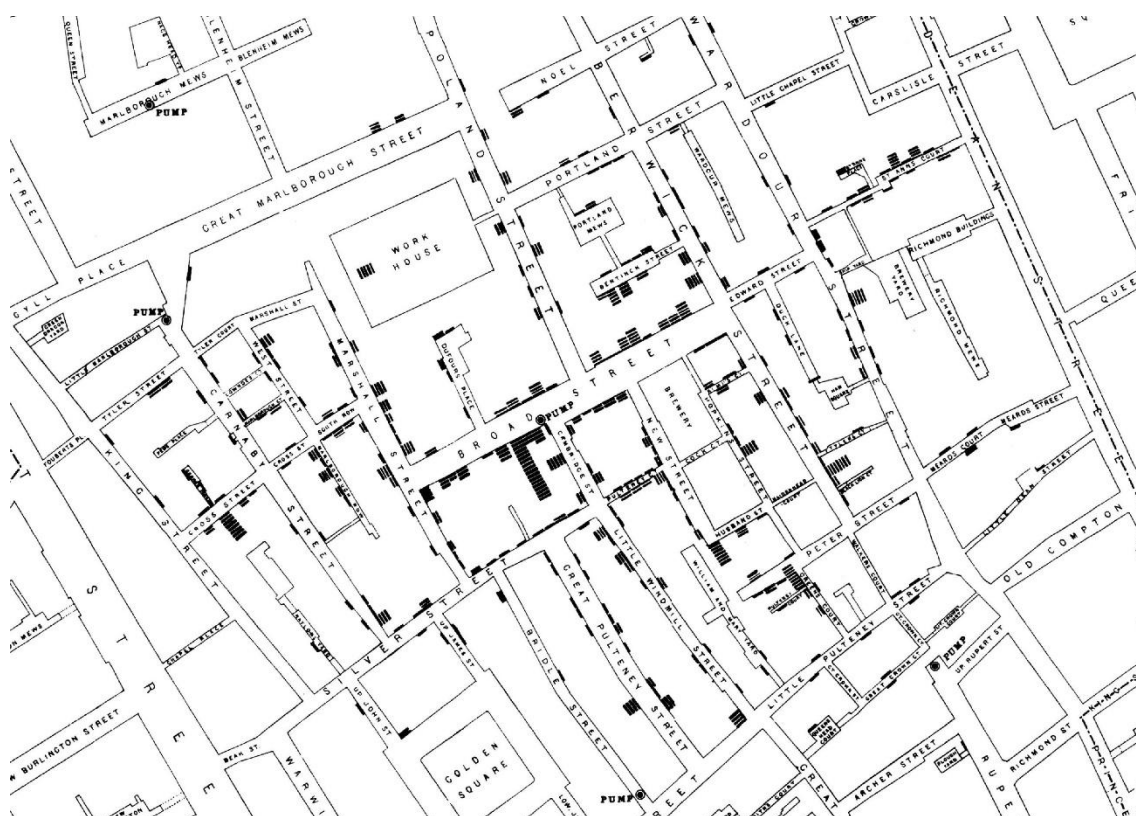


Figura 1. Ilustração feita pelo médico John Snow, em que as barras indicam os locais de a incidência de casos de cólera registrados e notem-se os círculos em que foram inseridos os pontos de fornecimento de água chamados de “Pump”. Fonte: “On the Mode of Communication of Cholera, 2nd ed. (January 1855), Map 1, after page 44”.

A área do conhecimento que traz o aspecto geográfico em sua composição básica é a ciência geográfica. A geografia integrada às tecnologias e toda a relação entre cidadão-sociedade-tecnologia apresenta-se o termo inteligência geográfica (CEREDA JUNIOR, 2017). Os objetos estudados pelos geógrafos por natureza apresentam uma ambivalência, e existe uma dúvida permanente sobre quais aspectos da realidade devem ser considerados e estudados (Hagget e Chorley, 1970), uma vez que se buscam representações do mundo real, selecionando as variáveis e representando-as para compreender o mundo. Nesse sentido, a inteligência geográfica busca responder aos problemas, utilizando técnicas geográficas (Valeriano, 2013) como também,

influenciar as tomadas de decisão de empresas públicas e privadas (Francisco, 2015).

O SIG, essencialmente, é meio em que se produzem e se trabalham dados espaciais, é o aplicativo que reúne técnicas e métodos para se trabalharem os dados geográficos. Os tipos de dados espaciais utilizados em análises espaciais são: dados ou eventos pontuais que carregam informação localizada em um ponto, dados ou eventos contínuos que buscam reconstruir uma superfície podendo ser regular ou irregularmente dispersos e área com contagem/ taxa agregada (dados ou eventos discretos) que são áreas, cujos valores coletados são conglomerados em uma região demarcada e passam a representá-la (Câmara, 2004). Cada tipo de evento carrega consigo uma ou mais aplicabilidade, no qual, para eventos do tipo pontual, o enfoque se dá na própria localização do evento; o evento contínuo visa reconstruir a área amostrada; o evento discreto de contagem visa de modo geral representar uma região homogênea ou grandes variações entre áreas delimitadas, podendo ser delimitações arbitrárias que não representem a realidade (Câmara, 2004; Ferreira, 2014).

A decisão de como delimitar a área no evento discreto é motivo de discussão; isso acontece, pois tem-se o problema da unidade de área modificável; alterando a área delimitada, alteram-se os valores e a representação final dessa área (Câmara, 2004). Como exemplo de delimitações há o modelo de região de influência, também conhecidos como buffers, que por característica não contemplam toda a área de estudo, pois é uma região em que o usuário define o alcance, a partir de certa coordenada em uma camada

informacional e atribui valor (média, mediana ou desvio padrão) de dados que se localizam no seu interior de outra camada informacional (De Queiroz et al., 2022). Outra forma é utilização de algoritmos de agrupamentos, que são métodos que delimitam em classes similares os pontos da variável informacional (Gavioli et al., 2019) e atribuem um valor representativo a cada uma. Um desses algoritmos é “k-means”, algoritmo de agrupamento, que parte do número de grupos de classificação desejados pelo usuário (parâmetro “k”), em seguida aleatoriamente escolhe as amostras centroides e compara com outras amostras pela distância compondo as áreas delimitadas (Speranza, 2017). Há casos em que as áreas são divisões arbitrárias, sem critérios de agrupamento, ou seguem limitações do terreno, como a delimitação de um bairro em uma cidade ou talhões em uma fazenda.

Ao reconstruir a característica da superfície, utiliza-se interpolação ou estimativa para compor os valores faltantes (Yamamoto e Landim, 2013; Ferreira, 2014). O algoritmo de interpolação pode ser determinístico, como o inverso da distância, conhecido como “*Inverse Distance Weighted*” (IDW) (SHEPARD, 1968), baseado na distância euclidiana (Ferreira, 2014). O ponderador distância pode receber algum expoente conferindo maior peso aos valores vizinhos do valor conhecido, sendo quanto maior o expoente, maior esse peso à vizinhança (Ferreira, 2014). Sendo o expoente ao quadrado a forma mais popular de se colocar peso a distância (Isaaks e Srivastava, 1989). Ou geoestatístico, como a Krigagem (Krige, 1952; Matheron, 1963, 1969) foi desenvolvida e aplicada por Daniel Krige (Clark, 1979) para avaliação de minas na África do Sul. Ela como um interpolador geoestatístico tem o objetivo de

modelar a variabilidade da variável de estudo no espaço e/ou tempo (Yamamoto e Landim, 2013). A krigagem utiliza parâmetros modelados e analisados a partir de semivariogramas (Landim, 2006), como lag, distância máxima, alcance, contribuição e efeito pepita. Isso tudo para o algoritmo trabalhar apenas com os valores que possuem dependência espacial, dados situados antes do alcance do semivariograma. A dependência espacial é quando dados espaciais não ocorrem de forma aleatória, e sim espacialmente dependentes (Ferreira, 2014). A krigagem em bloco é o cálculo do valor médio de um bloco de tamanho definido pelo usuário centralizado em um ponto/pixel (Yamamoto e Landim, 2013). Esse método é tido como uma suavização, pois calcula-se a média de uma região e confere esse valor ao pixel do centro do bloco.

2.3. Condutividade elétrica aparente do solo (CEa)

A amostragem densa é fundamental para aplicar os fundamentos da geoestatística em dados espaciais (Rossel et al., 2010). Nesse sentido, o sensoriamento proximal é uma alternativa de fonte de dados, como a medida de condutividade elétrica aparente do solo. No estudo do solo, considera-se a condutividade elétrica (CE) como a medida dos solos saturados e sem ar realizado com eletrodos em laboratório (Corwin e Lesch, 2005). Já a inferência da condutividade elétrica aparente (CEa) do solo representa a essa em condição de campo, no momento da coleta.

Em nível de campo, os princípios de medições mais utilizados são resistividade elétrica (RE) e o princípio da indução eletromagnética (IEM). Porém, ambos os sensores fornecem padrões espaciais similares e alta

correlação entre os dados (Fritz et al., 1999; Buchleiter e Farahani, 2002; Sudduth et al., 2003).

Os fatores físicos do solo determinados pelas três fases, sólida, líquida e gasosa alteram a condutividade elétrica; essa alteração se dá pela interação coloide com os íons presentes (Li, 1997). A medição é alterada pelo caminho da corrente elétrica transmitida no meio, sendo para agricultura, o solo. As três possibilidades são: transmissão por meio da fase líquida do solo e seus íons; pela fase sólida-líquida, em que ocorre a troca de cargas entre as fases; e pela fase sólida, é transmitida pelo contato direto entre as partículas que compõem os solos (RHOADES et al., 1999; Corwin e Lesch, 2005).

A condutividade elétrica aparente do solo é influenciada por diversos fatores, como teor de água, composição química da fase líquida e sólida e teor de argila (Nadler et al., 1980), umidade (Bottega, 2022) e compactação (Castioni et al., 2018). Na literatura é relatada correlação positiva entre CEa e teor de argila (Moral et al., 2010). No sistema de AP essa medida possui diversos usos como indicar distribuição espacial da argila e atributos químicos na área e orientar a amostragem a ser realizada (Sanches et al., 2018), auxiliar na determinação de ambientes de produção na cana de açúcar (Sanches et al., 2019) e auxilia na definição de zona de manejo em algodão, soja e milho (Speranza et al. 2024).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área experimental

A área comercial onde foi realizado o estudo está localizada no estado de São Paulo no município de Cosmópolis (22°42' S e 47°11' O), com 103 hectares. As características climáticas da região são subtropicais com invernos secos e

verões quentes. A média anual de temperatura (20-22°C) e precipitação (1300 - 1600 mm) a classificam como Cfa (Alvares, 2013). O relevo é levemente ondulado, e possui Latossolos e Gleissolos.

O norte da propriedade faz divisa com o rio Jaguari, sendo a área mais baixa (540 metros). No extremo oposto há uma região mais alta, com aproximadamente 580 metros.



Figura 2. Áreas em marrom, figura à esquerda, são os talhões da propriedade. Mapa de altitude representado por isolinha de 10 metros de distância, fonte: (SRTM, 2008).

A área está localizada em uma região de transição entre a unidade geológica de cobertura sedimentar com origem no período cenozoico classificada com o número 3 – “Cobertura cenozoicas indiferenciadas” e material 15c de origem metamórfica da Bacia do Paraná sub-grupo Itararé – “Arenitos finos laminados: abundantes laminações cruzadas e convolutas” (Rodrigues, 1996).

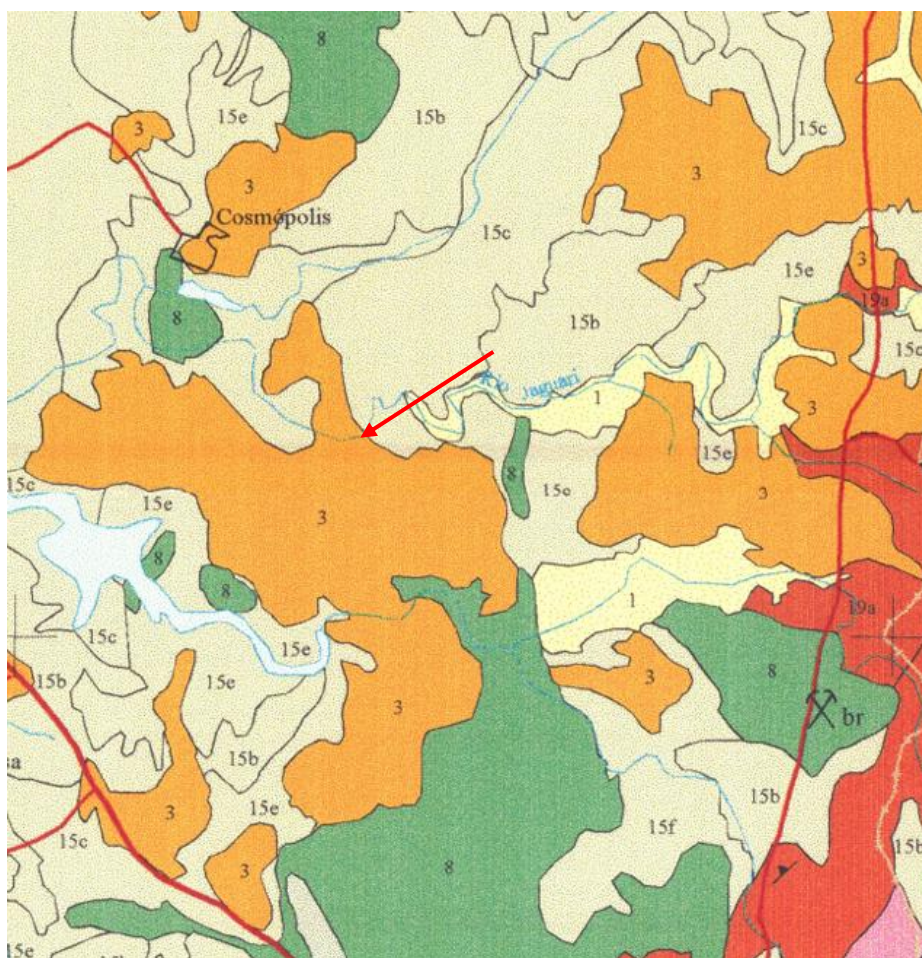


Figura 3. Representação geológica da região entre Cosmópolis - SP e Paulínia - SP. A flecha em vermelho indica o local aproximado de onde está localizada a fazenda de estudo. Fonte: “Integração geológica da folha Campinas 1: 250.000 (SF. 23-YA)”

O histórico de plantio da propriedade conta com pomares de laranja entre 1985 e 2015, quando, foi gradativamente transformada em lavoura comercial de grãos. Hoje, o sistema de produção é de plantio direto na palha com soja na safra e outros grãos (aveia ou sorgo) na safrinha.

3.2. Coleta dos dados

Os dados de condutividade elétrica aparente (CEa) foram coletados com o equipamento EM38-MK2® (Geonics Limited, Ontario, Canada) no mês de outubro de 2020. O sensor realiza medições por meio de indução eletromagnética (IEM) e contém três bobinas, sendo uma emissora de um campo

eletromagnético induzido e duas outras bobinas receptoras distanciadas a 0,5 metro e a 1 metro da bobina emissora, permitindo avaliação simultânea a duas diferentes profundidades (GEONICS, 2014). Além de coletar ao mesmo tempo in-phase (Suscetibilidade magnética aparente - SMa) e quad-phase (Condutividade elétrica aparente - CEa), ambas obtidas nas duas profundidades.

A medida considerada para o trabalho foi CEa (quad-phase) medida até 0,375 metro de profundidade. O sensor foi conduzido a uma velocidade aproximada de 15 km/h, com espaçamento de 30 metros entre passadas (Figura 4). A amostragem feita com o sensor de condutividade resultou em um conjunto denso com 12622 pontos por toda a área.

A filtragem do conjunto de dados é essencial para qualquer análise, preservando ao máximo suas características relevantes da variabilidade. Inicialmente removeram-se os pontos levantados nos carregadores e áreas de manobras. Após isso, a área foi dividida em duas, indicado pela linha em azul na figura 4, para que fossem filtradas separadamente, já que apresentavam comportamentos diferentes. O aplicativo utilizado para realizar a filtragem espacial dos dados de CEa foi o MapFilter (Maldaner, 2022).

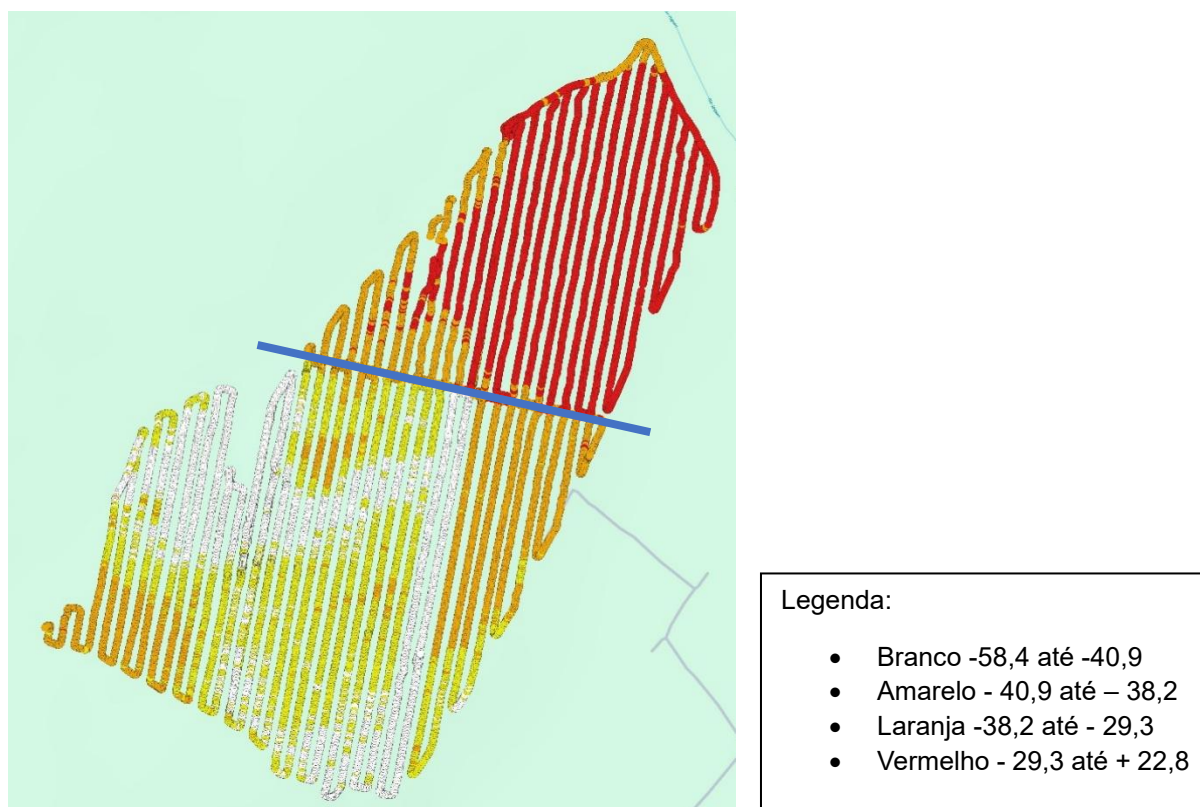


Figura 4. Pontos de condutividade elétrica aparente do solo.

Amostras de solos para mensuração de teor de argila foram coletadas na camada 0 a 20 centímetros de profundidade com o auxílio de uma broca automatizada acoplada a um quadriciclo. Cada amostra foi composta por quatro subamostras, coletadas em um raio de 4 metros do ponto de forma aleatória. No total foram coletadas 258 amostras em outubro de 2020 (Figura 5), de acordo com metodologia de grade otimizada, proposta por Pusch et al. (2023). Não foi realizada nenhuma filtragem dos dados.

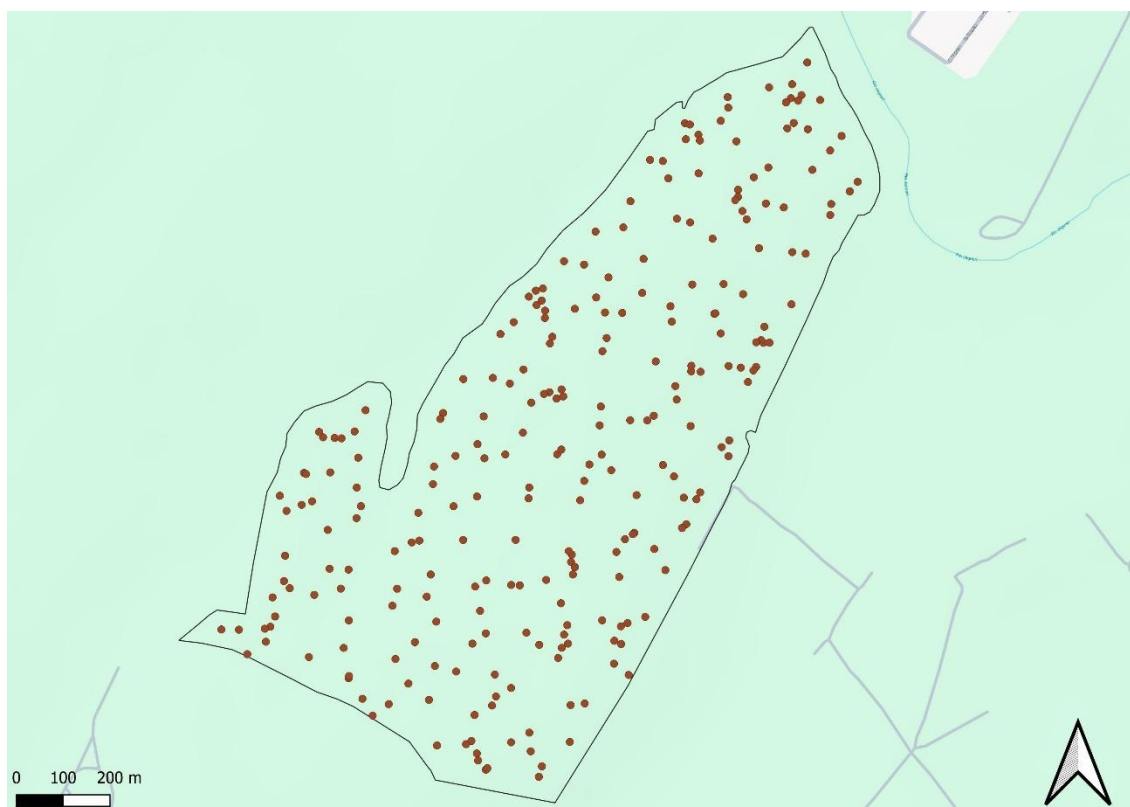


Figura 5. Pontos em marrom mostram os locais de coleta de solo.

3.3. Modelos de colocação entre CEa e argila

3.3.1. Eventos discretos

A variável CEa tratada como um evento discreto, dividindo em áreas delimitadas (zonas) a unidade produtiva, essas variando de acordo com critérios adotados e o que se busca representar da realidade. Os métodos utilizados para delimitação foram: região de influência (Buffer), zona homogênea de CEa por K-means e a divisão por talhões. Após a delimitação das zonas, essas passaram a ser representadas por valores médios dos pontos CEa que estavam inseridos em cada. Ao final, cada ponto de amostra de solo (teor de argila) sobreposto sobre a zona extraiu-se o valor. Região de influência foram construídos círculos a partir dos pontos de amostragem de solo, com os círculos tendo duas medidas de raio 15 (Figura 6) e 30 metros. Sendo o buffer de 15 metros de raio, 30 metros

de diâmetro, representando uma ou duas linhas de passada do equipamento e a região de 30 metros de raio, 60 metros de diâmetro, duas passadas.

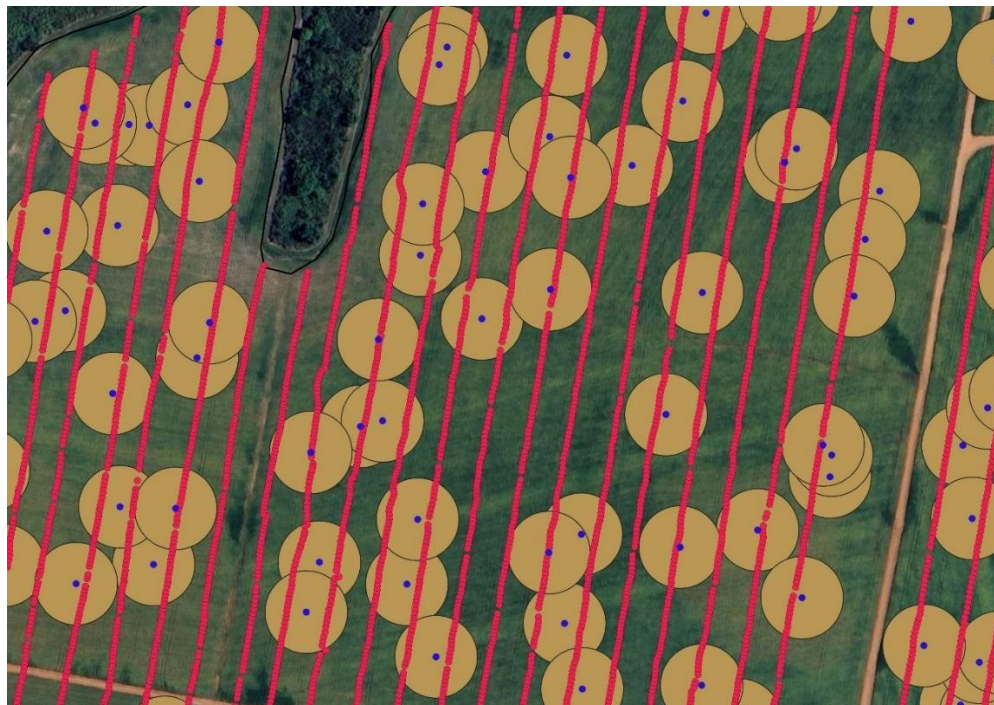


Figura 6. Pontos azuis indicam locais de amostragem de solo. Pontos vermelhos, condutividade eletromagnética aparente. Áreas circulares marrons indicam os buffers de 15 metros.

Os Buffers de 15 metros de raio que não tiveram no mínimo de 4 pontos de CEa para compor os valores de média foram excluídos (Figura 7). No total 58 amostras não compuseram os quatro pontos mínimos de condutividade, sendo excluídos para todos os modelos. Ou seja, houve uma redução de 258 pontos para ao final 200 pontos de amostragem considerados.



Figura 7. Os pontos em vermelho mostram medidas de CEa do solo, os círculos em marrom são buffers de 15 metros e na figura da esquerda os círculos amarelos são buffers que não possuem quatro pontos de CEa para compor a média.

Zona homogênea de condutividade elétrica aparente foi delimitada, utilizando o método de k-means, ao todo foram usadas três classes de agrupamentos, essas visam representar, grosseiramente, a declividade do terreno no maior comprimento da área (Figura 8).



Figura 8. Declividade da área no maior comprimento da área. Em azul as três classes declives. Imagem extraída do software Google Earth® em 20 fev. 2025.

Divisão por talhões foi demarcada a partir da própria divisão da fazenda em talhões (Figura 2), em que se extraiu a média de CEa para cada zona (Figura 9). Critério esse que poderia ser considerado uma forma de como a variabilidade é tratada em um manejo convencional por média, já que não foi adotado nenhum algoritmo de agrupamento da variável e sim, adotou-se uma divisão arbitrária no terreno.



Figura 9. Mapa da propriedade, onde em laranja estão as divisões em talhões que são utilizados pelo produtor, e em vermelho, os pontos coletados de CEa.

3.3.2. Eventos contínuos

O objetivo de representar uma variável como evento contínuo é reconstruir uma região que assuma a dimensão (z), variável esta, escalar mensurada, associada ao plano de duas dimensões, as coordenadas latitude e longitude (Ferreira, 2014). Na linguagem R, com o pacote Gstat, os interpoladores utilizados foram: inverso da distância (IDW) e krigagem, com imagem rasterizada, padronizada, de pixel 5 cm. Os pontos coletados de solo (teor de

argila) em campo foram sobrepostos sobre os mapas gerados e o valor de cada pixel de CEa foi extraído.

Os dados de CEa foram submetidos à interpolação por IDW com diferentes expoentes, a primeira (IDW), ao quadrado (IDW²) e ao cubo (IDW³), no ponderador distância:

$$IDW = \frac{z_i}{d_i} \quad IDW^2 = \frac{z_i}{d_i^2} \quad IDW^3 = \frac{z_i}{d_i^3}$$

Em que: z_i representa o ponto conhecido; d_i é o ponderador pela distância que recebe um expoente.

Os parâmetros que compõem o semivariograma da krigagem seguiram o padrão de lag de 30 metros, visto que as passadas do sensor em campo utilizou esse espaçamento. O parâmetro da distância máxima foi fixado, inicialmente, em 1000 metros, aproximadamente a metade da distância máxima entre os pontos amostrados. Após a modelagem e análise do semivariograma experimental, ajusta-se uma equação teórica para representar a variânciância, nesse caso foram testadas: esférica, exponencial e gaussiana. Os ajustes foram comparados por meio de validação cruzada. O bloco da krigagem foram definidos três por três (3X3) e seis por seis (6x6) unidades do pacote gstat, e utilizou o mesmo semivariograma teórico da krigagem universal.

3.4. Análise dos dados

Inicialmente, realizou-se a análise exploratória do conjunto de CEa à 0,375 metros e teor de argila obtendo a estatística descritiva (média, erro padrão, mediana, moda, desvio padrão, variância amostral, curtrose, assimetria, intervalo, mínimo, máximo, soma e contagem) e histograma, para ambos os conjuntos de dados. Além disso foi realizado análise geoespacial do padrão de

dispersão dos pontos, para isso calcula-se o índice de distância ao ponto vizinho mais próximo (ANN – “Average Nearest neighbor”), esse variando de 0 (agregação), 1 (aleatório) e 2,15 (dispersão máxima) (Ferreira, 2014). Os atributos CEa e teor de argila colocados foram correlacionados pelo método da correlação de Pearson (PEARSON, 1895). Tal método é indicado para avaliar a correlação entre duas variáveis de números reais, o qual se baseia no princípio da regressão linear (Ferreira, 2014). Os softwares utilizados foram a linguagem de programação R e o software livre de sistema de informação geográfica (SIG) QGIS (2024).

4. RESULTADOS

As medidas de tendência central para o atributo argila foram: média global de 400,19 g kg⁻¹, mediana de 406 g kg⁻¹ e moda de 387 g kg⁻¹. Os parâmetros de dispersão foram valor máximo e mínimo, respectivamente, 655 e 194 g kg⁻¹, amplitude de 461 g kg⁻¹, coeficiente de variação de 23,62% e desvio padrão de 94,54 g kg⁻¹. Outros parâmetros como assimetria teve valor de -0,06 e curtose -0,40. O histograma apresentou um formato unimodal, visualmente um comportamento de normalidade (Figura 10). Fato esse comprovado pela proximidade da média e da mediana, além da assimetria ficar próxima de zero, indicando comportamento normal dos dados.

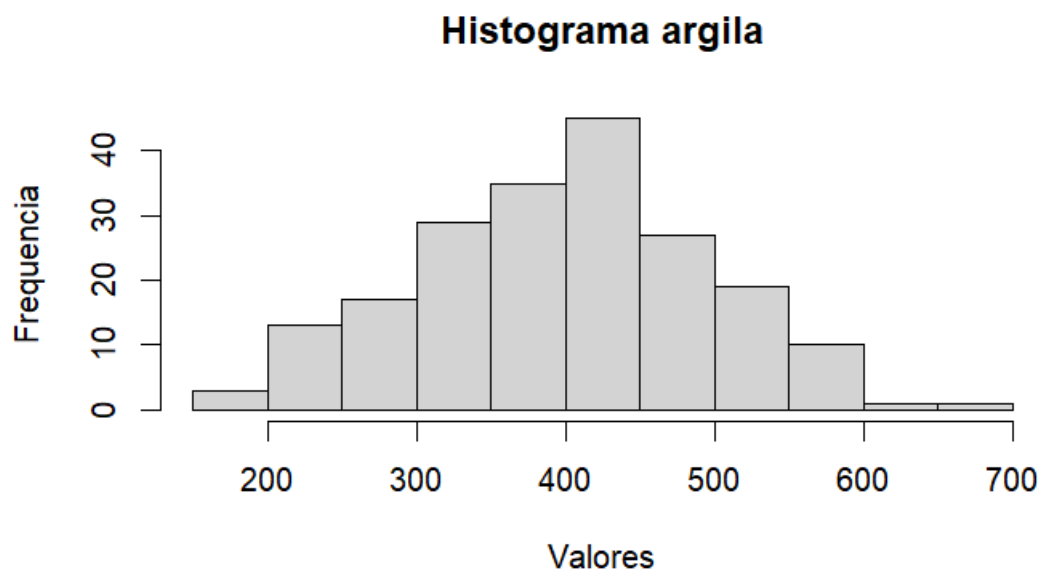


Figura 10. Histograma do atributo argila.

Na composição do mapa, os valores dos teores de argila foram classificados com o método de quartis em quatro classes (Figura 11). Os teores espacializados apresentaram valores altos nas extremidades da área, tanto na beira do rio Jaguari quanto na parte mais alta. O interior da área apresentou os valores mais baixos de argila.



Figura 11. Duzentas amostras de solos com seus respectivos valores de argila espacializados pela área.

O atributo CEa apresentou em sua distribuição uma clara divisão entre duas grandes áreas (Figura 12). A filtragem dos dados foi feita separando as áreas e, posteriormente, unindo-as com auxílio do software SIG para formar um só arquivo vetorial.

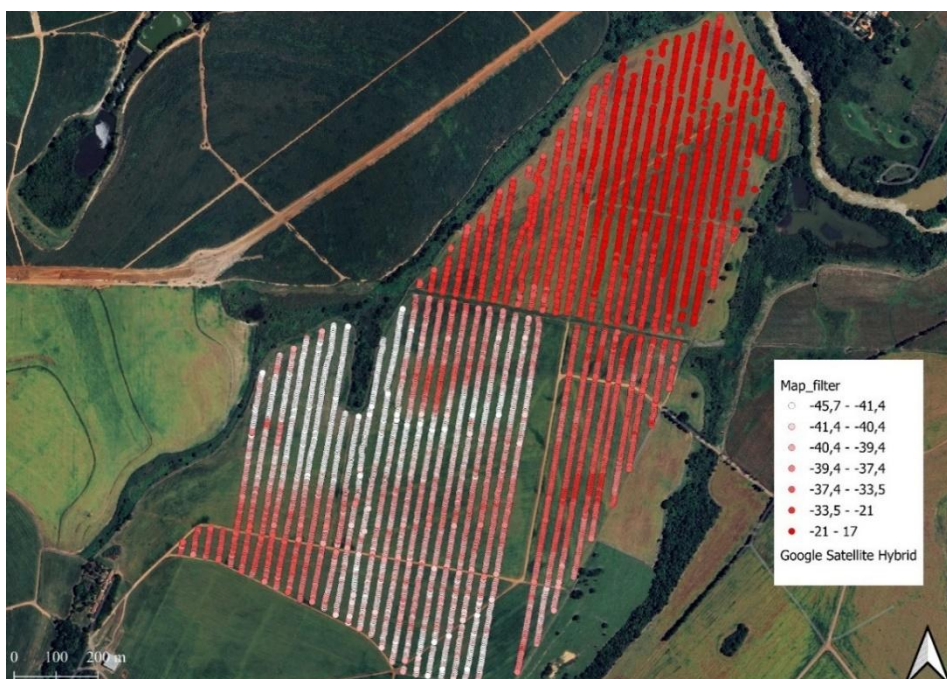


Figura 12. Espacialização dos valores de condutividade elétrica aparente classificados em 7 classes, as quais indicam uma clara divisão em duas grandes áreas.

Os valores de tendência central obtidos foram: média global $-33,73 \text{ mSm}^{-1}$, mediana $-38,59 \text{ mSm}^{-1}$ e moda de $-39,922 \text{ mSm}^{-1}$. As medidas de dispersão foram: máximo de $17,031 \text{ mSm}^{-1}$ e mínimo de $-45,664 \text{ mSm}^{-1}$ com amplitude de $62,695 \text{ mSm}^{-1}$, desvio padrão de $11,26 \text{ mSm}^{-1}$ e coeficiente de variação de $33,11\%$. Outros parâmetros foram assimetria $1,85$ e curtose $3,01$. O histograma (Figura 13) apresentou um formato unimodal, com uma assimetria positiva $1,8515$, o que comprovou a maior distorção em valores menores, negativos. Além disso, o coeficiente de Curtose mostrou uma conformação pontiaguda indicando maior concentração de amostras à esquerda, valores negativos. A estatística e a análise visual do histograma (Figura 13) mostraram a não normalidade da distribuição dos dados de CEa do solo.

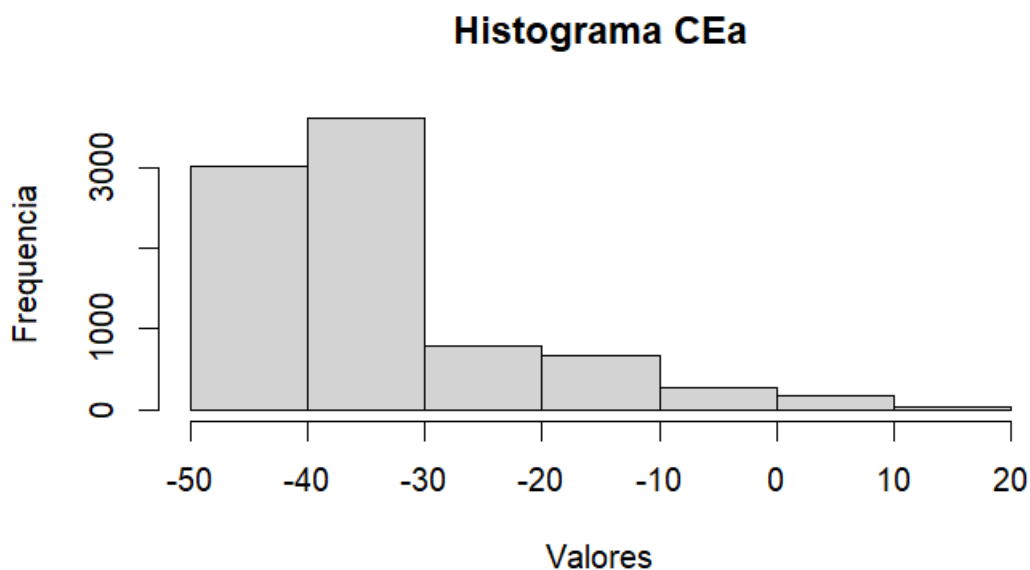


Figura 13. Histograma do atributo condutividade elétrica do solo.

No software QGIS, realizou-se a análise de ANN, a variável CEa apresentou um valor baixo, próximo a zero, de 0,41, indicando um padrão agregado de distribuição dos pontos. A dado espacial argila apresentou um índice de distância ao ponto vizinho mais próximo de 0,71, indicando um padrão de distribuição dos pontos de amostragem próximo ao aleatório (ANN igual um).

O semivariograma experimental da krigagem ordinária não demonstrou patamar claro para a variância (Figura 14). Isso pode indicar a presença de tendência nos dados (Yamamoto e Landim, 2013). Portanto, foi testado a krigagem universal de primeira ordem, de modo a modelar o efeito da tendência (Figura 15). A krigagem universal, demonstrou-se adequada para obter parâmetros utilizados na elaboração do semivariograma teórico como alcance, efeito pepita, patamar e contribuição. Ambos foram construídos com distância máxima de 1600 metros e lag de 30 metros, referente a passada do sensor em campo.

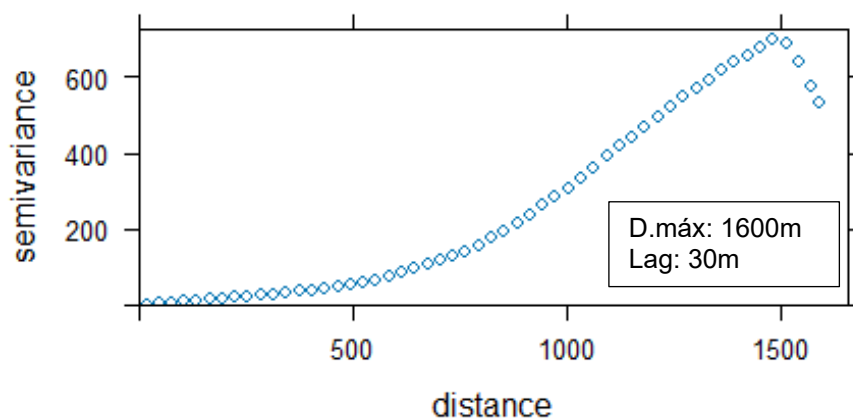


Figura 14. Semivariograma experimental, sem estabilização de um patamar claro. Semivariance é a semivariância; distance é distância máxima entre os pares de pontos.

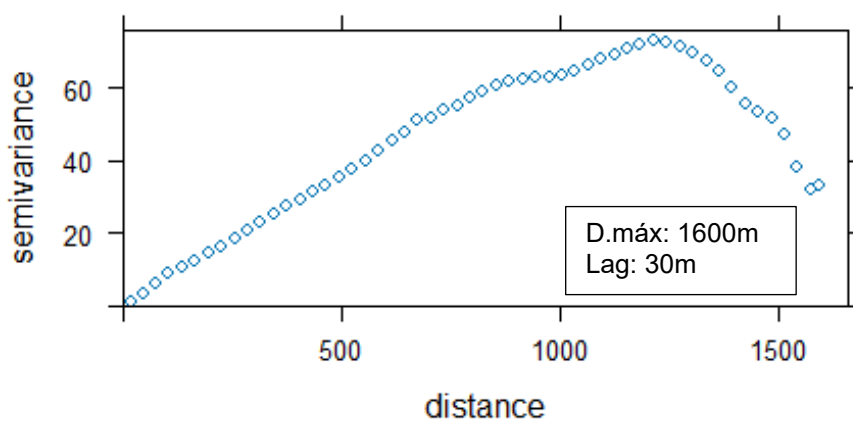


Figura 15. Semivariograma experimental modelando a tendência de primeira ordem mostrando estabilização da semivariância por volta dos 800 metros. Semivariance é a semivariância; distance é distância máxima.

Os modelos testados para a composição do semivariograma teórico foram modelo gaussiano (Figura 16), esférico (Figura 17) e exponencial (Figura 18). Os parâmetros iniciais para a formulação dos modelos foram os mesmo para os três, sendo contribuição: 50, alcance 950 metros e efeito pepita de 1.

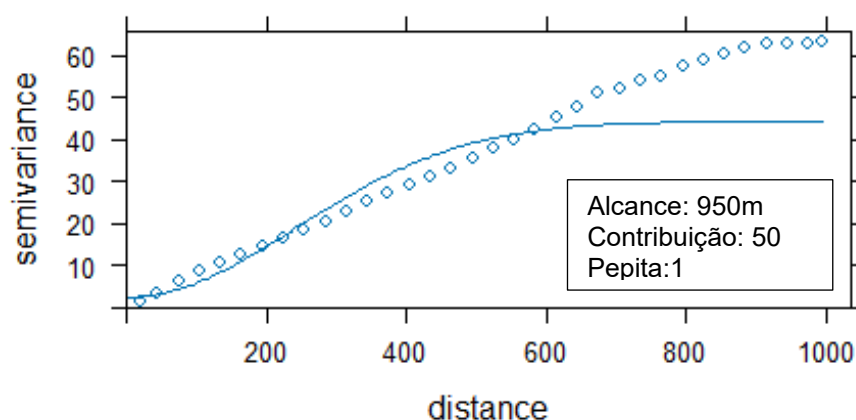


Figura 16. Semivariograma teórico gaussiano, indicado pela linha azul, e os pontos que indicam as variâncias de CEa. Semivariance é a semivariância; distance é distancia máxima.

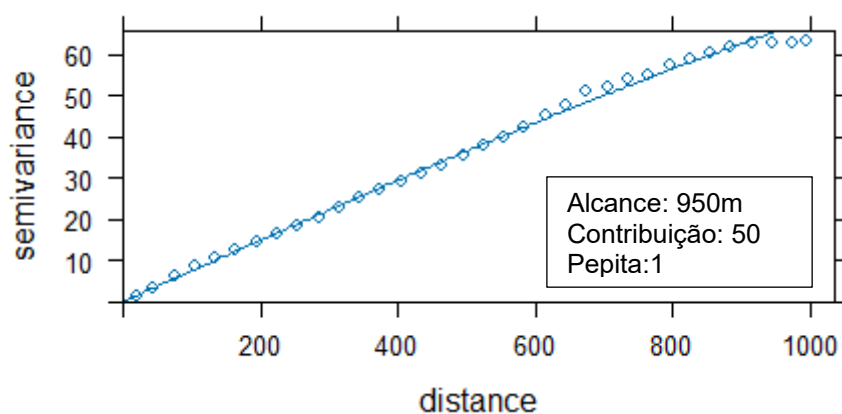


Figura 17. Semivariograma teórico esférico, indicado pela linha azul, e os pontos que indicam as variâncias de CEa. Semivariance é a semivariância; distance é distancia máxima.

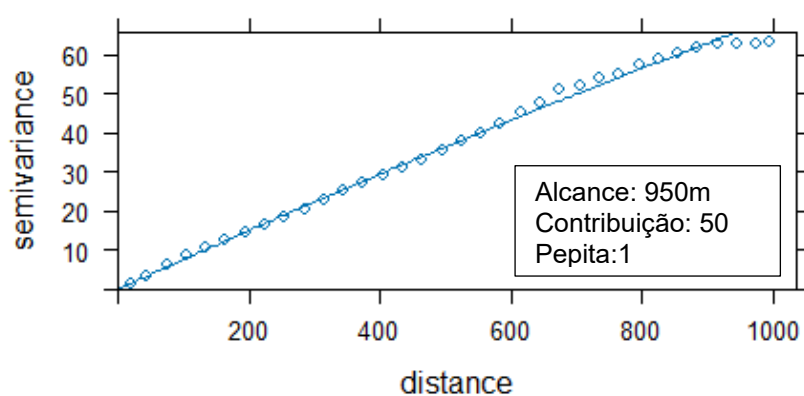


Figura 18. Semivariograma teórico exponencial, indicado pela linha azul, e os pontos que indicam as variâncias de CEa. Semivariance é a semivariância; distance é distancia máxima.

A escolha do modelo que melhor se ajusta aos dados é crucial. Para isso, foi realizada a validação cruzada, técnica que oferece como resultado

parâmetros que permitem identificar qual modelo melhor se ajusta aos dados. Os valores observados foram o slope da curva, coeficiente de determinação (R^2) e a raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Tabela 1). O modelo que apresentou melhor ajuste aos dados foi o modelo esférico, por apresentar maior R^2 de 0,997, erro menor de 0,660 e slope de 0,995. O modelo esférico foi utilizado para execução da krigagem universal e ambas as krigagens em bloco.

Tabela 1. Os valores de qualidade segundo a validação cruzada dos modelos de semivariograma teórico.

	Esférico	Exponencial	Gaussiano
R^2	0.997	0.996	0.980
RMSE	0.660	0.692	1.599
Slope	0.995	0.996	0.967

Os mapas abaixo (Figuras 19) são as representações gráficas dos modelos de interpolações de condutividade elétrica aparente do solo. Todos os

mapas foram padronizados com a mesma cartografia temática, classificados em sete classes e modo de classificação por intervalos iguais.

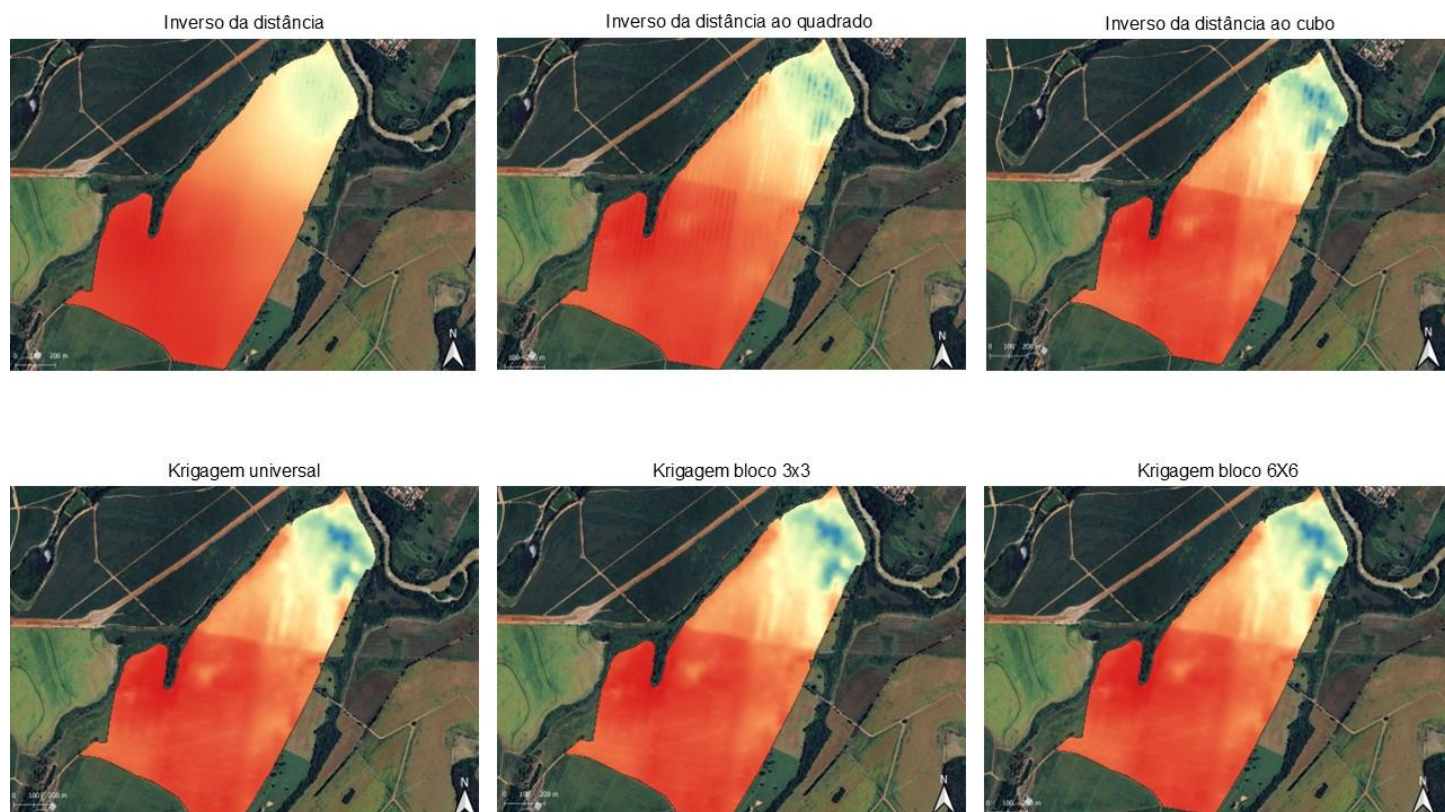


Figura 19. Mapas de interpolações, eventos contínuos, em escala de cor com valores decrescente azul representa os maiores valores, seguido das cores verde, amarela, laranja e a coloração vermelha.

As análises dos eventos discretos como buffers (15 e 30 metros), os talhões da fazenda e o agrupamento em três classes mostram o mesmo comportamento de quando analisamos de forma contínua os dados (Figura 20).



Figura 20. Mapas das áreas delimitadas, eventos discretos, coloração das áreas segue vermelho escuro valores maiores de CEa, variação de intensidade de rosa representa valores intermediários e em branco, os menores valores.

Os gráficos dispersão dos diferentes métodos de colocação foram plotados (Apêndice) com os valores de CEa e teor de argila, os padrões de distribuições apresentaram a mesma tendência, aumento da CEa acompanhado pelo teor de argila. O método com maior valor de correlação entre CEa e argila pelo método de Pearson (Tabela 2) foi o método de buffer com 30 metros de raio. O método que apresentou menor desempenho foi o método de clusterização por três classes. Além disso, a diferença entre o maior e o menor método foi de

0,057, aproximadamente 6%. A correlação apresentou, independentemente do método, uma magnitude moderada positiva (Ferreira, 2014).

	Argila
Argila	1.000
CEa_talhão	0.540
CEa_classes	0.502
IDW	0.525
IDW ²	0.552
IDW ³	0.556
Krige_1ord	0.555
Krige_Blo3	0.555
Krige_Blo6	0.555
Buffer_30m	0.559
Buffer_15m	0.557

Tabela 2. Correlações entre o valor de argila do solo e os diferentes métodos de interpolação de CEa. Sendo: CEa_talhão, divisão por talhões; CEa_classes, zona homogênea de CEa; IDW, Inverso da distância; IDW², Inverso da distância ao quadrado; IDW³, Inverso da distância ao cubo; Krige_1ord, Krigagem universal de primeira ordem; Krige_Blo3, krigagem em bloco três por três; Krige_Blo6, Krigagem em bloco seis por seis; Buffer_30m, buffer com 30 metros de raio; Buffer_15m, buffer com 15 metros de raio.

5. DISCUSSÃO

Os métodos (região de influência de 15 e 30 metros, zona homogênea, zoneamento dos talhões, inverso da distância, inverso da distância ao quadrado e ao cubo, krigagem universal, krigagem em bloco três por três e seis por seis) de colocação entre CEa e teor de argila alteram o resultado final da correlação em aproximadamente 6%, contudo não foi suficiente para alterar a classificação da correlação de moderada positiva. Ou seja, apesar da krigagem ser um método considerado superior no que diz respeito à recriação da superfície (Yamamoto e Landim, 2013), e as zonas homogêneas de três classes representarem uma degradação da variação de CEa, não foi suficiente para alterar a classificação da correlação. Isso pode ser ocasionado pelo fato de a amostragem do solo ser menos densa que a CEa, mas, ainda, ser considerada para os parâmetros de análise tradicional de solo uma amostragem densa, aproximadamente 1.94 pontos por hectare.

A variável CEa do solo tratado como evento discreto, buffers, zonas homogêneas e pelo zoneamento dos talhões, tem por objetivo de representar essas áreas definidas (Câmara, 2004; Ferreira 2014) com um valor comum a cada uma dessas. Ou seja, parte-se do pressuposto que as áreas demarcadas são homogêneas ou com alta variação entre si e podem ser representadas por apenas um valor da variável, no caso do presente trabalho a média. Diferentemente de quando tratado como um evento contínuo, krigagem universal, krigagem em bloco (três por três e seis por seis), inverso da distância, inverso da distância ao quadrado e ao cubo, que, originalmente, buscam reconstruir a variabilidade de cada espaço da área estimando esse valor

desconhecido (Câmara, 2004; Ferreira, 2014). Com ambos é possível colocar dados de diferentes posições e densidades, contudo cabe levar em conta o que cada busca representar e suas limitações oriundas dos próprios modelos.

As regiões de influência de 30 e 15 metros apresentaram, respectivamente, a maior e a segunda maior correlações entre CEa e argila (Tabela 2). Contudo, não representam toda área, apenas porções circulares, mas que essas representam fielmente o local amostrado já que possuem um raio demarcado em uma ou duas passadas do equipamento de CEa. Quando comparamos com as zonas definidas para toda área, zoneamento homogêneo de CEa e zoneamento dos talhões, o cenário é o inverso, respectivamente, menor e a segunda menor correlações, contudo se representa um valor para toda a área. A discrepância obtida entre os valores de correlação quando o processo se dá por evento discreto é devida ao problema da unidade de área modificável, ou seja, altera-se a área, alteram-se os valores e as representações (Câmara, 2004).

Os modelos que tratam o solo como evento contínuo, IDW, IDW², IDW³, krigagem universal, krigagem em bloco 3x3 e krigagem em bloco 6x6 apresentaram entre si um desempenho similar, com exceção do modelo IDW, sem expoente no ponderador, que foi destoante dos demais apresentando um valor menor de correlação. Fato esse que pode ser explicado pela interpolação IDW levar em conta apenas o peso da distância euclidiana e não havendo peso para os vizinhos mais próximos. Os demais modelos contínuos apresentaram semelhantes correlações, mas há uma diferença que deve ser conhecida entre os algoritmos interpoladores. Os algoritmos IDW são determinísticos e os

algoritmos krigagem são geoestatísticos. Ou seja, o IDW possui como característica principal a fidelidade aos valores originais dos dados, marcados pelos tradicionais círculos concêntricos presentes na interpolação, conhecidos também como “olho de boi” (Molin et al. 2015), isso principalmente com o expoente ao quadrado (Figura 19), além de não utilizar medidas de incertezas no seu cálculo (Yamamoto e Landim, 2013). O grupo dos modelos geoestatísticos leva em conta a incerteza e a quantifica, sendo um dos algoritmos a krigagem, considerada um estimador de valores não tendencioso e com mínima variância (Yamamoto e Landim 2013). A compreensão da diferença entre modelos geoestatísticos e determinísticos é importante, haja vista que ambos, são os métodos mais utilizados em estudos de ciências naturais (Li e Heap, 2011).

Os resultados mostraram grande amplitude dos valores de CEa, 62,695 mSm⁻¹, o que possivelmente pode ser explicado pelo material de origem do solo ser sedimentar e metamórfica (Rodrigues, 1996), apresentando significativa variação dos constituintes decorrentes de deposições de outros locais. Isso pode ser identificado pela falta de um patamar no semivariograma experimental da krigagem ordinária apesar da disponibilidade de dados CEa, ou seja, a dependência espacial dos pontos foi superior a distância máxima entre os pontos, pois o semivariograma é onde se mede a dependência espacial entre os valores (Yamamoto e Landim, 2013). Os solos brasileiros, de maneira geral, ao serem formados sofreram grande influência dos fatores clima, tempo e relevo (Pereira, 2019), esse último tem importância pela grande influência na dinâmica de água no terreno (Anjos, 1998). Com isso, o modelo de zona homogênea de

CEa apresentou certa capacidade de correlação com o teor de argila. A área apresentou três regiões definidas de declividade no maior comprimento da área (Figura 8), essas representadas pelas três classes do algoritmo de agrupamento. Sendo evidenciada na literatura a correlação negativa moderada entre CEa e altitude (Sanches, 2015).

O fato central é que a correlação de dados deve ser muito criteriosa para que seja informativa. Como foi evidenciado no presente trabalho, a depender da forma de colocar os dados haverá diferentes valores de correlação, isso apenas alterando método no universo matemático. Contudo, a principal diferença não está nos valores finais de correlação, e sim na representação espacial final, pois o resultado será representação contínua ou discreta em áreas. Ao se quantificar e analisar todos os processos a que os dados são submetidos e possíveis variações, os critérios utilizados devem ser sempre balizados pelo objetivo de representação da realidade pelo usuário.

6. CONCLUSÃO

A krigagem universal não demonstrou ser o método mais adequado para gerar valores significativamente correlacionados entre variáveis, sendo o método de Buffer de 30 metros aquele que gerou valores de condutividade elétrica aparente e teor de argila do solo mais bem correlacionados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANJOS, L. H., FERNANDES, M. R., PEREIRA, M. G.; FRANZMEIER, D. P. Landscape and pedogenesis of an Oxisol-Inceptisol-Ultisol sequence. In Southeastern Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, 62(6), 1651-1658. 1998.

BLANCO, T. H. M. Agtechs: uma análise do ambiente de negócio paranaense. 2019.

BOTTEGA, E. L. et al. Correlação entre a condutividade elétrica aparente e resistência à penetração em diferentes teores de água no solo. **Congresso Latino americano de Agricultura de Precision**, Córdoba, Argentina, 2022.

BRANDÃO, Z. N. et al. Variabilidade dos solos usando técnicas geoespaciais e machine learning para monitoramento nutricional e estimativa da produtividade do algodoeiro. In: BASSOI, L. H. et al. **Agricultura de precisão: um novo olhar na era digital**. São Carlos, SP: Cubo, 2024. Seção 1, p. 290 - 296.

BUCHLEITER, G.W., FARAHANI, H. Comparison of electrical conductivity measurements from two different sensing technologies. Paper No. 02-1056, ASAE, St. Joseph, Michigan, 2002.

CÂMARA, G. et al. Análise espacial e geoprocessamento. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Conceitos básicos em ciência da geoinformação. **Introdução a Ciência da Geoinformação**. São Jose dos Campos, 2001.

CASTIONI, G. A. et al. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. **Soil and Tillage Research**, v. 184, p. 301-309, 2018.

CEREDA JUNIOR, A. Inteligência Geográfica e a Transformação Digital: competências básicas na Gestão do Território alavancando oportunidades profissionais. **Revista Digital de Engenharia da APEAESP**, v. 1, n. 1, p. 1-10, 2017.

CHERUBIN, M. R. et al. Precision agriculture in Brazil: the trajectory of 25 years of scientific research. **Agriculture**, v. 12, n. 11, p. 1882, 2022.

CLARK, I. **Practical geostatistics**. London: Applied Sciences Publishers, 1979.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1- 3 SPEC. ISS., p. 11–43, 2005.

DE QUEIROZ, D. M. et al. (Ed.). **Agricultura digital**. Oficina de Textos, 2022.

EMBRAPA. **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**. Brasília, DF, 2018.

FERREIRA, M. C. **Iniciação à análise geoespacial teoria, técnicas e exemplos para geoprocessamento**. 1. Ed. – São Paulo: Editora Unesp, 2014.

FRANCISCO, E. R. Inteligência Geográfica: por que os líderes deveriam aprender Geografia? Blog Gestão, Política e Sociedade, **Jornal O Estado de S. Paulo**, 2015.

FRITZ, R.M. et al. Field comparison of two soil electrical conductivity measurement systems. **Proceedings of the Fourth International Conference on Precision Agriculture**. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, p. 1211–1217, 1999.

GAVIOLI, A. et al. Identification of management zones in precision agriculture: An evaluation of alternative cluster analysis methods. **Biosystems Engineering**, v. 181, p. 86–102, 1 maio 2019.

Geographers, A.A. Memorial. Pennsylvania. Disponível em: <https://www.aag.org/memorial/waldo-r-tobler/> . Acessado em 24/11/2024.

GEONICS. **EM38 catalog**. Ontario Geonics limited, set. 2014. Disponível em: [69012 Geophysical Instrumental booklet Sept 2014.indd](#) . Acesso em: 20/10/2024

GOOGLE, acadêmico. Agricultura de precisão. Acessado em: 24/11/2024.

HAGGETT, P.; CHORLEY, R. Network Analysis in Geography. **The Royal geographical society**, 1970.

INAMASU, R. Y. et al. Agricultura de precisão: perspectiva histórica e de constante transformação. In: BASSOI, L. H. et al. **Agricultura de precisão: um novo olhar na era digital**. São Carlos, SP: Cubo, 2024. Seção 1, p. 11 - 26.

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

ISPA. Precision Ag Definition | International Society of Precision Agriculture. Disponível em: [Precision Ag Definition | International Society of Precision Agriculture](#). Acesso em: 24/10/2024.

JOHNSON, S. **O mapa fantasma**. 2007.

KRIGE, D. G. A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, v. 52, p. 119–139, 1952.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terrae Didactica**, v. 2, n. 1, p. 19-33, 2006.

LI, C. B. Electric conductance. In: YU, T. R. Chemistry of variable charge soils. **New York: Oxford University Press**. p. 272-308. 1997.

LI, J.; HEAP, A. D. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. **Ecological Informatics**, v. 6, n. 3-4, p. 228-241, 2011.

LUCHIARI, A., Jr et al. Strategies for establishing management zones for site specific nutrient management. 2000. In: **International Conference On Precision Agriculture**, 5, 2000.

MALDANER, L. F.; MOLIN, J. P.; SPEKKEN, M. Methodology to filter out outliers in high spatial density data to improve maps reliability. **Scientia Agricola**, v. 79, n. 1, p. 1–7, 2022.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. Economic geology. **Society of Economic Geologists**, v. 58, n. 8, p. 1246–1266, 1963.

MATHERON, G. Le krigeage universel. École nationale supérieure des mines de Paris, Paris, France, 1969.

MIRANDA, J. I. Fundamentos de sistemas de informações geográficas. **Brasília: Embrapa Informação Tecnológica**, 2005.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; SILVA, J. R. M. DA. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil and Tillage Research**, v. 106, n. 2, p. 335–343, jan. 2010.

NADLER, A.; FRENKEL, H. Determination of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity measurements by the four electrode method. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, p.1216-1221, 1980.

PEETS, S.; MOUAZEN, A.M.; BLACKBURN, K.; BOYAN, K.; WIEBENSOHN, J. Methods and procedures for automatic collection and management of data acquired from on-the-go sensors with application to on-the-go soil sensors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 81, p. 104 – 112, 2012.

PEREIRA, M. G. et. al. **Formação e caracterização de solos**. 2019.

PEARSON, K. Note on regression and inheritance in the case of two parents. **Proceedings of the Royal Society of London**, JSTOR, v. 58, p. 240–242, 1895. Disponível em: [VII. Note on regression and inheritance in the case of two parents | Proceedings of the Royal Society of London](#). Acessado em: 25/11/2024.

PIRES, J. L. F. et. al. Experimentação on-farm no âmbito da agricultura de precisão. In: BASSOI, L. H. et al. **Agricultura de precisão: um novo olhar na era digital**. São Carlos, SP: Cubo, 2024. Seção 1, p. 290 - 296.

PUSCH, M. et al. Covariates in sample planning optimization for digital soil fertility mapping in agricultural areas. **Geoderma**, v. 429, p. 116252, 2023.

QGIS. **A free and open source geographic information system**. 2020. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org> . Acesso em: 25/11/2024.

RODRIGUES, J. B.; Campos Neto, M. C. Integração geológica da folha Campinas 1: 250.000 (SF. 23-YA)." **Anais** 1, p. 66- 67, 1996.

RODRIGUES, M. S.; CORÁ, J. E. Management zones using fuzzy clustering based on spatial-temporal variability of soil and corn yield. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 3, p. 470-483, 2015.

RHOADES, J.D.; CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Geospatial measurements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation. p. 197–215. In: CORWIN, D.L. Assessment of non-point source pollution in the vadose zone. **Geophysical Monogr.** P. 108. Am. Geophysical Union, Washington, DC. 1999.

ROSSEL, R. A. V.; MCBRATNEY, A. B.; MINASNY, B. (EDS.). Proximal Soil Sensing. **Springer Netherlands**, v. 1, 2010.

SANCHES, G. M. Variabilidade espacial dos atributos do solo por meio da condutividade elétrica aparente. 2015. Páginas - 123. Tese (mestrado) – FEAGRI, Campinas, 2015.

SANCHES, G. M.; MAGALHÃES, P. S. G.; FRANCO, H. C. J. Agricultura de Precisão: uma realidade para a cana-de-açúcar? Revista Canavieiros, p. 46-48, 2017. Disponível em: [AGRICULTURA DE PRECISAO UMA REALIDADE PARA A CANA-DE-ACUCAR.pdf](#). Acesso em: 06 dez. 2024.

SANCHES, G. M. et al. Potential of apparent soil electrical conductivity to describe the soil pH and improve lime application in a clayey soil. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 217–225, 2018.

SANCHES, G. M. et al. Precision production environments for sugarcane fields. **Scientia Agrícola**, v. 76, n. 1, p. 10–17, 2019.

SHEPARD, D. A Two-dimensional Interpolation Function for Irregularly-spaced Data. In: Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference. New York, NY, **USA: ACM**, 1968. p. 517–524. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1145/800186.810616>. Acessado em: 10/12/2024

SNOW, J. (1855). **On the Mode of Communication of Cholera**. London, second edition, Map 1. Disponível em: <https://bit.ly/32Az1IW> . Acessado em: 11/10/2024

SPERANZA, E. A. Mineração de dados espaciais aplicada no delineamento de unidades de gestão diferenciada em agricultura de precisão. 2017. Páginas – 244. Tese (doutorado) - UFSCAR, São Carlos, 2017.

SPERANZA, E. A. et. al. Delineamento de potenciais zonas de manejo para intervenções espacialmente diferenciadas para as culturas de algodão, soja e milho. In: BASSOI, L. H. et al. **Agricultura de precisão: um novo olhar na era digital**. São Carlos, SP: Cubo, 2024. Seção 1, p. 368 - 375.

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission. 2008.

SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R.; BOLLERO, G.A.; BULLOCK, D.G.; WIEBOLD, W. J. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. **Agronomy Journal** 95, p. 472–482, 2003.

SUDDUTH, K.A., KITCHEN, N.R., WIEBOLD, W.J., BATCHELOR, W.D., BOLLERO, G.A., BULLOCK, D.G., CLAY, D.E., PALM, H.L., PIERCE, F.J., SCHULER, R.T., THELEN, K.D. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north–central USA. **Computers and Electronics in Agriculture** 46 (1–3), p. 263–283, 2005.

TAGLIANI, F. Quatro pilares fundamentais para a Transformação Digital na América Latina. **ComputerWorld**. Publicado em março de 2016.

VALERIANO, S. Os benefícios da Inteligência Geográfica no dia a dia das organizações e pessoas. 2013.

VAZ, CMP; MARTIN NETO, L.; CRESTANA, S. **Avanços da instrumentação em ciência do solo**. 2007.

Yamamoto, J. K.; Landim, P.M.B. **Geoestatística conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

8. Apêndice

Gráficos de dispersão entre as variáveis condutividade elétrica aparente do solo e teor de argila colocadas pelos diferentes métodos.

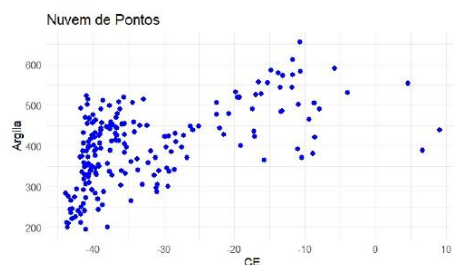


Figura 1 Buffer de 15 metros

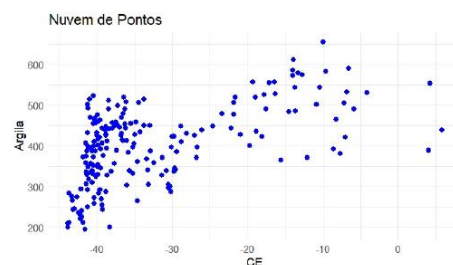


Figura 2 Buffer de 30 metros

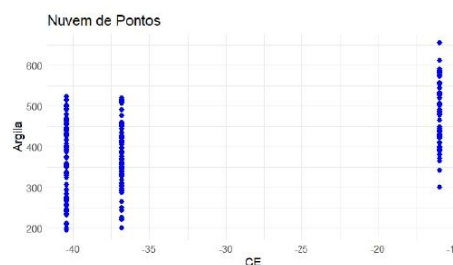


Figura 3 Zona homogênea de CEa

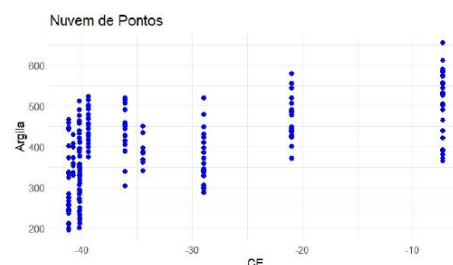


Figura 4 Zoneamento por talhões

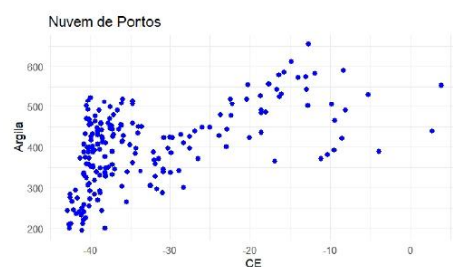


Figura 5 Inverso da distância

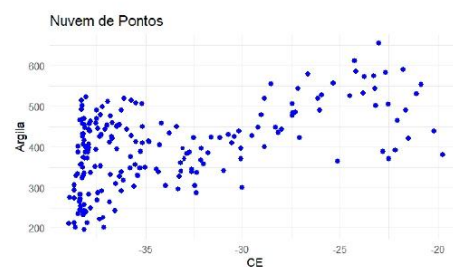


Figura 6 Inverso da distância ao quadrado

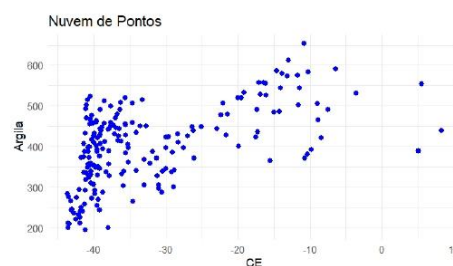


Figura 7 Inverso da distância ao cubo

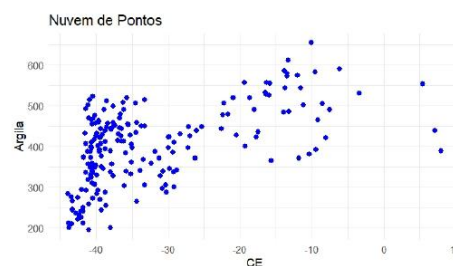


Figura 8 Krigagem universal

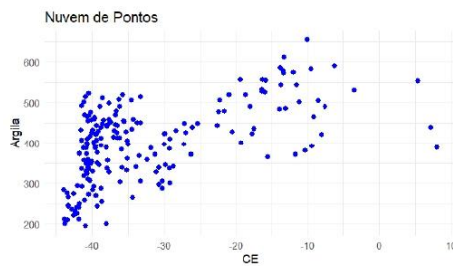


Figura 9 Krigagem em bloco 3x3

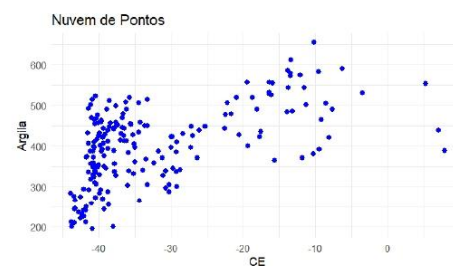


Figura 10 Krigagem em bloco 6x6