

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
COLÉGIO POLITÉCNICO DA UFSM
PPGAP – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO

Bruno Cauê Ribas de Abreu

**CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO COMO VARIÁVEL
ADICIONAL PARA A KRIGAGEM POR DERIVA EXTERNA NO MAPEAMENTO
DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO**

Santa Maria, RS
2023

Bruno Cauê Ribas de Abreu

**CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO COMO VARIÁVEL
ADICIONAL PARA A KRIGAGEM POR DERIVA EXTERNA NO MAPEAMENTO
DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO**

Dissertação apresentada ao curso
Mestrado Profissional em Agricultura de
Precisão, da Universidade Federal de
Santa Maria (UFSM, RS), como requisito
parcial para a obtenção do título de
Mestre em Agricultura de Precisão.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Gebler

Santa Maria, RS
2023

ABREU, BRUNO
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO COMO VARIÁVEL
ADICIONAL PARA A KRIGAGEM POR DERIVA EXTERNA NO
MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO /
BRUNO ABREU.- 2023.
51 p.; 30 cm

Orientador: Luciano Gebler
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Colégio Politécnico, Programa de Pós-Graduação em
Agricultura de Precisão, RS, 2023

1. condutividade elétrica aparente do solo 2.
variabilidade espacial 3. autocorrelação espacial 4.
krigagem por deriva externa 5. agricultura de precisão
I. Gebler, Luciano II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, BRUNO ABREU, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Bruno Cauê Ribas de Abreu

**CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO COMO VARIÁVEL
ADICIONAL PARA A KRIGAGEM POR DERIVA EXTERNA NO MAPEAMENTO
DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO**

Dissertação apresentada ao curso
Mestrado Profissional em Agricultura de
Precisão, da Universidade Federal de
Santa Maria (UFSM, RS), como requisito
parcial para a obtenção do título de
Mestre em Agricultura de Precisão.

Aprovado em 03 de março de 2023

**Luciano Gebler, Dr. (UFRGS)
(Presidente/Orientador)**

André Luis Vian, Dr. (UFRGS)

Eduardo Leonel Bottega, Dr. (UFV)

Santa Maria, RS
2023

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a minha família pelo apoio e incentivo durante estes dois anos de trabalho intenso, em especial à minha esposa Leoni por toda ajuda desde o primeiro dia.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria pela qualidade de ensino de excelência e gratuito, além de toda qualificação e infra-estrutura.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luciano Gebler pelo apoio técnico, compreensão, incentivo e auxílio nesta caminhada.

À Falker Automação Agrícola na pessoa do CEO Marcio Albuquerque que foi um apoiador e incentivador deste desafio, meu muito obrigado, além de outros colegas de trabalho que ajudaram direta ou indiretamente para a conclusão desta etapa.

RESUMO

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO COMO VARIÁVEL ADICIONAL PARA A KRIGAGEM POR DERIVA EXTERNA NO MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO

Autor: Bruno Cauê Ribas de Abreu

Orientador: Prof. Dr. Luciano Gebler

A medição da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) tem sido indicada pela literatura como uma ferramenta adequada para se conhecer a variabilidade espacial dos solos agrícolas de uma forma rápida e prática. Esta informação da CEa tem capacidade de orientar amostragens de solo, gerar zonas homogêneas, auxiliar em métodos de interpolação, entre outros benefícios. Esta ferramenta aliada a estatísticas multivariadas tem grande potencial de melhoramento das previsões de atributos químicos e físicos em solos agrícolas. Este trabalho foi dividido em dois artigos, o primeiro com o objetivo de realizar a comparação entre os mapas de variabilidade gerados por dois equipamentos distintos, sendo eles, CND1040 - Terram® (Falker Automação Agrícola Ltda.) e Veris® 3100 (Veris Technologies), que calculam a CEa pelo método resistivo em profundidades similares (0 - 0,3 m). O estudo foi realizado em uma lavoura de comercial de grãos de 77 hectares, localizada no município de Imbituva/PR. A comparação entre os mapas gerados foi realizada através do método de Pearson ($p < 0,05$) e pelo Índice de Moran Bivariado (Moran's II) e os resultados demonstraram alta correlação espacial independentemente do método utilizado, indicando que não há diferença significativa entre os mapas gerados e os dois sensores possuem a mesma capacidade de identificar a variabilidade do solo no local de estudo. Já o segundo artigo consistiu em utilizar o método geoestatístico da krigagem por deriva externa aplicado a elementos químicos e físicos do solo, utilizando um mapa temático da condutividade elétrica aparente (CEa) do solo como variável adicional com o objetivo de aperfeiçoar a qualidade dos mapas interpolados de tais elementos através da análise comparativa entre os resultados da validação cruzada dos elementos de forma independente, com a validação cruzada dos elementos pela deriva externa, utilizando a CEa como variável adicional. O estudo foi realizado em lavoura comercial 135 ha localizada no município de Sidrolândia, no estado do Mato Grosso do Sul, Brasil. Foi utilizado um sensor resistivo de CEa, modelo CND1040 - Terram® (Falker Automação Agrícola Ltda.) e foram coletadas 38 amostras de solo, das quais foram selecionados os atributos argila, cálcio, magnésio, matéria orgânica e CTC, para a análise comparativa. A baixa dependência espacial dos atributos de solo não permitiu a execução do método proposto neste estudo, com exceção da argila, que mesmo permitindo a modelagem variográfica, não atingiu o resultado proposto nas hipóteses de melhorar a estrutura espacial dos mapas gerados.

PALAVRAS-CHAVE: condutividade elétrica aparente do solo, correlação espacial, krigagem com deriva externa, agricultura de precisão, geoestatística, Terram, Veris.

ABSTRACT

APPARENT ELECTRICAL SOIL CONDUCTIVITY AS AN ADDITIONAL VARIABLE FOR KRIGING BY EXTERNAL DRIFT IN THE MAPPING OF SOIL CHEMICAL AND PHYSICAL ATTRIBUTES

Author: Bruno Cauê Ribas de Abreu
Advisor: Prof. Dr. Luciano Gebler

The measurement of apparent soil electrical conductivity (ECa) has been indicated in the literature as a suitable tool to understand the spatial variability of agricultural soils in a fast and practical way. This ECa information has the capacity to guide soil sampling, generate homogeneous zones, assist in interpolation methods, among other benefits. This tool, combined with multivariate statistics, has great potential for improving predictions of chemical and physical attributes in agricultural soils. This work was divided into two articles, the first aiming to compare the variability maps generated by two different equipment, namely CND1040 - Terram® (Falker Automação Agrícola Ltda.) and Veris® 3100 (Veris Technologies), which calculate ECa by the resistive method at similar depths (0 - 0.3 m). The study was conducted in a 77-hectare grain commercial farm located in Imbituva/PR, Brazil. The comparison between the generated maps was performed using Pearson's method ($p < 0.05$) and the Bivariate Moran's Index (Moran's I), and the results showed high spatial correlation regardless of the method used, indicating that there is no significant difference between the generated maps and both sensors have the same ability to identify soil variability at the study site. The second article aimed to use the geostatistical method of external drift kriging applied to chemical and physical elements of the soil, using a thematic map of (ECa) as an additional variable with the objective of improving the quality of interpolated maps of such elements through comparative analysis between the results of cross-validation of the elements independently, with cross-validation of the elements by external drift, using ECa as an additional variable. The study was conducted on a 135-hectare commercial farm located in Sidrolândia, Mato Grosso do Sul, Brazil. A resistive ECa sensor, model CND1040 - Terram® (Falker Automação Agrícola Ltda.), was used, and 38 soil samples were collected, from which the attributes clay, calcium, magnesium, organic matter, and CEC were selected for comparative analysis. The low spatial dependence of soil attributes did not allow the execution of the proposed method in this study, except for clay, which, even allowing variographic modeling, did not achieve the proposed result in improving the spatial structure of the generated maps.

KEYWORDS: apparent soil electrical conductivity, spatial correlation, external drift kriging, precision agriculture, geostatistics, Terram, Veris.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Condutividade elétrica aparente do solo (CEa).....	18
Figura 2 - Propriedades de um típico variograma com patamar.....	22
Figura 3 - Variogramas com Patamar	23
Figura 4 - Sistema de quatro pontos Smith (2).....	28
Figura 5 - Localização da área experimental (1)	30
Figura 6 - Equipamento CND1040 Terram® (Falker Automação Agrícola Ltda.).....	31
Figura 7 - Equipamento Veris® (Veris Technologies)	31
Figura 8 - Histogramas dos valores de CEa mensurados pelo Terram (a) e pelo Veris (b).....	34
Figura 9 - Semivariogramas ajustados para os dados de CEa mensurados pelo Terram (a) e pelo Veris (b)	34
Figura 10 - Gráficos de validação cruzada obtidos após ajuste dos semivariogramas para os dados de CEa mensurados pelo Terram (a) e pelo Veris (b)	35
Figura 11 - Mapas temáticos representativos da variabilidade espacial da CEa mensurada pelos equipamentos Terram (a) e Veris (b)	37
Figura 12 - Gráfico dos dados plotados pela correlação de Pearson.....	38
Figura 13 - Gráfico dos dados plotados pelo índice de Moran bivariado.....	39
Figura 14 - Localização da área experimental (2)	46
Figura 15 - Mapa CEa interpolado	48
Figura 16 - Semivariograma argila	48
Figura 17 - Krigagem Ordinária x Krigagem com Deriva Externa.....	50
Figura 18 - Variograma experimental magnésio.....	50
Figura 19 - Variograma experimental CTC.....	51
Figura 20 - Variograma experimental matéria orgânica	51
Figura 21 - Variograma experimental cálcio.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo estatístico para os dados de CEa mensurados pelos dois equipamentos.....	33
Tabela 2 - Parâmetros obtidos no ajuste dos semivaiogramas.....	35
Tabela 3 - Parâmetros obtidos para a validação cruzada	36
Tabela 4 - Validação cruzada - Argila	49
Tabela 5 - Validação cruzada - Argila KDE	49

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Resistência Elétrica.....	17
Equação 2 - Resistividade Elétrica com espaçamento "S" diferentes entre si	18
Equação 3 - Resistividade Elétrica com espaçamento "S" comum entre os eletrodos	18
Equação 4 - Condutividade Elétrica	19
Equação 5 - Função Variograma.....	21
Equação 6 - Semivariograma Modelo Esférico	23
Equação 7 - Semivariograma Modelo Exponencial.....	23
Equação 8 - Semivariograma Modelo Gaussiano	24
Equação 9 - Krigagem com Deriva Externa	25

SUMÁRIO

1. REVISÃO DE LITERATURA.....	12
1.1 AGRICULTURA DE PRECISÃO (AP).....	12
1.2 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO (CEa)	14
1.3 GEOESTATÍSTICA.....	19
2. ARTIGO Nº1.....	26
ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MAPAS DE VARIABILIDADE ESPACIAL DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO GERADOS POR DOIS EQUIPAMENTO DISTINTOS	26
2.1 INTRODUÇÃO	27
2.2 JUSTIFICATIVA.....	29
2.3 OBJETIVOS.....	30
2.4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
2.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
2.6 CONCLUSÕES	40
2.7 REFERÊNCIAS.....	41
3. ARTIGO Nº2.....	43
USO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO COMO VARIÁVEL ADICIONAL DA KRIGAGEM POR DERIVA EXTERNA OBJETIVANDO GANHO DE PRECISÃO EM MAPAS INTERPOLADOS DE ATRIBUTOS DO SOLO	43
3.1 RESUMO.....	43
3.2 JUSTIFICATIVA.....	45
3.3 HIPÓTESES	45
3.4 OBJETIVO GERAL.....	45
3.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	45
3.6 MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.7 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
3.8 CONCLUSÕES	52
3.9 REFERÊNCIAS.....	53

1. REVISÃO DE LITERATURA

1.1 AGRICULTURA DE PRECISÃO (AP)

A agricultura de precisão tem como conceito mais comum e difundido conhecer e manejar a variabilidade espacial e temporal dos atributos que tem influência direta ou indireta na produção. Assim, consiste em um conjunto de ferramentas e técnicas que, com o auxílio de informações georreferenciadas, possibilitam entender, mensurar e manejar essa variabilidade. De acordo com Inamasuet *al.* (2011):

Quando partimos da premissa de que a produção nessas lavouras não é uniforme no espaço e no tempo e de que o substrato de produção, representado pelo solo, também tem elevada variabilidade espacial, é de se considerar como fundamental o gerenciamento que incorpore esses fatores, visando à otimização do sistema.

O conceito de Agricultura de Precisão (AP), oficialmente transmitido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), define que Agricultura de Precisão é um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variação espacial e temporal da unidade produtiva e visa ao aumento de retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização do efeito ao ambiente (MAPA, 2014).

Pode-se entender a partir desta definição que um “sistema de gerenciamento” pode ser amplamente compreendido como um conjunto de diversas técnicas, práticas e diretrizes. Sendo que estas devem ter como objetivo o aumento do retorno econômico, mesmo que, em alguns casos, isso signifique aumentar o custo de produção, desde que o investimento traga a rentabilidade esperada.

Por outro lado, é possível traçar um paralelo entre a redução de custos e a minimização dos impactos ao meio ambiente, uma vez que, gerenciando a variabilidade e aplicando corretivos e fertilizantes em menor quantidade nas unidades produtivas que requerem menos aporte de insumos, o impacto ao ambiente é reduzido e, conseqüentemente, pode-se diminuir o custo de produção naquele local.

Molinet *al.* (2015) mesmo aceitando que o termo AP já está consolidado, ressaltam a importância de se contestar o termo “precisão” em definições de AP, quando abre a discussão de que:

O termo “agricultura de precisão” pode até ser contestado. A palavra “precisão” pretende se referir ao grau de aproximação da grandeza mensurada ao valor verdadeiro, porém o termo correto para tal é “exatidão”. “Precisão”, na verdade, refere-se à repetitividade na mensuração de uma dada grandeza, logo o termo apresenta uma distorção na origem. O correto seria a referência à agricultura com exatidão maior do que aquela com que já é praticada. Para se atingir maior exatidão, é necessário utilizar recursos para aumentar a resolução em todo o processo, desde o diagnóstico, com mais dados, até as intervenções, com auxílio de automação.

Quando se discute sobre os conceitos de AP e os demais assuntos que permeiam este tema, independente do foco de quem disserta sobre ele, seja mais voltado ao maquinário e à tecnologia, ou ainda para o manejo de uma forma mais gerencial e otimizada, ressalta-se sempre a investigação da variabilidade espacial em um primeiro plano. E, conforme a evolução das técnicas e manejos empregados, a variabilidade temporal também passa a fazer parte deste arcabouço, demonstrando que é um complemento fundamental para o melhor entendimento da variabilidade produtiva. Neste sentido, em uma análise sobre a variabilidade espacial da produtividade e dos atributos que a influenciam Vian *et al.* (2015) expressam que:

A variabilidade espacial ou a heterogeneidade da produtividade de grãos pode estar associada a uma série de fatores que interagem de forma complexa e condicionam a expressão da cultura. O estudo da variabilidade espacial de atributos de solo e de planta e da produtividade da cultura é fundamental para o entendimento dos fatores que determinam a expressão do potencial produtivo da cultura e sua variabilidade em uma área agrícola, o que pode levar ao desenvolvimento de práticas de manejo sítio-específicas, visando à maximização do potencial produtivo em diferentes zonas da lavoura.

O avanço da tecnologia tem sido um apoio fundamental para a evolução da pesquisa e desenvolvimento dentro da AP. A cada dia tem-se conhecimento de novas possibilidades de investigação, análise e interação com o ambiente produtivo. Um novo sensor, uma nova técnica ou até mesmo uma nova rotina de processamento de dados se apresenta como mais uma alternativa científica para um melhor entendimento da variabilidade dos atributos que influenciam a produção, sejam eles de solo, planta, clima ou ambiente.

A necessidade da investigação direcionada dos mais diversos atributos que tem importância na produção é evidenciada por Hauschild (2013 p.16) ao afirmar que:

Conhecer a variabilidade dos atributos de solo é ferramenta importante no contexto da AP. Problemas básicos de manejo, principalmente no que diz respeito aos atributos químicos do solo, já se encontram amenizados através do uso de corretivos e fertilizantes a taxa variável. Porém, ainda se observa a variabilidade de produtividade em algumas áreas, o que gera a necessidade de um estudo detalhado que considere a interação de outros atributos do solo que possam influenciar a produtividade das culturas.

1.2 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO (CEa)

Com o intuito de conhecer mais detalhadamente a variabilidade espacial do solo, além da coleta de amostras para análise química e física (que já é tradicionalmente realizada em AP), outras formas de investigação têm sido utilizadas em campo, contando com um grande volume de dados levantados por área. O que resulta em novas camadas de dados de alta densidade.

Um comparativo que pode ser feito em relação à quantidade de dados levantados em uma área é que, é possível ter centenas ou até milhares de pontos em um hectare coletados com um sensor proximal. Já em uma coleta de amostras em AP tradicional, com uma malha regular, tem-se, quando muito, um ponto por hectare, e esta diferença é que se nomeia como alta densidade.

Existem inúmeros tipos de sensores que podem realizar estas investigações mais detalhadas, podendo ser remotos ou proximais, e ainda terem como alvo de investigação o solo ou a planta. Assim como MOLIN *et al.* (2015) citam em seu capítulo sobre sensoriamento remoto que:

Uma das grandes vantagens das ferramentas de sensoriamento em AP é a capacidade de coletar, dentro de uma mesma área, uma quantidade muito maior de dados do que aquela permitida pelas técnicas tradicionais de amostragem georreferenciadas. Isso permite uma caracterização mais detalhada e, conseqüentemente, confiável da variabilidade espacial da lavoura, uma vez que os erros com estimativas e interpolações comuns em amostragens pouco densas são reduzidos.

Dentre as diversas tecnologias disponíveis para coleta de informações e caracterização de atributos de solo, a Condutividade Elétrica Aparente (CEa) tem ganhado destaque no âmbito da AP. Conforme QUEIROZ *et al.* (2021):

Foi desenvolvido no início do século XX e, por muito tempo, utilizado para identificar áreas com problemas de salinidade do solo. Com o desenvolvimento da agricultura de precisão, ele passou a ser usado com a finalidade de identificar zonas que apresentam características similares de solo.

A investigação de salinidade ou sodicidade contida em solos agrícolas também é citada como objetivo inicial do uso da informação da CEa por Rabello *et al.* 2014.

A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) originou-se na medida da salinidade do solo, problema muito pertinente em zonas áridas associadas com lavouras de agricultura irrigadas e com áreas com lençóis freáticos de baixa profundidade.

Entende-se a condutividade elétrica como a capacidade ou facilidade que um material tem de transmitir ou propagar eletricidade por si mesmo, em outras palavras:

A capacidade que um material possui em conduzir corrente elétrica, e uma das suas utilidades na agricultura provém do fato de que a massa do solo com sua variabilidade na composição físico-química apresentam diferentes níveis de condutividade elétrica. (MOLIN, RABELO, 2011, p.90).

Uma das principais características que possibilitam o uso em larga escala desta tecnologia provém do fato de serem georreferenciadas, ou seja, os sensores que coletam estes dados em campo têm conexão GNSS, e a cada valor coletado tem-se uma coordenada geográfica atrelada a ele. Molin, Amaral e Colaço (2015) destacam esta importância ao citar que:

A informação espacializada da Condutividade Elétrica do solo (CEa) tem sido apontada como uma das mais valiosas para ajudar na identificação de diferenças no solo, auxiliando no entendimento da variabilidade da produção das culturas agrícolas.

De acordo com Queiroz *et al.* (2021), a condutividade elétrica aparente está associada à facilidade com que o solo conduz a eletricidade, que, por sua vez está relacionada à interação entre os diferentes componentes físicos e químicos do solo.

Um conceito de mapeamento de fatores do solo é o monitoramento da condutividade elétrica que permite inferir sobre variáveis como textura, salinidade, teor de água, entre outros. (Faulin, 2005, p.2).

Ainda segundo Faulin (2005), o solo pode conduzir corrente elétrica através da água intersticial que contém eletrólitos dissolvidos e através dos cátions trocáveis que residem perto da superfície de partículas do solo carregadas e são eletricamente móveis em vários níveis.

Em um estudo sobre a definição de unidades de gestão diferenciadas, Molinet *al.* (2004) concluíram que é positiva a viabilidade do uso deste tipo de levantamento que, entre outros motivos, guarda uma forte correlação com a argila presente no solo. Esta, por sua vez, é o principal fator que controla a variabilidade espacial dos demais indicadores da fertilidade do solo.

Machado *et al.* (2006) destacam que a condutividade elétrica medida por sensor de contato reflete adequadamente a variação nos teores de argila do Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto, para uso na definição de zonas de manejo.

Diversos estudos têm demonstrado a importância da utilização do levantamento da CEa como uma ferramenta investigativa da variabilidade espacial dos solos e sua capacidade de direcionar ou indicar com maior eficiência a espacialização da coleta de amostras em agricultura de precisão.

Existem diferentes tecnologias e métodos para o levantamento dos valores de CEa do solo, que em termos gerais, tem sido aplicada a campo em larga escala, com o apoio de conexão GNSS para georreferenciamento dos dados coletados, possibilitando o trabalho de espacialização destas informações.

Os equipamentos que têm ganhado maior destaque neste tipo de estudo, apresentam basicamente dois princípios de funcionamento distintos: a resistividade, princípio pelo qual são calculados os valores de uma corrente elétrica induzida por eletrodos em contato com o solo; e a indução eletromagnética, que por sua vez, tem a corrente elétrica induzida no solo através de bobinas eletromagnéticas, sem o contato direto com o solo. Existe ainda um terceiro princípio de medição que é a

Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), porém com poucos exemplares de equipamentos comerciais em atividade na agricultura.

O método de resistividade elétrica introduz uma corrente elétrica no solo através de eletrodos de corrente em sua superfície, e a diferença no potencial de fluxo de corrente é medida em eletrodos potenciais, que são colocados nas proximidades do fluxo de corrente. Esse método foi desenvolvido na segunda década de 1900 por Conrad Schlumberger na França e Frank Wenner nos Estados Unidos, para a avaliação da resistividade do solo. (Burger, 1992; Telford *et al.*, 1990, *apud* CORWIN, 2005, p.20).¹

O princípio da resistividade toma como ponto de partida a definição do cálculo da resistência elétrica em corpos de prova com dimensões conhecidas entre comprimento e seção transversal. Multiplicando a resistividade por uma razão entre o comprimento da amostra e sua seção transversal, chegamos ao valor da resistência elétrica, conforme ilustra a equação 1:

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right)$$

Equação 1 - Resistência Elétrica

Onde:

R é a resistência elétrica em (Ω ohms)

ρ é a resistividade elétrica ($\Omega \cdot \text{cm}$ ohms.cm)

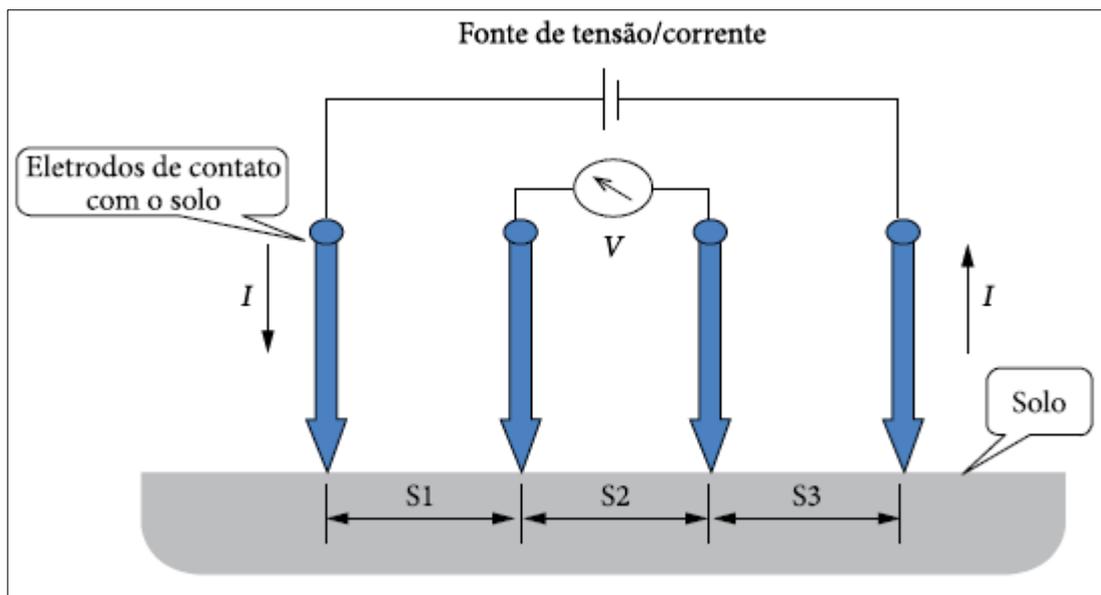
L é o comprimento da amostra (cm)

A é a seção transversal (cm^2)

Para amostras de formas e dimensões não definidas, utiliza-se o método conhecido como *sistema de quatro pontos*, muito utilizado em geofísica. Consiste em utilizar quatro eletrodos de metal alinhados sequencialmente com espaçamentos conhecidos (Smtis, 1958, *apud* Rabello *et al.*, 2009).

¹ Tradução livre

Figura 1 - Condutividade elétrica aparente do solo (CEa)



Fonte: Agricultura de precisão: um novo olhar. 2011. p. 50

A corrente elétrica I (Ampère) é injetada nos eletrodos externos e a tensão V (Volts) é lida nos dois eletrodos centrais. A resistividade é então calculada com a equação 2: (Smitis, 1958, *apud* Rabello *et al.*, 2009).

$$\rho = \left\{ \frac{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{V}{I}\right)}{\left(\frac{1}{S_1}\right) + \left(\frac{1}{S_2}\right) - \left(\frac{1}{S_1+S_2}\right) - \left(\frac{1}{S_2+S_3}\right)} \right\}$$

Equação 2 - Resistividade Elétrica com espaçamento "S" diferentes entre si

Nos casos em que o espaçamento "S" é comum a todos os eletrodos, a sentença pode ser reduzida a fatores sem a compensação de distância variável, que de forma simplificada, com "S1=S2=S3", resulta em:

$$\rho = \left\{ 2 \cdot \pi \cdot S \cdot \left(\frac{V}{I}\right) \right\}$$

Equação 3 - Resistividade Elétrica com espaçamento "S" comum entre os eletrodos

Dessa forma o cálculo da resistividade se caracteriza por uma função entre a multiplicação do espaçamento dos eletrodos por uma constante (2π), e também, pela razão entre a tensão e a corrente medidas pelo sistema neste arranjo acima citado.

A condutividade é conhecida como sendo o inverso da resistividade, isso em outras palavras pode ser dito como: Quanto mais condutivo um solo é, como consequência, menos resistivo ele é, e o inverso é verdadeiro.

Matematicamente, para chegarmos ao valor real (aparente) da condutividade, o invertemos, dividindo seu valor por 1 (ρ), conforme a equação abaixo:

$$\sigma = \left(\frac{1}{\rho}\right)$$

Equação 4 - Condutividade Elétrica

Este valor é normalmente expresso na unidade de medida Siemens por metro (S/m), ou também, como miliSiemens por metro (mS/m), pela ordem de grandeza dos valores resultantes de medições.

As unidades de medida de acordo com Sistema Internacional (SI) correspondentes a Condutividade e a Resistividade, também podem ser expressas como sendo seu inverso, Ω ohms como inverso de Siemens (S).

1.3 GEOESTATÍSTICA

O levantamento de atributos de interesse agrônomo em campo de forma espacializada e georreferenciada nos permite, através de algum tipo de processamento, transformar estes dados em informação. Seja aplicando algum tipo de filtragem, análise visual, classificação ou estatística, é possível dar sentido a essa massa de dados proveniente de análises laboratoriais ou de sensoriamento.

A estatística clássica nos fornece valiosas ferramentas de análise de dados, como medidas de posição, dispersão, forma de distribuição, entre outras, que são essenciais para o entendimento inicial e classificação dos dados em uma análise exploratória.

A importância da utilização da estatística clássica é fundamental para uma análise de dados robusta. Molin *et al.* (2021) ressaltam que, independentemente do volume de dados e da estrutura de coleta, seja ela espacializada ou não, é necessário que:

Antes de se realizar qualquer inferência sobre os dados obtidos, é necessário realizar a sua análise descritiva e exploratória, independentemente de eles terem sido coletados de forma esparsa, como a amostragem de solo em grade, ou em grande densidade, como os dados de produtividade. Essa etapa possui duas principais finalidades: identificar erros e valores discrepantes (valores anômalos, outliers) e obter um entendimento preliminar do comportamento dos dados. (MOLIN *et al.*, 2021)

Contudo, podemos dizer que existe uma limitação técnica neste tipo de análise se o nosso objetivo é compreender a estrutura espacial destes dados. Queiroz *et al.*, (2021) exemplificam que:

Embora importantes para o processo de análise de dados, os métodos estatísticos clássicos são ineficazes para descrever a variabilidade espacial e temporal de diferentes variáveis, já que não consideram a posição no espaço e/ou no tempo das amostras de uma mesma variável. (p.37)

Neste sentido, a busca por diferentes formas de caracterização do comportamento destas variáveis deve levar em conta a sua posição no espaço e, com isso, a complexidade da análise de dados é aumentada, incorporando novos fatores de influência no arcabouço analítico destes estudos.

Tendo em vista a necessidade de se avançar na análise estatística destes atributos, a geoestatística surge como uma possibilidade viável de explicar o comportamento espacial das variáveis de solo.

As técnicas geoestatísticas podem ser utilizadas para descrever e modelizar padrões espaciais, para prever valores em locais não amostrados a partir de amostras vizinhas, para obter a incerteza associada a um valor estimado em locais não amostrados e para otimizar malhas de amostragem (ANDRIOTTI, 2004)

Landim (2006) em seu artigo “Sobre Geoestatística e mapas”, nos traz a definição do termo com um breve histórico:

Na África do Sul, o engenheiro de minas Daniel G. Krige e o estatístico H.S. Sichel, desenvolveram empiricamente uma técnica própria de estimativa para o cálculo de reservas minerais, a qual posteriormente recebeu tratamento formal por G. Matheron, no início dos anos 60 do século passado, na França com o nome Geoestatística, para o estudo das chamadas variáveis regionalizadas, ou seja, variáveis com condicionamento espacial.

Uma variável regionalizada, de acordo com Matheron (1971), pode ser expressa como uma função $f(x)$ em um ponto x do espaço, mostrando dois aspectos contraditórios: (i) um aspecto aleatório, atribuído a variações altamente irregulares e imprevisíveis de um ponto a outro, e; (ii) um aspecto estruturado, que reflete as características estruturais - continuidade - do fenômeno regionalizado.

Um fenômeno regionalizado pode ter sua variabilidade espacial quantificada, possibilitando assim ter sua continuidade espacial explicada através da função variograma, ou semivariograma, que é a comparação de valores tomados simultaneamente em dois pontos, e em uma determinada direção. De forma teórica, define-se como “a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados por uma distância h ”, e é apontado como a ferramenta mais adequada para medir a dependência espacial (YAMAMOTO, 1991); (VIEIRA, 2000).

Este modelo se constitui na curva da função de variância $\gamma(h)$ dos dados, onde h é um intervalo de distância até uma origem arbitrária. A relação matemática que define $\gamma(h)$ é apresentada na Equação adaptada de Clark (1979) citado por Ferreira (2014).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2$$

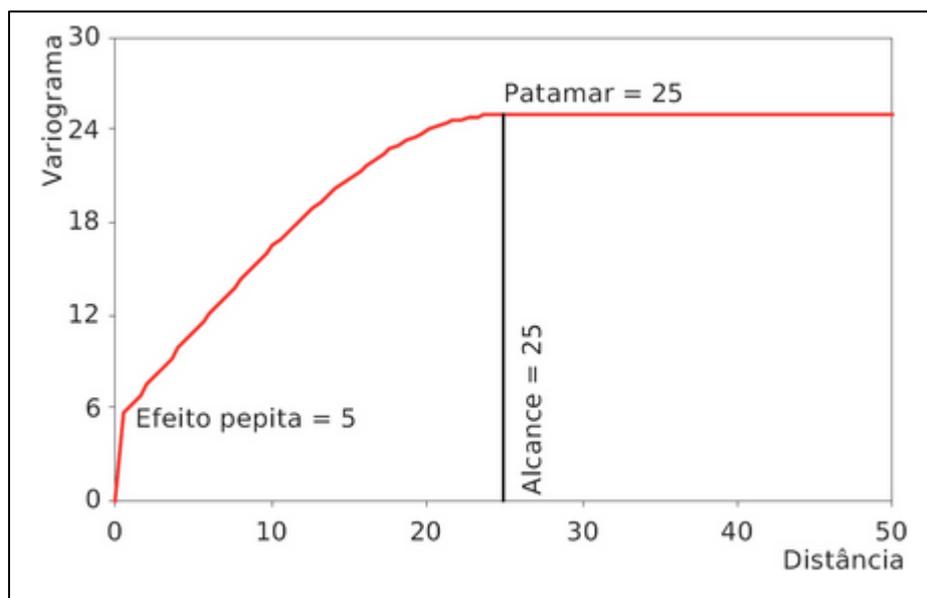
Equação 5 - Função Variograma

Onde n é o número de pares de Z comparados e Z é uma variável aleatória distribuída na superfície S que assume o valor z_i na posição x_i e z_{i+h} na posição x_i+h .

A função variograma mede a variância entre pontos separados por uma distância h . Assim, para pontos próximos, a diferença é pequena e, portanto, a

variância é pequena. Ao aumentar a distância, os valores dos pontos tornam-se mais diferentes e, conseqüentemente, a variância aumenta. Muitas vezes, a variância se estabiliza em torno de uma variância máxima, a partir de certa distância. Isso significa que, mesmo com o aumento da distância, a função variograma irá oscilar em torno da variância máxima, denominada patamar (YAMAMOTO, LANDIM 2013). Os autores ainda diferenciam os variogramas que não estabilizam em torno de uma variância máxima, como “sem patamar”.

Figura 2 - Propriedades de um típico variograma com patamar

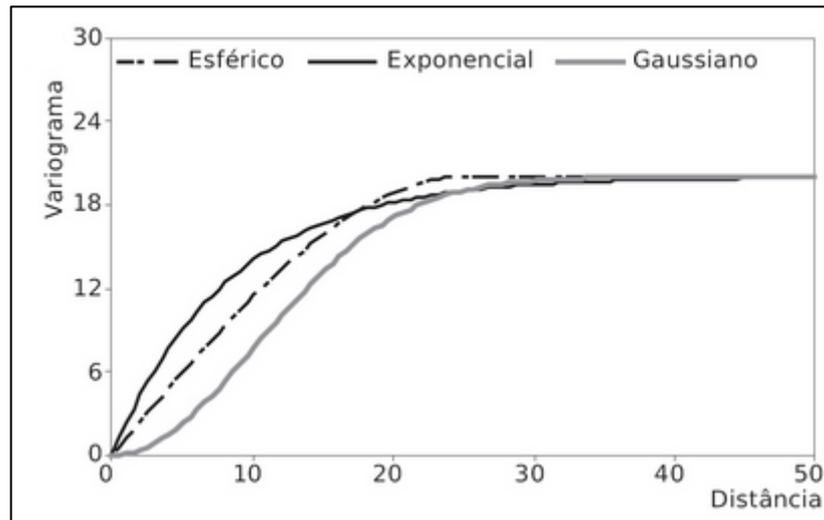


YAMAMOTO, LANDIM (2013)

A distância segundo a qual $\gamma(h)$ atinge certo nível, denominado soleira ou patamar (sill), igual à variância a priori dos dados, é chamada de alcance ou amplitude (range). Geralmente, a soleira é representada por $C_0 + C$ e o alcance, por a . O efeito pepita C_0 é causado pela variância aleatória e C é denominada variância espacial.

Dentre os modelos de variogramas com patamar, os mais utilizados para os estudos de dependência espacial de atributos de solo, com ampla aplicação em estudos de AP são: Esférico, Exponencial e Gaussiano, conforme (VIEIRA, 2000):

Figura 3 - Variogramas com Patamar



YAMAMOTO, LANDIM (2013)

O modelo esférico é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita, C_0 , e do patamar, $C_0 + C_1$, depois passando-se uma reta que intercepte o eixo y em C_0 e seja tangente aos primeiros pontos próximos de $h=0$. Essa reta cruzará o patamar à distância, $a'=2/3 a$. Assim, o alcance, a , será $a=3a'/2$. O modelo esférico é linear até aproximadamente $1/3 a$.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 < h < a$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad h > a$$

Equação 6 - Semivariograma Modelo Esférico

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3 \frac{h}{a}\right) \right] \quad 0 < h < d$$

Equação 7 - Semivariograma Modelo Exponencial

No modelo exponencial, onde d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido. Uma diferença fundamental entre o modelo exponencial e o esférico é que o exponencial atinge o patamar apenas assintoticamente,

enquanto o modelo esférico o atinge no valor do alcance. O parâmetro a é determinado visualmente como a distância após a qual o semivariograma se estabiliza. Os parâmetros C_0 e C_1 para os modelos exponencial e gaussiano (explicado a seguir) são determinados da mesma maneira que para o esférico.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3 \left(\frac{h}{a}\right)^2\right) \right] \quad 0 < h < d$$

Equação 8 - Semivariograma Modelo Gaussiano

A qualidade de ajuste pode ser verificada através da técnica de “jack-knifing”. Como para cada local têm-se um valor medido e pode-se estimar outro valor por meio da krigagem ou co-krigagem, pode-se calcular a regressão linear entre estes pares de dados e calcular a interseção (a), o coeficiente angular (b), a correlação entre os pares (r^2), o erro absoluto com sua média e variância, e o erro reduzido com sua média e variância (Vieira et al., 1983; Vieira, 1997). O melhor ajuste se obtém quando os valores obtidos se aproximam dos seguintes valores ideais: $a = 0$; $b = 1$; $r^2 = 1$; média do erro absoluto = 0; variância do erro absoluto = mínima; média do erro reduzido = 0; e variância do erro reduzido = 1 (Carvalho, Silveira, Vieira, 2002).

A krigagem é um processo geoestatístico de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço e/ou tempo, com base em valores adjacentes quando considerados interdependentes pela análise variográfica. Pode ser comparado com os métodos tradicionais de estimativa por médias ponderadas ou por médias móveis, mas a diferença fundamental é que somente a krigagem apresenta estimativas não tendenciosas e a mínima variância associada ao valor estimado (YAMAMOTO, LANDIM 2013). Contudo, este método citado tem a capacidade de analisar e explicar a variância em função das distâncias de apenas um atributo de estudo, de forma não tendenciosa e sem sofrer a influência de outras variáveis, de acordo com os mesmos autores, é classificado como um método uni variado.

O uso de covariáveis, ou seja, variáveis colocadas, que possam auxiliar nos processos de estimativas estatísticas por terem alguma similaridade entre sua variabilidade, têm sido citadas por alguns autores como uma possibilidade de

aumentar o conhecimento de atributos de difícil levantamento e, ainda, propiciar uma análise confiável com menos dispêndio de recursos.

Tendo isso como base, o presente trabalho procurou explorar o uso do método da krigagem com deriva externa, que é aplicada no caso em que a variável principal apresenta relação de dependência com a variável auxiliar externa.

Este método utiliza variáveis auxiliares para estimar um modelo de tendência. Estas devem ser conhecidas em todo o domínio onde a variável principal será estimada, ou seja, a(s) variável(eis) auxiliar(es) deve(m) ser multicolocalizada(s) (Deutsch & Journel 1998, apud Fernandes, J.A.B 2009).

As equações da krigagem com deriva externa conforme (Wackernagel, 1995, p. 191, citado por YAMAMOTO, LANDIM, 2013) são:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \lambda_j C_R (x_i - x_j) - \mu_1 - \mu_2 y (x_i) = C_R (x_i - x_o) \text{ para } i = 1, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y (x_j) = y (x_o) \end{array} \right.$$

Equação 9 - Krigagem com Deriva Externa

em que:

μ_1 e μ_2 são os multiplicadores de Lagrange associados às duas condições de restrição e;

$C_R (x_i - x_j)$ é a covariância dos resíduos entre os pontos x_i e x_j .

Grande parte da bibliografia sobre este método versa sobre aplicações em Geologia e Engenharia de Minas, com ênfase nas áreas de estudo de recursos minerais.

Sanches, Remacre e Magalhães (2014) concluíram que a krigagem com deriva externa utilizando a CEa como variável adicional conseguiu estimar, com uma amostragem reduzida e direcionada, a distribuição espacial dos atributos relacionados a fertilidade do solo e ao conteúdo de argila melhorando a representação da variabilidade espacial.

2. ARTIGO Nº1

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MAPAS DE VARIABILIDADE ESPACIAL DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO GERADOS POR DOIS EQUIPAMENTO DISTINTOS

Bruno Cauê Ribas de Abreu, Lúcio de Paula Amaral, Luciano Gebler

RESUMO

A medição da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) tem sido indicada pela literatura como uma ferramenta adequada para se conhecer a variabilidade espacial dos solos agrícolas de uma forma rápida e prática. Esta informação da CEa tem capacidade de orientar amostragens de solo, gerar zonas homogêneas, auxiliar em métodos de interpolação, entre outros benefícios. O objetivo deste trabalho foi realizar a comparação entre os mapas de variabilidade gerados por dois equipamentos distintos, sendo eles, CND1040 - Terram® (Falker Automação Agrícola Ltda.) e Veris® 3100(Veris Technologies), que calculam a CEa pelo método resistivo em profundidades similares (0 - 0,3 m). O estudo foi realizado em uma lavoura de comercial de grãos de 77 hectares, localizada no município de Imbituva/PR. A comparação entre os mapas gerados foi realizada através do método de Pearson ($p < 0,05$) e pelo Índice de Moran Bivariado (Moran's II) e os resultados demonstraram alta correlação espacial independentemente do método utilizado, indicando que não há diferença significativa entre os mapas gerados e os dois sensores possuem a mesma capacidade de identificar a variabilidade do solo no local de estudo.

PALAVRAS-CHAVE

condutividade elétrica aparente do solo, variabilidade espacial, correlação espacial, agricultura de precisão, Terram, Veris.

ABSTRACT

The measurement of the apparent electrical conductivity of the soil (ECa) has been indicated by the literature as an adequate tool to know the spatial variability of agricultural soils in a quick and practical way. This information from CEa can guide soil sampling, generate homogeneous zones, assist in interpolation methods, among other benefits. The objective of this work was to compare the variability maps generated by two commercial equipment's, namely, CND1040 – Terram® (Falker Automação Agrícola Ltda.) and Veris® 3100 (Veris Technologies), which calculate the ECa by the resistive method in similar depths (0 – 0.3 m). The study was carried out in a commercial grain plantation of 77 hectares, located in the municipality of Imbituva/PR. The comparison between the generated maps was performed using the Pearson method ($p < 0.05$) and the Bivariate Moran Index (Moran's II) and the results showed a high spatial correlation regardless of the method used, indicating that there

is no significant difference between the maps. Generated maps and the two sensors have the same ability to identify soil variability in the study site.

KEY-WORDS

Soil electrical conductivity, spatial variability, spatial correlation, precision agriculture.

2.1 INTRODUÇÃO

A variabilidade espacial do solo pode ser caracterizada pela mensuração da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), que é utilizada para identificar as áreas de produção agrícola em zonas que apresentem condições similares de solo. A CEa é influenciada pelo teor de umidade do solo, textura, sais solúveis, matéria orgânica, entre outros, e apresenta variação de seus valores absolutos, porém mantém um padrão de variabilidade espacial, quando obtida em diferentes condições de umidade do solo, épocas de coletas (datas de coletas) e tipos de equipamentos (QUEIROZ, VALENTE, COELHO, 2021; BOTTEGA et al., 2022). Mapas que demonstrem a variabilidade espacial da CEa auxiliam na tomada de decisão no manejo das culturas, por ampliar o conhecimento da variabilidade dos atributos físico-químicos do solo e por apresentar boa correlação com a variabilidade de atributos de plantas, tais como vigor, biomassa e produtividade, dentre outros (SMANIOTTO et al., 2021).

A coleta de dados de CEa é geralmente um processo rápido, com grande número de pontos de leitura por unidade de área. São utilizados sensores que medem a condutividade elétrica aparente ou resistividade, bem como a capacitância ou a indutância, que são variáveis influenciadas pela composição do solo (ADAMCHUCK et al., 2004; QUEIROZ, VALENTE, COELHO, 2021). Dentre as opções de sensores comerciais para CEa, baseados no princípio da resistividade, dois equipamentos têm se destacado, o Terram®, produzido pela Falker, e o Veris®, distribuído até recentemente no Brasil pela Stara (BOTTEGA et al., 2022).

A condutividade elétrica pode ser entendida como a capacidade que um material tem de permitir que uma corrente elétrica o atravesse em direção ao corpo seguinte. Neste sentido, os solos também possuem capacidade de conduzir corrente elétrica, e esta capacidade é influenciada por diversos fatores físico-químicos em

cada condição de levantamento. A sua medida baseia-se em calcular a resistência elétrica, que é a característica de um corpo de se opor à transmissão da eletricidade através dele, impedindo ou diminuindo a condução elétrica do atributo de interesse (nesse caso o solo), a partir do arranjo de eletrodos metálicos com distâncias conhecidas, submetidos a uma diferença de potencial por uma extremidade, e analisando a corrente elétrica recebida nos leitores centrais.

A resistência elétrica é então calculada pela Equação 1:

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right) (1)$$

Onde:

R = resistência elétrica [Ω];

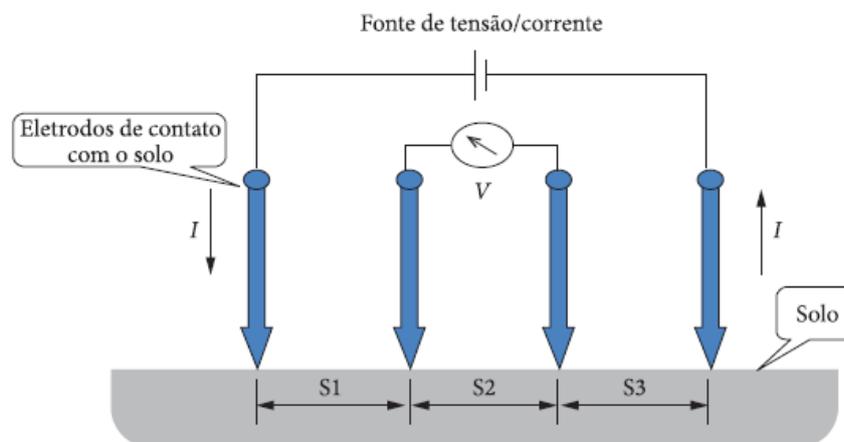
ρ = resistividade elétrica [$\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$];

L = comprimento da amostra [cm];

A = área de secção transversal da amostra [cm^2];

Para amostras de formas e dimensões não definidas, utiliza-se o método conhecido como **Sistema de Quatro Pontos (SMTIS, 1958)** que consiste em usar eletrodos de metal alinhados sequencialmente com espaçamentos conhecidos. Na Figura 1 é representado o sistema de quatro pontos empregado na mensuração da condutividade elétrica aparente do solo.

Figura 4 - Sistema de quatro pontos Smith (2)



Fonte: Agricultura de precisão: um novo olhar. 2011. p. 50

A corrente elétrica I (A) é “injetada” nos eletrodos externos e a tensão V (volts) é lida nos dois eletrodos centrais. A resistividade então é calculada de acordo com a Equação 2:

$$\rho = \left\{ \frac{[2.\pi.\left(\frac{V}{I}\right)]}{\left(\frac{1}{S1}\right) + \left(\frac{1}{S2}\right) - \left(\frac{1}{[S1+S2]}\right) - \left(\frac{1}{[S2+S3]}\right)} \right\} \quad (2)$$

Em um caso específico, onde S1 = S2 = S3, a Equação 3 é empregada:

$$\rho = \left\{ 2.\pi.S.\left(\frac{V}{I}\right) \right\} (3)$$

A condutividade elétrica é definida como sendo o inverso da resistividade, de forma matemática, podemos calculá-la através da Equação 4:

$$\sigma = \left(\frac{1}{\rho}\right) (4)$$

Onde: σ = Condutividade Elétrica [S m⁻¹];

ρ = Resistividade Elétrica [Ω cm⁻¹];

2.2 JUSTIFICATIVA

Medidores de CEa normalmente são importados e de alto custo. Dessa forma, a análise comparativa de uma solução nacional e mais acessível com outra solução amplamente versada na literatura se faz necessária.

Hipóteses

Os dados coletados com o sensor nacional de CEa possuem a mesma qualidade técnica e confiabilidade em comparação com outro sensor importado bastante difundido na literatura.

Existe autocorrelação espacial em mapas gerados a partir dos dados dos dois sensores.

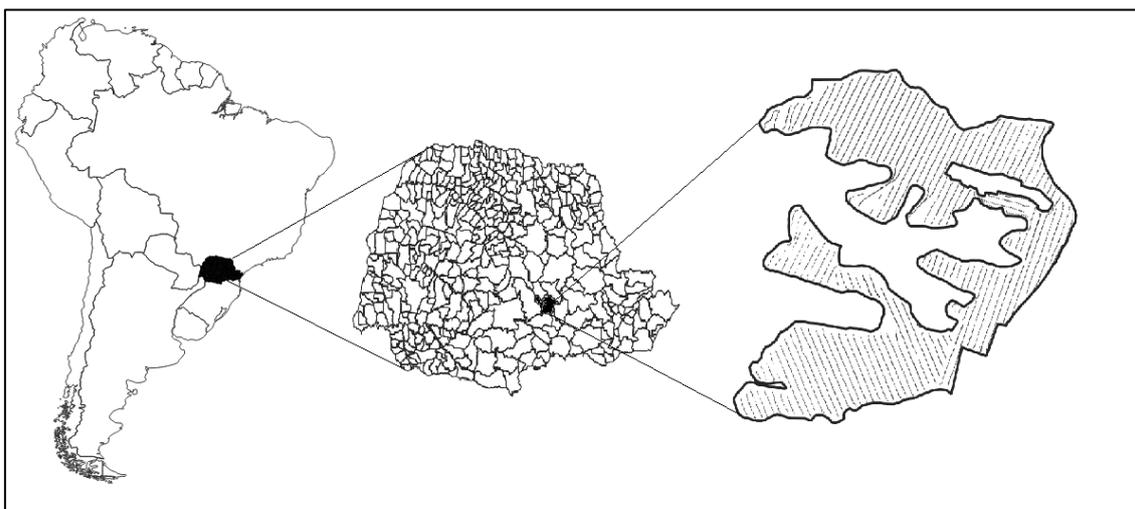
2.3 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho foi testar a similaridade entre as informações geradas pelos dois principais equipamentos de mensuração da CEa do solo pelo método resistivo disponíveis no mercado brasileiro, através da análise decorrelação dos mapas gerados.

2.4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado em lavoura comercial (104 ha) localizada em Imbituva, estado do Paraná, Brasil. Foi utilizada uma área de 77,6 ha (Figura 5), determinada em função das condições topográficas que facilitasse o trânsito dos sensores de CEa utilizados na pesquisa.

Figura 5 - Localização da área experimental (1)



Foram utilizados dois sensores que possuem o mesmo princípio de medição resistiva. São compostos por discos de corte metálicos que em contato com o solo, de acordo com seu arranjo construtivo e distância entre eles, podem realizar a medição em uma ou mais profundidades de CEa do solo. Os equipamentos são apresentados nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 - Equipamento CND1040 Terram® (Falker Automação Agrícola Ltda.)



Fonte: Agricultura de precisão: um novo olhar. 2011. p. 50

O Terram (Figura 6) é composto por quatro discos de corte metálicos igualmente espaçados em 25 cm. Os dois discos externos são caracterizados como “eletrodos de corrente”, nos quais se aplicam uma diferença de potencial. Já os dois discos internos, são considerados os eletrodos de potencial, os quais fazem a leitura da corrente elétrica propagada, de acordo com o arranjo dos eletrodos, na camada aproximada de 30 cm de profundidade.

Figura 7 - Equipamento Veris® (Veris Technologies)



Fonte: Agricultura de precisão: um novo olhar. 2011. p. 50

O Veris (Figura 7) possui um arranjo de eletrodos diferente, com a finalidade de executar a leitura dos valores em duas profundidades distintas, com os dois discos intermediários caracterizados como eletrodos de corrente e, dois discos

internos realizando a leitura dos valores na camada 0-30cm de profundidade, e os dois discos externos, realizando a leitura da profundidade de 0-90cm.

É importante ressaltar que para a análise do presente trabalho foram comparados apenas as medições de profundidades aproximadas dos 30 cm entre os dois sensores, os valores coletados pelo segundo sensor na profundidade de 0-90cm não foram utilizadas na análise estatística e de correlação neste trabalho.

A coleta de dados foi realizada conduzindo os sensores de CEa pela área de cultivo, respeitando a janela de trabalho para que os dois levantamentos fossem realizados em condições similares de solo, que estava em capacidade de campo. Não foram realizadas no mesmo dia, porém, tiveram uma diferença de aproximadamente 12 horas de tempo entre uma e outra, sem ocorrência de precipitação neste intervalo.

Não houve definição prévia de linhas paralelas de passadas com ferramentas de piloto automático, na ocasião o operador da máquina planejou a guia de deslocamento pelas linhas de cultivo, e a distância paralela entre passadas com base nos rastros de pulverizador da cultura antecessora. Para tanto, foi utilizado um trator de 90cv para conduzir os dois sensores, um de cada vez, tendo suas diferenças de posição influenciadas pela condição de tráfego e manobras específicas, e posteriormente eliminados por edição vetorial os pontos de coleta em que não coincidiam dados dos dois sensores.

Depois de realizado o trabalho de campo, os dados de ambos os sensores foram exportados em arquivo vetorial de feição pontual (*Shapefile*) e em arquivo de texto (.csv – Terram; .dat - Veris) contendo as mesmas colunas de atributos, e inseridos em uma vista no sistema de informação geográfica gvSIG, sendo utilizadas as versões 2.2.0.2313 e 2.5.1.3046. Os dados passaram por edição vetorial para remoção de pontos onde havia a leitura de apenas um sensor, para que as leituras fossem oriundas das mesmas regiões do talhão. Foi também realizada a diferença entre dois arquivos vetoriais de feição poligonal, para editar a área de estudo (limites da lavoura) e excluir uma área interna de mata, na qual não houve coleta de dados de CEa.

Também houve remoção de dados de leitura de CEa, usando a ferramenta histograma do gvSIG, sendo excluídos dados com valores negativos e dados drasticamente discrepantes (*outliers*), para que estes não interfiram no processo de

estimativa por krigagem. Ainda foram filtrados por seleção de atributos, pelo atributo “Qualidade de Contato”, que varia 0 a 100%, sendo removidas as leituras com valores $\leq 90\%$ apenas nos dados do equipamento Terram que unicamente dispunha deste atributo em seus dados exportados. No caso dos dados do sensor Terram® os pontos de manobra também foram removidos, devido à forma de contato dos discos do equipamento com o solo durante a manobra em função da mudança brusca de direção, gerando curvas acentuadas. No sensor Veris® estes pontos de manobra não são exportados com os arquivos de dados, não necessitando desta última remoção.

Após estes procedimentos, os dados foram reprojatados para coordenadas UTM, mantendo o *datum* WGS 84, foram calculadas as geometrias XY em novas colunas na planilha de atributos, sendo estas exportadas no formato de arquivo de texto (.csv), para a realização da interpolação por krigagem ordinária pontual realizada no Software GS+ v7.

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1 é apresentado o resumo estatístico descritivo dos dados de CEa mensurados pelos dois equipamentos estudados.

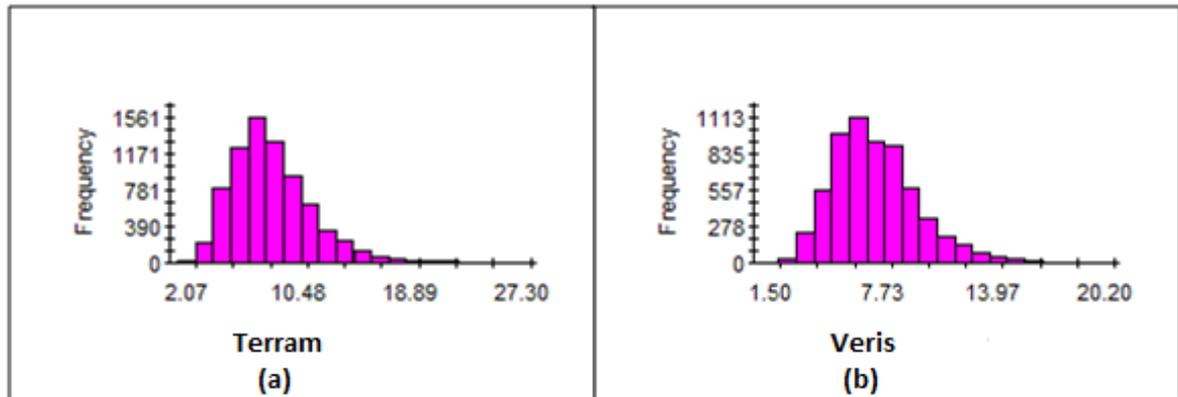
Tabela 1 - Resumo estatístico para os dados de CEa mensurados pelos dois equipamentos

Estatística Descritiva da Condutividade Elétrica por equipamento		
Dados	Terram	Veris
Média	8.46	7.43
Erro padrão	0.03	0.03
Mediana	7.99	7.00
Moda	7.35	6.50
Desvio padrão	3.05	2.56
Variância da amostra	9.32	6.58
Curtose	2.21	10.64
Assimetria	1.08	1.63
Mínimo	2.07	1.50
Máximo	31.36	42.70
Número de pontos das leituras	7797.00	6219.00
CV% (95.0%)	36.05	34.45

Inicialmente, a estatística descritiva demonstra a similaridade entre os valores de média, moda e mediana, indicando normalidade do conjunto de dados.

Na Figura 8 são apresentados os histogramas dos valores de CEa medidos pelo Terram (Fig. 8a) e pelo Veris (Fig. 8b).

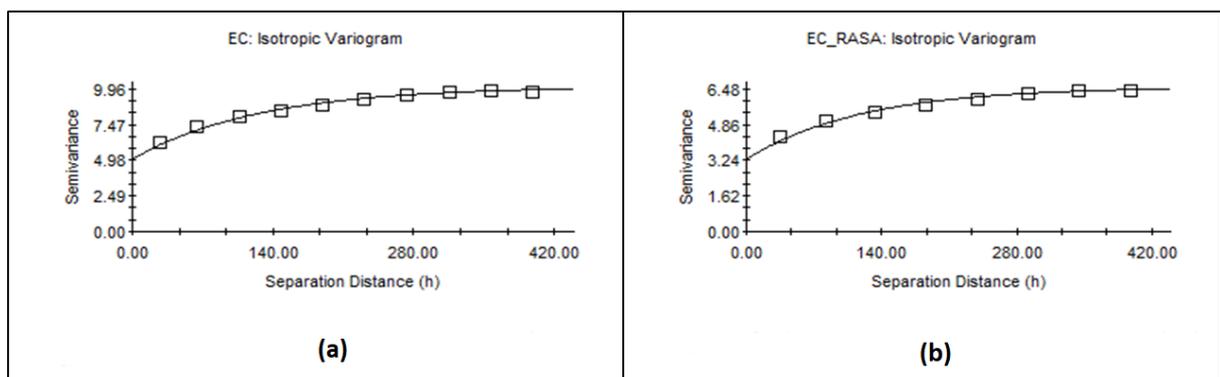
Figura 8 - Histogramas dos valores de CEa mensurados pelo Terram (a) e pelo Veris (b)



Pela análise do histograma de distribuição da frequência de ocorrência dos dados, é possível observar que os dados dos dois sensores guardam uma similaridade intrínseca entre eles, tanto nos valores absolutos do dado de condutividade coletado, quanto na leve assimetria positiva (à direita) que seus gráficos indicam.

Na Figura 9 são apresentados os semivariogramas, indicando os modelos teóricos de semivariância ajustados a variância empírica dos dados de CEa mensurados pelos dois equipamentos estudados.

Figura 9 - Semivariogramas ajustados para os dados de CEa mensurados pelo Terram (a) e pelo Veris (b)



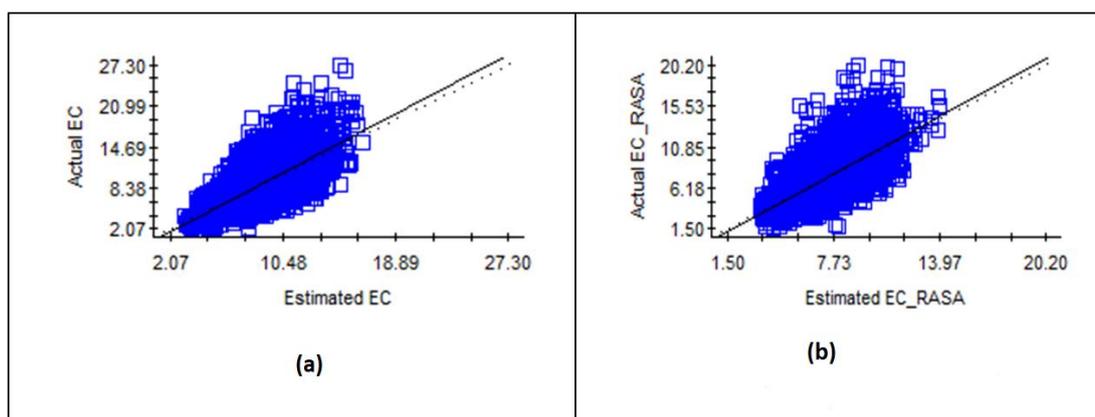
O ajuste dos semivariogramas foi realizado buscando o maior coeficiente de regressão e menor erro indicados pelo resultado da validação cruzada. Nos dois grupos de dados, dos três modelos testados (Esférico, Exponencial e Gaussiano), o modelo Exponencial foi o que obteve maior acerto entre o seu R^2 e o erro indicado pelo índice RMSE. Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros obtidos nos ajustes quando testados os modelos gaussiano, esférico e exponencial.

Tabela 2 - Parâmetros obtidos no ajuste dos semivariogramas

Ajuste dos semivariogramas						
Sensor	Modelo	Co	Co+C	Ao	rss	r^2
Terram	Gaussiano	1.01	8.992	45.37	6.2	0.524
	Esférico	0.01	8.985	52.8	6.26	0.519
	Exponencial	5.07	10.141	126	0.229	0.99
Veris	Gaussiano	0.58	5.92	56.1184	1.63	0.579
	Esférico	0.01	5.917	65.7	1.64	0.575
	Exponencial	3.29	6.581	120	0.0872	0.99

Na Figura 10 são apresentados os gráficos de validação cruzada, obtidos após a escolha do modelo e ajuste dos semivariogramas.

Figura 10 - Gráficos de validação cruzada obtidos após ajuste dos semivariogramas para os dados de CEa mensurados pelo Terram (a) e pelo Veris (b)



Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros obtidos para a validação cruzada em função dos modelos testados.

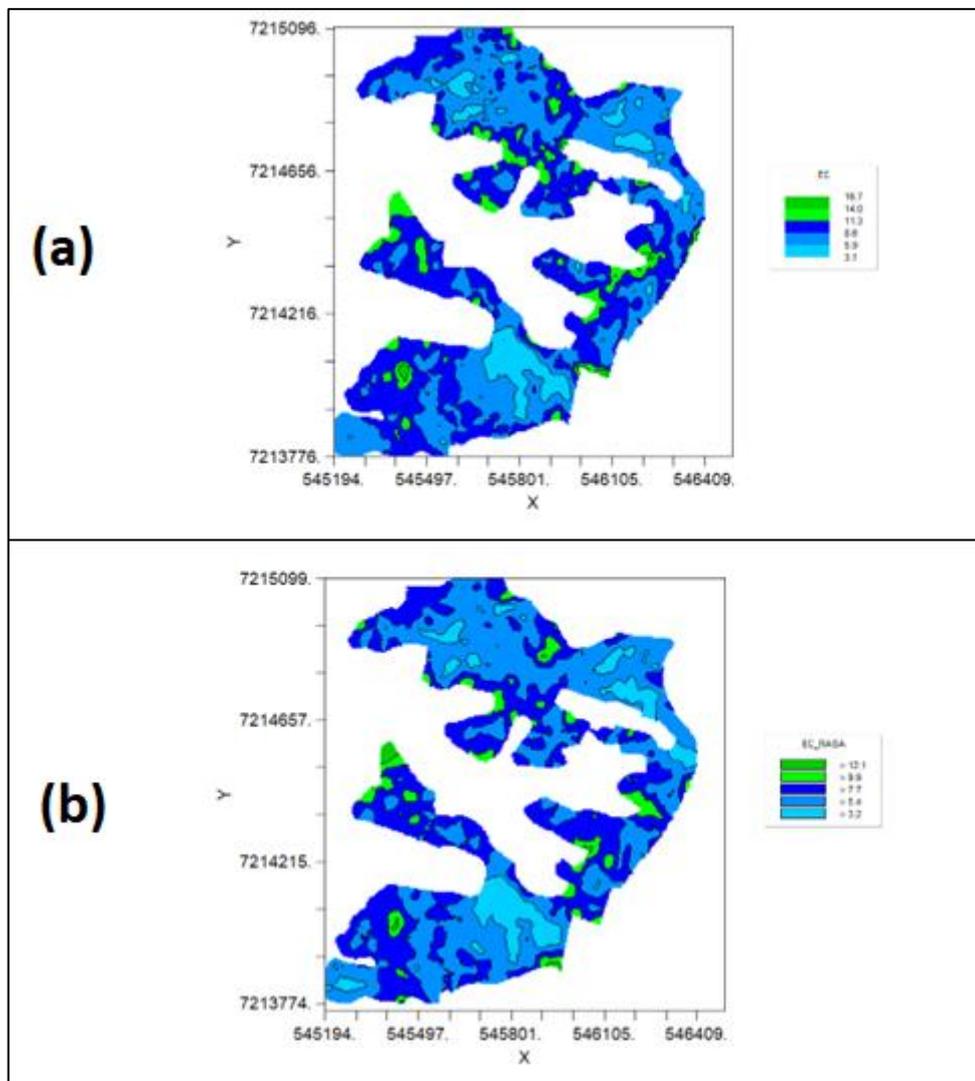
Tabela 3 - Parâmetros obtidos para a validação cruzada

Validação Cruzada						
Sensor	Modelo	Coef. Rel	SE	r ²	intercept (Y)	SE Pred.
Terram	Gaussiano	0.955	0.009	0.614	0.38	1.886
	Esférico	0.911	0.008	0.656	0.76	1.782
	Exponencial	1.08	0.012	0.52	-0.67	2.104
Veris	Gaussiano	0.905	0.011	0.503	0.7	1.736
	Esférico	0.842	0.01	0.53	1.17	1.688
	Exponencial	1.06	0.015	0.448	-0.42	1.83

Após a modelagem variográfica, foi realizada a validação cruzada, tendo valores $r^2 = 0.520$ para os dados do Sensor Terram, e $r^2 = 0.448$ para o Sensor Veris. Apesar do r^2 com o melhor ajuste para os semivariogramas de modelo exponencial, o cálculo da validação cruzada “*leave-one-out*” demonstrou que o melhor coeficiente de regressão foi atingido pelo modelo gaussiano, devido ao seu efeito pepita menor, sendo definida por este parâmetro a seleção para interpolação.

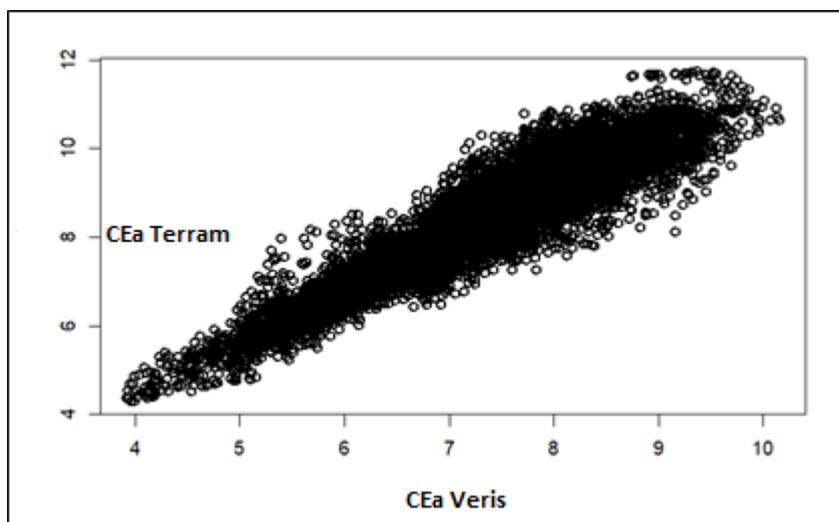
Com a modelagem realizada, os mapas interpolados de CEa do solo foram gerados pelo método da Krigagem Ordinária Pontual, com grade de interpolação de 10x10m no software GS+ v7. Os mapas são apresentados na Figura 11.

Figura 11 - Mapas temáticos representativos da variabilidade espacial da CEa mensurada pelos equipamentos Terram (a) e Veris (b)



A análise comparativa entre os resultados dos dois mapas foi realizada por dois métodos diferentes. Primeiramente, calculou-se a correlação de Pearson com $p < 0.05$ utilizando a matriz dos valores interpolados como entrada de dados em script no software RStudio utilizando a função “cor”, com resultado: *Pearson's product-moment correlation* = 0.92. Na Figura 12 é apresentado o gráfico de correlação de Pearson entre os valores de CEa mensurados pelo Terram e pelo Veris.

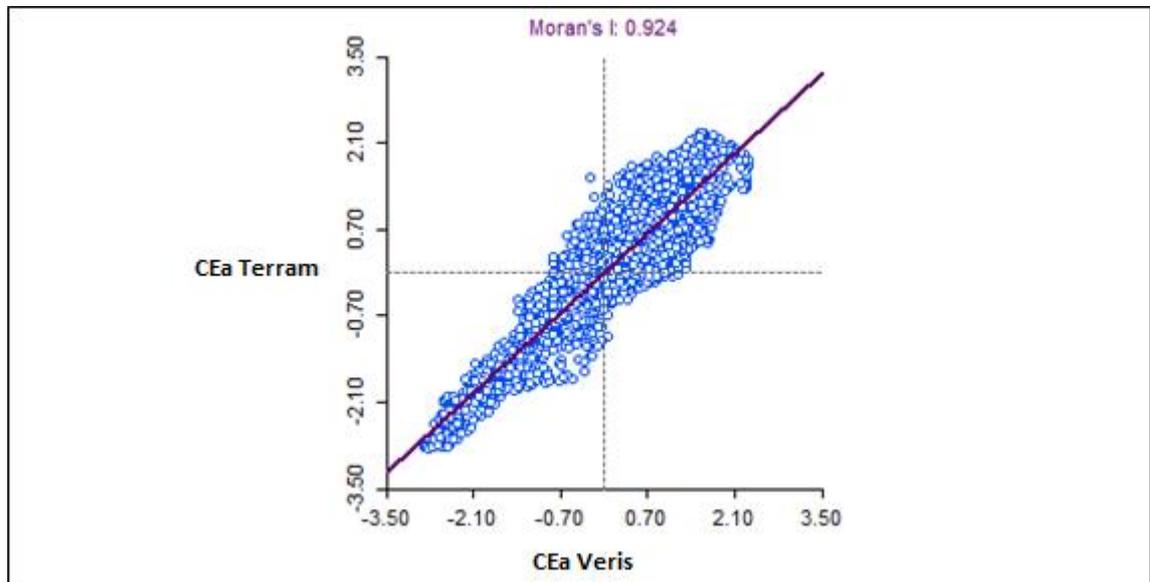
Figura 12 - Gráfico dos dados plotados pela correlação de Pearson



Além da correlação de Person, foi realizada também a análise de autocorrelação espacial bivariada de Moran (Moran's II), que teve como intuito, entender se esta correlação indicada por Pearson também é proveniente de dependência espacial. Conforme Anselin, (1995, citado por O'Sullivan; Unwin, 2010), este índice identifica a relação existente entre um determinado polígono e a sua vizinhança, a partir de uma distância predefinida, por intermédio da covariância existente entre eles.

O resultado do Índice de Moran foi de 0,924 positivo, resultado que o classifica como muito significativo, em outras palavras, com forte autocorrelação espacial positiva. Na Figura 9 é apresentado o gráfico dos dados plotados pelo Índice de Moran bivariado.

Figura 13 - Gráfico dos dados plotados pelo índice de Moran bivariado



2.6 CONCLUSÕES

Não houve diferença significativa entre os mapas gerados pelos dois sensores na área de estudo.

Não houve diferença significativa entre os testes de correlação de Pearson e de autocorrelação espacial bivariada de Moran.

Os mapas gerados pelos dois sensores tiveram autocorrelação positiva, demonstrando que ambos têm a mesma capacidade de identificar a variabilidade espacial do solo no local de estudo.

2.7 REFERÊNCIAS

- ADAMCHUCK, V. I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M. T.; UPADHYAYA, S. K. On-the-go soilsensors for precisionagriculture. **ComputersandElectronics in Agriculture**, v. 44, p. 71-91, 2004.
- BORBA, M. Z; FREDDI, O. S; TREVISAN, R. G.; EITELWEIN, M. T.; MOLIN, J. P.;**Condutividade elétrica aparente no mapeamento da textura do solo** – Congresso Brasileiro de Ciência do Solo Natal/RN 2015.
- BOTTEGA, E. L.; OLIVEIRA, Z. B.; AMADO, T. J. C.; ABREU, B. C. R. **Mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo por diferentes equipamentos**.Revista Cultura Agronômica, v. 31, n. 1, p. 12-27, 2022. DOI: 10.32929/2446-8355.2022v31n1p12-27.
- CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M.; VIEIRA, S.R. **Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos**. Pesquisa Agropecuária Brasileira,Brasília, v.37, n.8, p.1151-9, ago. 2002.
- CASTRO C. N. **Definição de unidades de gerenciamento do solo por meio da sua condutividade elétrica e variáveis físicoquímicas**,Piracicaba: Universidade de São Paulo; 2004.131p.
- PONTELLI, C. B. **Caracterização da variabilidade espacial das características químicas do solo e da produtividade das culturas, utilizando as ferramentas de agricultura de precisão**. 2006. 111 f. Dissertação - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- RABELLO, L.M. **Condutividade elétrica do solo, tópicos e equipamentos**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2009. 19 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Documentos,ISSN).
- MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; PAULETTI, V.; SCHMIDHALTER, U.; HAMMER, J. **Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.2, p.420-426, 2005.
- MOLIN, J. P.; RABELLO, L.M. **Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo**. Engenharia Agrícola, v.31, n.1, p.90-101, 2011.
- SANCHES, G. M. **O uso da condutividade elétrica aparente e krigagem com deriva externa para otimizar a amostragem de solo**. Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 2014
- SILVA, P.C.M.; CHAVES, L.H.G. **Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em alissolos**. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, Campina Grande, v.5, n.3, p.431-436, 2001.

QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M.; COELHO, A. L. F. **Sensores e atuadores**. 2021, p. 97-109. In: BORÉM, A.; QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M.; CARVALHO PINTO, F. A. Agricultura digital. 2 ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2021, 223 p.

VIEIRA, S.R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. In: NOVAIS, R.F. de; ALVAREZV.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. Tópicos em ciência do solo, Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54.

WEBSTER, R. **Issoilvariationrandom**?Geoderma, 97:149-163, 2000.

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

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia) – FCA-UNESP,Botucatu, 2001.

SMANIOTTO, A. O.; ALVES, T.; CASTROLDI, G.; MORAES, V. H.; CRUZ, S. C. S.; TEMPESTA, I. F.; BRAZ, M. G. **Importância da condutividade elétrica aparente do solo**. Informe Goiano – Circular de Pesquisa Aplicada, v. 9, n. 5, 2021, 6 p. Disponível em: <https://periodicos.ifgoiano.edu.br/index.php/informe_goiano/article/view/1311>. Acesso em: 06 out. 2022.

3. ARTIGO Nº2

USO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO COMO VARIÁVEL ADICIONAL DA KRIGAGEM POR DERIVA EXTERNA OBJETIVANDO GANHO DE PRECISÃO EM MAPAS INTERPOLADOS DE ATRIBUTOS DO SOLO

Bruno Cauê Ribas de Abreu, Luciano Gebler

3.1 RESUMO

A Agricultura de Precisão (AP) tem sido beneficiada ao longo do tempo pela utilização de novas tecnologias, que auxiliam o pesquisador do campo a levantar cada vez mais dados, e de forma mais completa e confiável. Uma destas novas tecnologias é a Condutividade Elétrica Aparente do Solo (CEa), que tem contribuído para o melhor entendimento da variabilidade espacial dos campos de produção. Esta ferramenta aliada a estatísticas multivariadas tem grande potencial de melhoramento das predições de atributos químicos e físicos em solos agrícolas. A proposta deste estudo consistiu em utilizar o método geoestatístico da krigagem por deriva externa aplicado a elementos químicos e físicos do solo, utilizando um mapa temático da condutividade elétrica aparente (CEa) do solo como variável adicional. Tem-se como objetivo aperfeiçoar a qualidade dos mapas interpolados de tais elementos através da análise comparativa entre os resultados da validação cruzada dos elementos de forma independente, com a validação cruzada dos elementos pela deriva externa, utilizando a CEa como variável adicional. O estudo foi realizado em lavoura comercial 135 ha localizada no município de Sidrolândia, no estado do Mato Grosso do Sul, Brasil. Foi utilizado um sensor resistivo de CEa, modelo CND1040 - Terram® (Falker Automação Agrícola Ltda.) e foram coletadas 38 amostras de solo, das quais foram selecionados os atributos argila, cálcio, magnésio, matéria orgânica e CTC, para a análise comparativa. A baixa dependência espacial dos atributos de solo não permitiu a execução do método proposto neste estudo, com exceção da argila, que mesmo permitindo a modelagem variográfica, não atingiu o resultado proposto nas hipóteses de melhorar a estrutura espacial dos mapas gerados.

PALAVRAS-CHAVE

condutividade elétrica do solo, resistividade elétrica do solo, geoestatística, krigagem com deriva externa.

ABSTRACT

Precision Agriculture (PA) has been benefited over time using new technologies, which help the field researcher to collect more and more data, in a more complete and reliable way. One of these new technologies is Soil Apparent Electrical Conductivity (ECa), which has contributed to a better understanding of the spatial variability of production fields. This tool, combined with multivariate statistics, has great potential for improving predictions of chemical and physical attributes in agricultural soils. The purpose of this study was to use the geostatistical method of kriging by external drift applied to chemical and physical elements of the soil using a thematic map of the apparent electrical conductivity (ECa) of the soil as an additional variable with the objective of improving the quality of the interpolated maps of such elements through comparative analysis between the results of cross-validation of elements independently, with cross-validation of elements by external drift using ECa as an additional variable. The study was carried out in a commercial field of 135 ha located in the municipality of Sidrolândia, state of Mato Grosso do Sul, Brazil. An ECa resistive sensor, model CND1040 - Terram® (Falker Automação Agrícola Ltda.) was used and 38 soil samples were collected from which clay, calcium, magnesium, organic matter and CTC attributes were selected for comparative analysis. The low spatial dependence of soil attributes did not allow the implementation of the method proposed in this study, except for clay, which even allowing variographic modeling, did not reach the proposed result in the hypotheses of improving the spatial structure of the generated maps.

KEY-WORDS

soil electrical conductivity, soil electrical resistivity, geostatistics, kriging with external drift.

3.2 JUSTIFICATIVA

Diversos estudos apontam a condutividade elétrica do solo como uma técnica de baixo custo operacional, que possui a capacidade de indicar a variabilidade espacial dos solos agrícolas.

Esta técnica, associada à geoestatística multivariada, permite melhorar as previsões dos mapas de atributos, cuja coleta de dados é dispendiosa em tempo e recursos.

Interpolações multivariadas têm uso pouco difundido dentro da AP, embora apresente grande potencial de melhorar as previsões e auxiliar no direcionamento de amostragens.

3.3 HIPÓTESES

CEa como variável adicional KDE melhora a qualidade da previsão e a estrutura espacial dos mapas de agricultura de precisão, em comparação com mapas gerados por estatística univariada.

É possível orientar de forma mais estratégica a alocação de pontos de coleta de amostras de solo, e com isso, reduzir o custo operacional de coleta e laboratorial das análises.

3.4 OBJETIVO GERAL

Promover uma melhoria na estrutura espacial de mapas interpolados de atributos químicos e físicos do solo por meio da Krigagem por deriva externa, utilizando mapas de condutividade elétrica do solo como variável adicional.

3.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Propor uma melhoria mensurável na qualidade e assertividade de mapas interpolados.

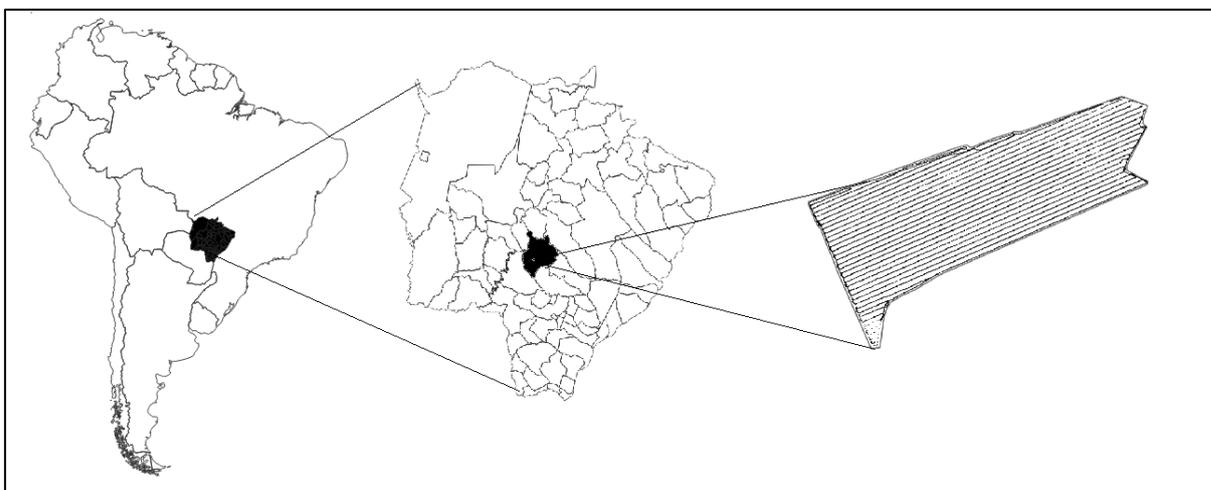
Promover o uso de mapas de condutividade elétrica do solo como melhoradores dos processos de interpolação de atributos químicos e físicos do solo.

Estimar valores de atributos químicos e físicos do solo, por meio da geoestatística com menor quantidade de amostras de solo, mantendo uma assertividade próxima a uma amostragem densa.

3.6 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado em lavoura comercial 135 ha, localizada no município de Sidrolândia, no estado do Mato Grosso do Sul, Brasil. Foi utilizado um sensor resistivo de CEa, modelo CND1040 Terram Falker tracionado por um trator de 120 cv. Foram também coletadas amostras de solo na profundidade de 0-20cm em uma malha irregular de pontos aleatórios de 38 pontos, com distâncias variáveis entre 100 e 400m uma da outra, e posteriormente, enviados para análise laboratorial.

Figura 14 - Localização da área experimental (2)



Depois de realizado o trabalho de campo, os dados de CEa foram exportados em arquivo vetorial de feição pontual (*Shapefile*), reprojutados para coordenadas UTM, mantendo o datum WGS 84 e foram calculadas as geometrias XY em novas colunas. e importados em uma novo projeto do software QGIS v3.10.10 - “A Coruña”. Os dados foram submetidos à filtragem, utilizando ferramentas de estatística descritiva, avaliando tendência central e dispersão a partir da plotagem do

histograma de frequências, executando o corte de *outliers* pela função de 3 vezes o desvio padrão.

Após a filtragem, os dados foram exportados em arquivos de texto formato “.csv” separados por vírgula, formato este que permitiu a importação dos dados pelo software RStudio v Build 576. Desta forma, foi realizada a modelagem variográfica para confecção do mapa interpolado da CEa pelo método da krigagem ordinária pontual.

Os valores de análise de solo foram submetidos a teste de normalidade, seus arquivos de localização foram reprojutados da mesma forma para coordenadas métricas e foram importados no RStudio para modelagem variográfica e interpolação.

Ainda, foi realizado um procedimento para gerar a colocação entre os pontos de amostras de solo e os dados de condutividade elétrica. Para isso, foi utilizada a ferramenta Buffer de geometria no software QGIS em um raio de 20m ao redor dos pontos de amostras gerando uma nova camada de valores médios de CEa no interseção deste buffer, e desta forma, um novo arquivo de camada unida foi gerado, com as coordenadas dos pontos, valores de análise de solo e valores de CEa nos mesmos pontos, para permitir a execução da krigagem com deriva externa.

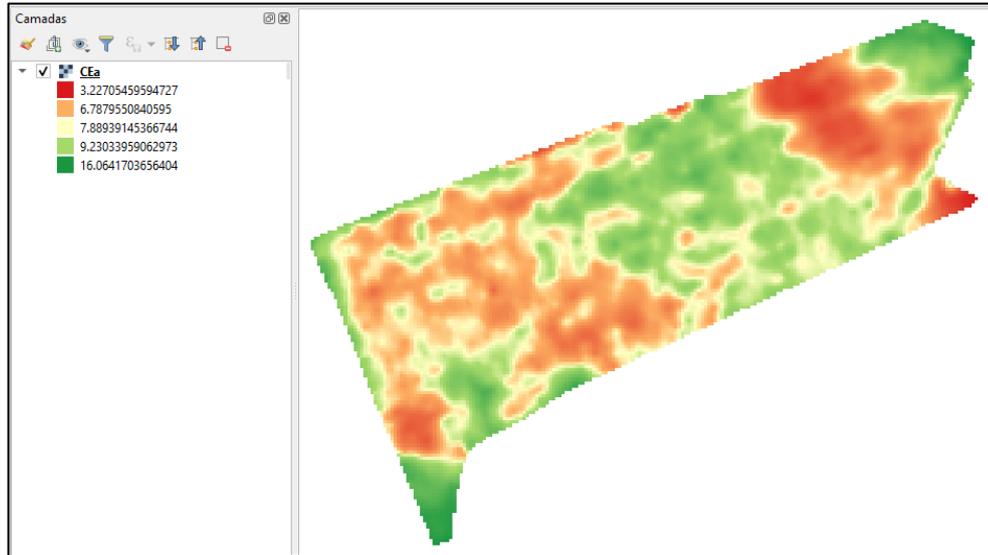
Para a execução dos testes de normalidade, plotagem de gráficos, modelagens variográficas e interpolações, foram utilizados os Pacotes “gstat”, “hydroGOF”, “rgdal”, “sp”, “raster”, “PerformanceAnalytics” e “fBasics” do software RStudio.

Para este trabalho foram selecionados para análise de correlação os atributos argila, cálcio, magnésio, matéria orgânica e CTC.

3.7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a validação cruzada dos dados de CEa, o modelo exponencial foi selecionado para o cálculo, por ter o maior coeficiente de regressão e menor erro médio.

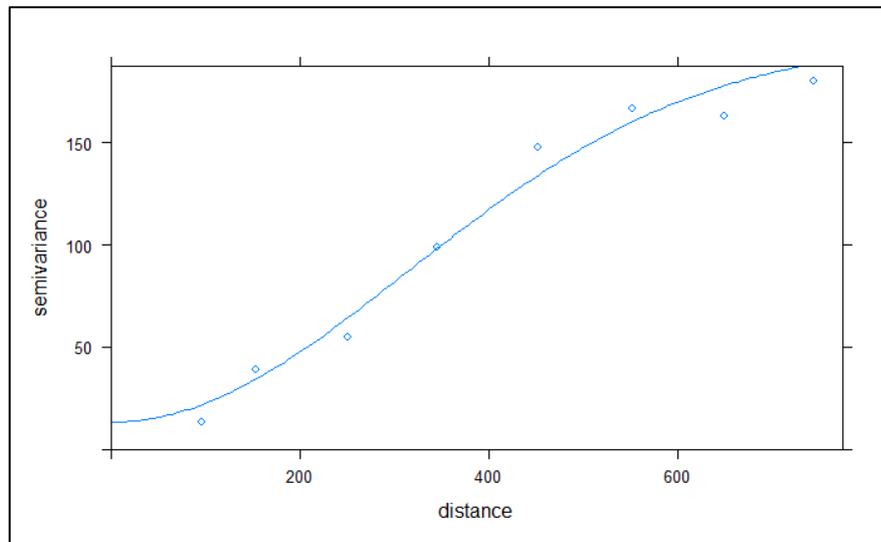
Figura 15 - Mapa CEa interpolado



Todos os atributos de análise de solo selecionados foram submetidos à modelagem variográfica e testes exaustivos de ajuste de parâmetros para os semivariogramas e, posteriormente, passarem pela validação cruzada dos 3 modelos citados anteriormente.

O atributo argila foi o único entre todos os analisados que teve uma modelagem razoavelmente boa, ajustando-se ao modelo Gaussiano:

Figura 16 - Semivariograma argila



A partir desta modelagem, o mapa de argila foi submetido à validação cruzada, e os resultados de r^2 , erro médio e inclinação da reta estão dispostos na tabela 4:

Tabela 4 - Validação cruzada - Argila

	R2	RMSE	slope
exp	0.830807	5.183853	0.791349
gau	0.831622	5.149077	0.849592
sph	0.830087	5.189437	0.794527

A análise comparativa deste trabalho baseia-se na comparação dos resultados da validação cruzada entre o atributo individualmente, e a validação cruzada do atributo calculada pela KDE, em função da influência externa da variável adicional CEa. Sendo assim, o mapa de argila foi submetido à deriva externa e os resultados da validação cruzada são apresentados na tabela 5:

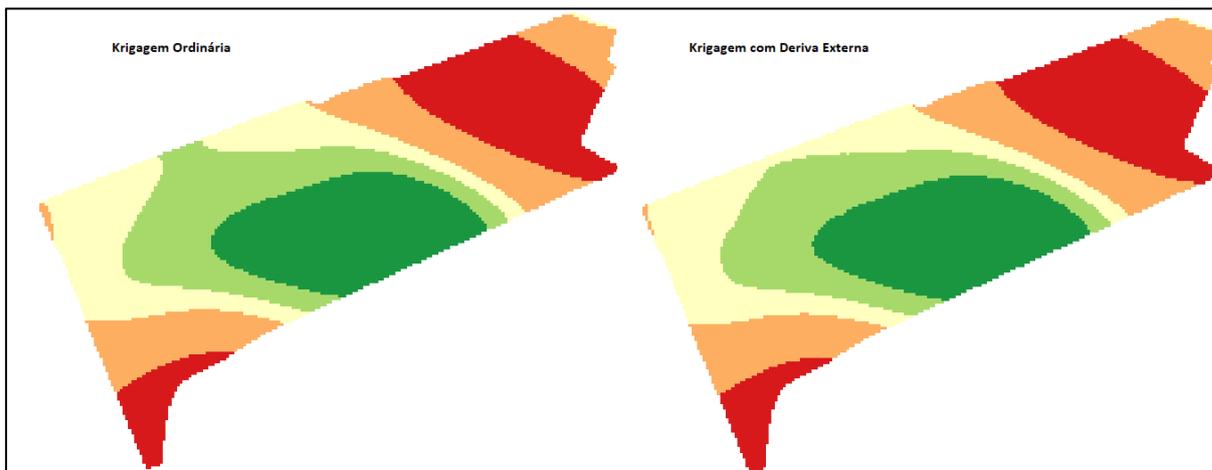
Tabela 5 - Validação cruzada - Argila KDE

	R2	RMSE	slope
exp	0.813399	5.424322	0.789558
gau	0.829192	5.187309	0.848943
sph	0.812576	5.43297	0.792919

O resultado atingido pela KDE não foi o esperado, que seria aumentar os índices que sugerem melhor estrutura espacial e menor erro associado à estimativa, ao invés disso, os valores de regressão, erro médio e inclinação da reta diminuiram, sem exceção.

Mesmo com o resultado estatístico alcançado esteja divergente de uma das hipóteses do trabalho, foram realizadas as interpolações do atributo pelos dois métodos citados, e os resultados se apresentam abaixo:

Figura 17 - Krigagem Ordinária x Krigagem com Deriva Externa



Existe uma diferença de aproximação e distanciamento das manchas classificadas por intervalo interquartilico como resultado da diferença entre os dois métodos, porém, não há uma diferença significativa de melhoria técnica neste caso.

A modelagem não teve resultado positivo para os atributos, magnésio (figura 18), CTC (figura 19), matéria orgânica (figura 20) e cálcio (figura 21), que se apresentaram com efeito pepita puro, sem nenhum ajuste aceitável, conforme indica a plotagem dos seus semivariogramas experimentais abaixo:

Figura 18 - Variograma experimental magnésio

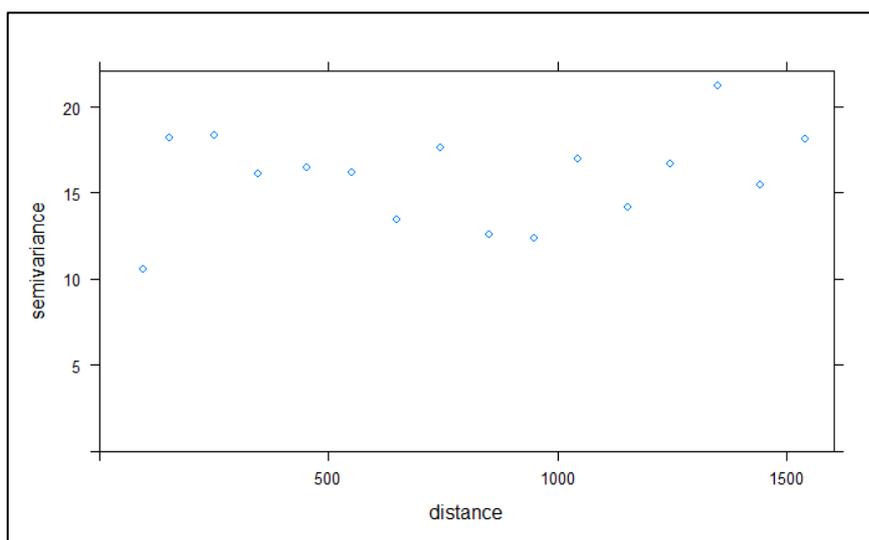


Figura 19 - Variograma experimental CTC

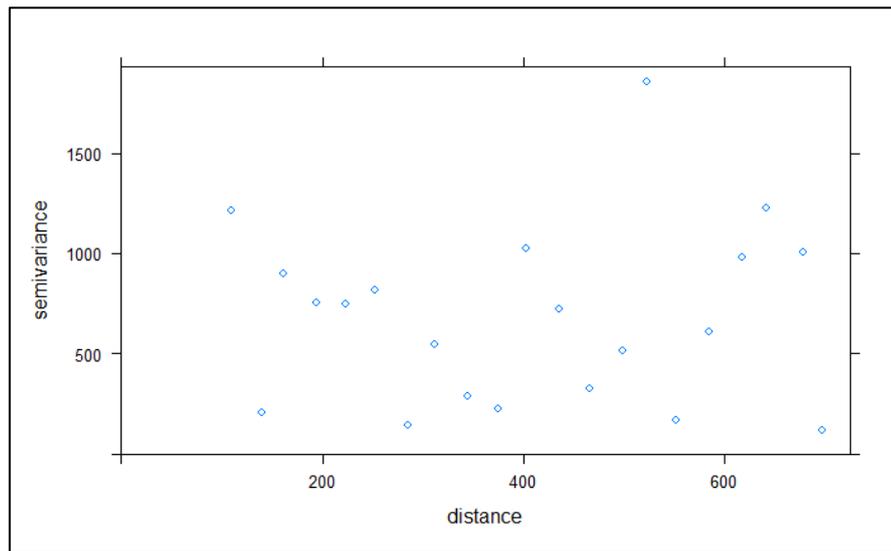


Figura 20 - Variograma experimental matéria orgânica

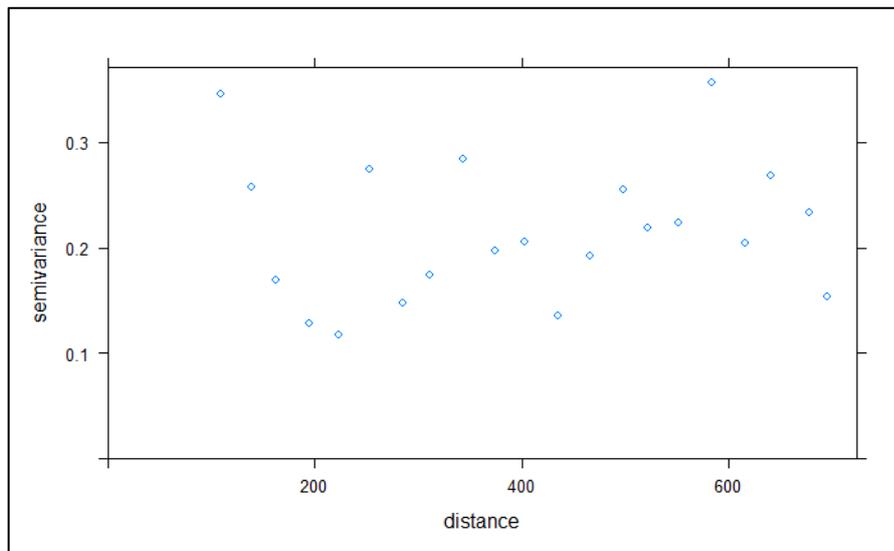
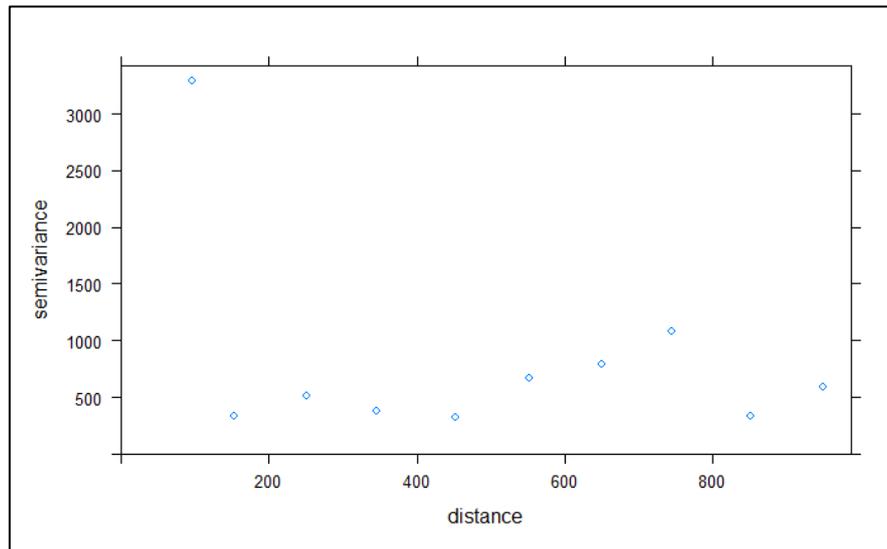


Figura 21 - Variograma experimental cálcio



Com a impossibilidade de seguir com a execução do método da krigagem ordinária, e posteriormente, da krigagem com deriva externa para comparação de seus índices, em função de não ser possível ajustar a um modelo teórico, foi decidido encerrar o estudo neste momento.

3.8 CONCLUSÕES

Para o conjunto de dados deste trabalho, o método proposto não atingiu o resultado esperado, e a utilização da KDE não melhorou a estrutura espacial do mapa de argila.

Os atributos cálcio, magnésio, matéria orgânica e CTC não apresentaram dependência espacial, resultando nas tentativas de ajuste dos variogramas somente em efeito pepita puro, isto se deve, provavelmente, à aleatoriedade dos locais escolhidos para coleta das amostras de solo.

Assim, entende-se que são necessários outros estudos que partam do princípio de utilizar grades de amostragem mais densas para coleta de amostras e posterior comparação com novas abordagens de estatísticas multivariadas, usando a condutividade elétrica como variável adicional.

3.9 REFERÊNCIAS

ANDRIOTTI J.L.S. (2004). **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. Editora da UNISINOS. São Leopoldo, 165 p.

ANGELICO, J. C. **Desempenho da cokrigagem na determinação da variabilidade de atributos do solo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 30, n. 06, p. 931-936, 2006.

BOTTEGA, E.L. et. all. **Cokrigagem na estimativa dos teores de Ca e Mg em um Latossolo Vermelho distroférico**. Revista Ciência Agronômica, v. 42, n. 4, p. 821-828, out-dez, 2011.

CARVALHO, J.R.P de; SILVEIRA, P.M. da; VIEIRA, S.R. **Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.37, n.8, p.1151-9, ago. 2002.

CASTRO CN. **Definição de unidades de gerenciamento do solo por meio da sua condutividade elétrica e variáveis físicoquímicas, em Piracicaba/SP** [dissertation]. Piracicaba: Universidade de São Paulo; 2004.131p.

COSTA, F. P.; LIMA, J. S. S. **Cokrigagem na distribuição espacial do cálcio baseado no pH em um Latossolo cultivado com café conilon**. Nucleus, v.8, n.1, abr.2011.

FERREIRA, Marcos César. **Iniciação à análise geoespacial: teoria, técnicas e exemplos para geoprocessamento**. São Paulo: Editora Unesp, 2014.

MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; PAULETTI, V.; SCHMIDHALTER, U.; HAMMER, J. **Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.2, p.420-426, 2005.

GREGO, Célia Regina; OLIVEIRA, Ronaldo Pereira de; VIEIRA, Sidney Rosa **Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão**. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. cap. 5, p. 74-83.

LUZARDO, Antonio José Rocha; FILHO, Rafael MarchCastañeda; RUBIM,Igor Brum. **Análise espacial exploratória com o emprego do índice de MORAN**. Revista Geographia, Niterói, 2017.

MAPA, 2021. **Principais conceitos e expressões utilizados na Agricultura de Precisão**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br>

MARCONATO, Renata; LAROCCA, Ana Paula C.; QUINTANILLHA, José Alberto. **Análise do uso de tecnologias em estabelecimentos agropecuários por meio dos índices de MORAN global e local.** Revista de Política Agrícola, Ano XXI – No 1 – Jan./Fev./Mar. 2012

MOLIN, José Paulo; AMARAL, Lucas Rios do; COLAÇO, André Freitas. **Agricultura de precisão, 4 Sistemas de informações geográficas e análise espacial de dados.** Disponível em:<https://ebooks.ofitexto.com.br/epubreader/agricultura-de-preciso>

MOLIN, J. P.; RABELLO, L.M. **Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo.** Engenharia Agrícola, v.31, n.1, p.90-101, 2011.

P.M.B. Landim. **Sobre Geoestatística e mapas.** TERRÆ DIDATICA 2(1):19-33, 2006.

PONTELLI, C. B. **Caracterização da variabilidade espacial das características químicas do solo e da produtividade das culturas, utilizando as ferramentas de agricultura de precisão.** 2006. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

RABELLO, L.M. **Condutividade elétrica do solo, tópicos e equipamentos.** São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2009. 19 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Documentos, ISSN).

RIBEIRO, Jéssica Maria Lopes *et al.* **Análise espacial dos gastos com educação e desenvolvimento humano no estado de Minas Gerais.** Disponível em:<https://diamantina.cedeplar.ufmg.br/portal/download/diamantina-2016/217-363-1-RV.pdf>

SANCHES, G. M. **O uso da condutividade elétrica aparente e krigagem com deriva externa para otimizar a amostragem de solo.** Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 2014

SILVA, P.C.M.; CHAVES, L.H.G. **Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em alissolos.** R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, Campina Grande, v.5, n.3, p.431-436, 2001.

SILVA, V. R. et al. **Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 27, n. 06, p. 1013-1020, 2003.

SOUZA, Z.M. de; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; MOREIRA, L.F. **Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar.** Ciência Rural. 2004, vol.34, n.6, pp. 1763-1771.

VIEIRA, S.R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo.** In: NOVAIS, R.F. de; ALVAREZV.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. Tópicos em ciência do solo, Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54.

WEBSTER, R. **Is soil variation random?** Geoderma, 97:149-163, 2000.

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

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade.** 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência em Levantamento do solo e ftopedologia) – FCA -UNESP, Botucatu, 2001.