

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

Guilherme Santos Haetinger

**CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO COMO FATOR DELIMITADOR DE
ZONAS DE MANEJO VISANDO O AJUSTE DA POPULAÇÃO DE PLANTAS EM
CULTIVO IRRIGADO**

Santa Maria, RS
26 de agosto de 2022

Guilherme Santos Haetinger

**CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO COMO FATOR DELIMITADOR DE
ZONAS DE MANEJO VISANDO O AJUSTE DA POPULAÇÃO DE PLANTAS EM
CULTIVO IRRIGADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação 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^o Dr. Eduardo Leonel Bottega
Coorientadora: Prof^a Dr^a Zanandra Boff de Oliveira

Santa Maria, RS
26 de agosto de 2022

Haetinger, Guilherme
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO COMO FATOR DELIMITADOR
DE ZONAS DE MANEJO VISANDO O AJUSTE DA POPULAÇÃO DE
PLANTAS EM CULTIVO IRRIGADO / Guilherme Haetinger.- 2022.
42 p.; 30 cm

Orientador: Eduardo Bottega
Coorientadora: Zanandra de Oliveira
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Colégio Politécnico, Programa de Pós-Graduação em
Agricultura de Precisão, RS, 2022

1. Agricultura de Precisão 2. Glycine max 3.
Condutividade elétrica aparente do solo I. Bottega,
Eduardo II. de Oliveira, Zanandra III. 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, GUILHERME HAETINGER, 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.

Guilherme Santos Haetinger

**CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO COMO FATOR DELIMITADOR DE
ZONAS DE MANEJO VISANDO O AJUSTE DA POPULAÇÃO DE PLANTAS EM
CULTIVO IRRIGADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação 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 26 de agosto de 2022:

Eduardo Leonel Bottega, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr. (UFSM)
(UFSM)

Alberto Eduardo Knies, Dr. (UERGS)
(UERGS)

Santa Maria, RS
26 de agosto de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família por todo o suporte nesta caminhada desde os meus primeiros passos, em especial, minha mãe Cleusa e meu pai Vilnei. Sempre me incentivando a aprender e me desafiar, me ensinando que conhecimento nunca é demais.

À empresa ConnectFARM pelas oportunidades de me desenvolver não só como profissional, mas também como pessoa. Em especial, Rodrigo e Eder, que desde meu primeiro dia como estagiário foram exemplos de profissionalismo e generosidade, acreditando no meu potencial antes mesmo que eu o fizesse.

À Agropecuária Barufaldi pela confiança de sempre e a permissão para que o experimento fosse conduzido dentro da fazenda.

Ao orientador Eduardo Leonel Bottega, um agradecimento que não cabe em palavras pela orientação em todas as etapas. Sendo além de um guia, uma pessoa inspiradora, sempre dedicado e disponível, tornando este trabalho possível no papel e na execução a campo.

RESUMO

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO COMO FATOR DELIMITADOR DE ZONAS DE MANEJO VISANDO O AJUSTE DA POPULAÇÃO DE PLANTAS EM CULTIVO IRRIGADO

AUTOR: Guilherme Santos Haetinger
ORIENTADOR: Eduardo Leonel Bottega

O constante aumento populacional mundial vem fazendo com que cada vez mais cultivos com polivalência de seus produtos tomem maior espaço no mercado. O cultivo da soja, o qual é de grande expressão no território brasileiro se enquadra nestes quesitos, se tornando bastante importante o estudo e a busca da aferição de todas suas recomendações técnicas. Desta forma, a Agricultura de Precisão, que busca identificar e delimitar subáreas de cultivo dentro de um padrão de características físico-químicas do solo e aplicar nelas um manejo específico, se torna uma estratégia agronômica crucial que visa alcançar o máximo desempenho produtivo e financeiro deste setor produtivo aliados a um menor impacto ambiental, sem desconsiderar a sua praticidade de adoção a campo. Tendo isto em vista, formas efetivas e ágeis de mensuração e mapeamento de características da área de cultivo, como a condutividade elétrica aparente do solo (CEa), se tornam alvo de estudo. Neste trabalho a CEa foi efetiva na delimitação de zonas de manejo para a área. Na zona de manejo de maior CEa houve resposta positiva ao maior adensamento de plantas, enquanto na zona de manejo de menor CEa se obteve mais produtividade na população de plantas intermediária. Com o ajuste de população proposto se estimou um ganho produtivo potencial de 157,07 kg ha⁻¹.

Palavras-chave: Agricultura de precisão, *Glycine max*, condutividade elétrica aparente do solo.

ABSTRACT

APPARENT SOIL ELECTRICAL CONDUCTIVITY AS A DELIMITATION TOOL OF MANAGEMENT ZONES AIMING TO ADJUST THE PLANT POPULATION IN IRRIGATED CROP

AUTHOR: Guilherme Santos Haetinge

ADVISOR: Eduardo Leonel Bottega

The constant increase in the world population is making more and more crops with the versatility of their products take more space in the market. The cultivation of soybean, which is of great expression in the Brazilian territory, fits these requirements, making it very important to study and search for the measurement of all its technical recommendations. In this way, Precision Agriculture, which seeks to identify and delimit sub-areas of cultivation within a pattern of physical-chemical soil characteristics and apply specific management to them, becomes a crucial agronomic strategy that aims to achieve maximum productive and financial performance of this soil. productive sector allied to a lower environmental impact, without disregarding its practicality of adoption in the field. With this in mind, effective and agile ways of measuring and mapping characteristics of the cultivation area, such as soil apparent electrical conductivity (AEC), become the target of study. In this work, the AEC was effective on delimiting management zones for the area. The higher AEC management zone showed a positive response to the increase in plant population, meanwhile in the lower AEC management zone higher yield was obtained at the intermediate plant population. With the suggested population settlement was estimated a potential productivity gain of 157,07 kg ha⁻¹.

Keywords: Precision agriculture, *Glycine max*, soil apparent electrical conductivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Polígono da área de estudos e pontos amostrais utilizados como base na mensuração da condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m^{-1}) e coleta de amostras de solo (pontos circulados em vermelho) para determinação textural e da umidade (A) e modelo digital de elevação do terreno (B). Fonte: Autor	18
Figura 2 – Medidor de condutividade elétrica portátil LandMapper ERM-02 e Matriz de Wenner. Fonte: Autor	19
Figura 3 – Mapas temáticos representativos da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m^{-1}) obtidos para as diferentes datas de mensuração	26
Figura 4 – Mapa temático indicativo das zonas de manejo delimitadas e blocos com diferentes populações de plantas semeadas na área de estudos.....	27
Figura 5 – Mapa temático da variabilidade espacial da produtividade de soja	27
Figura 6 – Gráficos Box-Plot da produtividade de soja (kg ha^{-1}) observada para cada população de plantas em função da zona de manejo (ZM) na qual foram cultivadas. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste t ($p < 0,05$), minúsculas para comparação da produtividade das diferentes populações de plantas na mesma ZM e maiúsculas para comparações da produtividade das diferentes populações de plantas entre as ZM.....	29
Figura 7 – Registro de precipitações em ordem cronológica durante o ciclo da cultura, com acumulados por período.....	33
Figura 8 – Registro de lâminas de irrigação aplicadas em ordem cronológica durante o ciclo da cultura, com acumulados por período.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo estatístico descritivo da condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m ⁻¹) mensurada na área de estudos em cinco datas	24
Tabela 2 – Parâmetros dos semivariogramas teóricos e da análise de validação cruzada referente a modelagem da dependência espacial da condutividade elétrica aparente do solo.....	25
Tabela 3 – Resumo estatístico descritivo da condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m ⁻¹) e da produtividade de soja (PRD, kg ha ⁻¹) para as diferentes populações de plantas estudadas (pop1, pop2 e pop3)	28
Tabela 4 – Teste de médias t (p<0,05) para os valores de produtividade de soja (kg ha ⁻¹) para as diferentes populações de plantas estudadas (pop1, pop2 e pop3).....	29
Tabela 5 – Estimativa de ganho de produtividade (PRD) adotando a população de plantas de melhor desempenho por zona de manejo	31
Tabela 6 – Estimativa de ganho de resultado líquido (R. Líq.) e retorno do investimento (ROI) com base nos custos de semente e preço da saca de soja na safra 2020/2021.....	32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVO.....	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	13
3.1 CULTURA DA SOJA	13
3.2 POPULAÇÃO DE PLANTAS.....	14
3.3 AGRICULTURA DE PRECISÃO.....	15
3.3.1 Zonas de manejo.....	16
3.3.2 Condutividade elétrica aparente do solo.....	16
4 MATERIAIS E MÉTODOS	18
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	18
4.2 MAPEAMENTO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO (CEa)	19
4.3 SEMEADURA DAS DIFERENTES POPULAÇÕES DE PLANTAS	20
4.4 MAPEAMENTO DA PRODUTIVIDADE DE SOJA.....	20
4.5 ANÁLISES GEOESTATÍSTICAS E DELIMITAÇÃO DAS ZONAS DE MANEJO	20
4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	22
4.7 ESTIMATIVA DE GANHO DE PRODUTIVIDADE	22
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
6 CONCLUSÕES.....	34
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

No mundo inteiro o aumento populacional é cada vez mais expressivo, ocasionando diversas consequências. Uma das mais preocupantes, senão a mais, é o aumento na demanda de alimentos necessários tanto para a alimentação humana quanto para a alimentação animal e de outros setores da cadeia produtiva que de alguma maneira são necessários à sociedade. Dentro deste contexto, o cultivo de soja tem se tornado cada vez mais importante no cenário mundial, tendo em vista as vastas possibilidades de uso oferecidas pelos seus produtos finais.

Os elevados patamares produtivos atuais desta oleaginosa nos desafiam a buscar continuamente um aumento vertical da produção de soja, ou seja, não só o aumento por meio da abertura de novas áreas agricultáveis, mas, principalmente, por meio da otimização do manejo realizado nas áreas já existentes em busca de uma redução na diferença entre a produtividade potencial da cultura e a real obtida no campo.

Juntamente com o desafio de se produzir mais com menos área se tem o de produzir mais com menos custos e impactos ambientais. Considerando que o custo do produtor de soja com a aquisição de sementes é bastante elevado, a otimização da recomendação técnica deste item pode assumir um grande impacto. Embora existam recomendações de população de planta fornecidas pelas obtentoras, estas são bastante abrangentes resultando em uma lacuna agrônômica a qual deve ser estudada.

Desta forma, a Agricultura de Precisão assume grande importância como meio de constatação e delimitação dos diferentes ambientes gerando as zonas de manejo e buscando aferir a população de plantas ótima para cada caso, sendo visada a redução de custos do produtor aliada a uma maior eficiência produtiva das plantas.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a delimitação de zonas de manejo a partir do mapeamento da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo como ferramenta para tomada de decisão quanto a recomendação da população de plantas na cultura da soja.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Mapear a condutividade elétrica aparente do solo em uma área comercial destinada a produção de soja.

Delimitar zonas de manejo a partir do mapeamento da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo.

Semear, em cada zona de manejo, diferentes populações de plantas, sendo estas: 302.222 (pop1); 355.555 (pop2) e 408.888 (pop3) plantas por hectare.

Avaliar a produtividade de grãos para cada população de plantas em cada uma das zonas de manejo delimitadas.

Estudar a variação da produtividade de soja de cada população de plantas em função da zona de manejo na qual está localizada.

Estimar o ganho potencial de produtividade considerando a adequação da população de plantas de melhor desempenho em cada zona de manejo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 CULTURA DA SOJA

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill], pertencente à família Fabaceae e subfamília Papilionaceae (CARLSON, 1973), caracteriza-se como uma planta autógama, herbácea e anual (KIANG & GORMAN, 1983). A planta de soja a qual conhecemos hoje tem sua origem identificada no leste asiático, proveniente de plantas rasteiras que se desenvolviam ao longo do Rio Yangtzé, na China (EMBRAPA, 2019). Seu alastramento pelo resto do mundo ocorreu de maneira lenta e gradual, sendo inicialmente como uma curiosidade em jardins botânicos na Europa no fim do século XV e posteriormente com uma visão já comercial nos Estados Unidos no início do século XX com a seleção de cultivares adaptadas para integrar o sistema produtivo norte-americano que era composto basicamente por trigo e milho (BONETTI, 1981).

Em território brasileiro, segundo Zanon (2015), seus primeiros relatos datam de meados da década de 1880 no Estado da Bahia porém possuindo finalidade forrageira. Já o cultivo da soja com a finalidade da produção de grãos foi observado pela primeira vez no Brasil no Estado do Rio Grande do Sul, no atual território do município de Tuparendi, sendo importado dos Estados Unidos o material genético utilizado (BONETTI, 1981).

A partir da década de 1950 a produção de soja brasileira começou a figurar nas estatísticas internacionais e teve um aumento na sua área de produção devido a um incentivo indireto proporcionado por políticas nacionais de incentivo à triticultura, fazendo com que do ponto de vista técnico houvesse considerável espaço para o encaixe da cultura da soja no verão visando uma sucessão de culturas gramínea-leguminosa além do aproveitamento de maquinário e maior rentabilidade ao produtor (MEDINA, 1981).

Na década seguinte, nos anos de 1960, com a criação da “Operação Tatu”, a qual consistia numa iniciativa pública de incentivar a calagem e correção dos solos no Rio Grande do Sul, foi então mais uma vez impulsionada a lavoura de soja gaúcha, chegando a aumentar a produção de soja em até cinco vezes (EMBRAPA, 2003). Posteriormente, na década de 1970, a área cultivada no Brasil aumentou de 1,3 para 8,8 milhões de hectares, o que juntamente com um aumento no número de cultivares disponíveis no mercado, acabou acarretando em um aumento de produção de 1,5 milhão de toneladas para 15 milhões de toneladas, ou seja, um histórico aumento de 10 vezes na quantidade produzida no país (RUBIN & SANTOS, 1996).

Atualmente no cenário mundial o Brasil aparece como um dos maiores produtores e exportadores do grão no mundo, com uma área de cerca de 35,8 milhões de hectares na safra 2018/2019 e produção de cerca de 115 milhões de toneladas (CONAB, 2019).

3.2 POPULAÇÃO DE PLANTAS

A busca pela recomendação da população ideal de plantas é um grande desafio, tendo em vista que a soja é uma espécie que apresenta grande plasticidade quanto à resposta a variações no arranjo de plantas. Esta plasticidade fenotípica corresponde à capacidade das plantas de alterarem sua morfologia e componentes de rendimento buscando a combinação mais adequada para cada condição de arranjo de plantas (COOPERATIVE..., 1994).

Tanto um incremento ou redução na população de plantas podem ser prejudiciais ao rendimento de grãos, sendo o acamamento propiciado pelo aumento de população de plantas, como a densidade insuficiente de plantas para produção esperada em um caso de redução de população. E justamente por esta plasticidade da planta se torna tão complexa tomada de decisão para o ajuste populacional, sendo todo o processo afetado por cultivar utilizada, fertilidade do solo, disponibilidade hídrica, temperatura e radiação solar (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005).

Luiz et al. (2020) conseguiram constatar que não apenas cada cultivar de soja pode possuir uma população ótima diferente, como também cada material genético pode gerar curvas de resposta com comportamentos bastante distintos para as diferentes variações populacionais. Fatores ambientais como o regime pluviométrico podem afetar as respostas à variação de populações, como observado por Procopio et al. (2018) quando áreas estudadas que sofreram com forte déficit hídrico apresentaram redução no porte das plantas, ao mesmo tempo que não foram detectados problemas de acamamento nas plantas de soja nesse ensaio. Por outro lado, os experimentos conduzidos em áreas que tiveram sérios problemas de excesso hídrico na fase vegetativa, causando hipoxia no sistema radicular, apresentaram também restrição do crescimento das plantas, e conseqüentemente ausência de acamamento. O que demonstra que não somente a disponibilidade hídrica é fator importante, mas também a distribuição das chuvas ao longo do ciclo da cultura.

Segundo Carlesso (1995), existem os efeitos benéficos como a redução de custos com sementes em menores populações e o aumento do desenvolvimento radicular em profundidade estimulado por populações mais adensadas. Ficando bastante claro que não apenas o

desempenho agrônômico deve ser observado, mas principalmente o resultado da relação custo-benefício para o produtor aliado à produtividade.

3.3 AGRICULTURA DE PRECISÃO

No processo de constante busca por aumento dos rendimentos agrônômicos surge também a Agricultura de Precisão. Essa, nada mais é que uma forma moderna de gerenciamento da atividade agrícola, a qual tem como objetivo a aplicação dos insumos no local correto, no momento adequado e nas quantidades necessárias à produção para áreas consideradas homogêneas (DOBERMANN & PING, 2004).

O primeiro passo na implantação da AP, é identificar a variabilidade espacial da lavoura. Mapas de produtividade, mapas de condutividade elétrica aparente do solo, imagens aéreas (sensoriamentos remotos e próximos), topografia (paisagem) com pedologia refinada pode chegar a uma continuidade de leitura ou de dados a cada três metros com custo razoável e essas medidas indicam indiretamente como ocorre a variabilidade da lavoura. Essas indicações indiretas são medidas que auxiliam e orientam uma amostragem mais estratégica, reduzindo a necessidade de um número elevado de amostras colhidas às cegas em uma distância regular em grade (BERNARDI et al., 2014).

Em uma visão mais ampla, a Agricultura de Precisão é o conjunto de técnicas que envolvem máquinas, equipamentos, programas computacionais e pessoal especializado que buscam possibilitar o gerenciamento agrícola compatível com o nível requerido pela agricultura empresarial globalizada (FOTCHT et al., 2004; DURIGON, 2007).

Em 2012, teve seu conceito definido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), como sendo um sistema de gerenciamento agrícola baseada na variação espacial e temporal da área produtiva tende em aumentar o retorno econômico e melhorar as relações com o meio ambiente, diminuindo as contaminações, sendo necessário em áreas pequenas ou extensas (BRASIL, 2012). Deve-se levar em conta sempre a quantidade necessária de insumos que garanta uma maior produtividade, porém de maneira que se obtenha resposta econômica positiva máxima e sem esquecer do aspecto ambiental (MANTOVANI, 2006).

3.3.1 Zonas de manejo

As áreas de cultivo agrícola possuem características de natureza química, física e biológica bastante variáveis, o que gera distintos potenciais produtivos e, conseqüentemente, estratégias de manejo diferentes. As zonas de manejo visam justamente caracterizar e delimitar estas diferenças, buscando agregar áreas de características similares em uma espécie de subárea que permita facilidade e praticidade para a adoção do produtor.

Portanto, para que seja eficiente o manejo por meio das zonas de uma área específica é necessário a realização de um planejamento adequado de uso e ocupação do solo, o qual definirá primeiramente quais as áreas passíveis de receber as mesmas práticas agrônômicas, visando reduzir os impactos do homem sobre o meio ambiente (MIQUELONI et al., 2015).

A delimitação das zonas de manejo pode ser feita para realização da correção e adubação do solo, considerando a variabilidade espacial dos nutrientes (FU et al., 2010). Alguns fatores podem ser considerados limitantes na adoção da técnica de manejo por zonas, podendo ser citada a elevada variabilidade espacial e temporal dos nutrientes. De acordo com Zanão Júnior et al. (2007), a variabilidade espacial dos nutrientes pode não ser igual entre eles. Alguns nutrientes necessitam de números maiores de amostras que outros para que se possa conhecer o seu comportamento em relação a uma determinada área. Isso acontece, pois as variações nos teores dos elementos do solo não é a mesma para todos os atributos.

A utilização de atributos do solo que apresentam baixa variabilidade ao longo do tempo torna-se chave para o sucesso no estabelecimento de zonas de manejo. Na geração de zonas de manejo, é necessária, em um primeiro momento, a coleta de informações intimamente ligadas à produtividade das culturas, preferencialmente que esta seja de rápida aquisição e de baixo custo. Nesse sentido, um dos atributos que vêm sendo muito utilizado para delimitação de zonas de manejo tem sido a condutividade elétrica aparente do solo (CEa).

3.3.2 Condutividade elétrica aparente do solo

Conhecer as características específicas da área de cultivo trabalhada é a peça fundamental para o início do planejamento e tomada de decisão no manejo agrônômico, portanto, mensurar e mapear tais atributos se torna um passo essencial no processo de otimização dos rendimentos agrônômicos. Neste âmbito a condutividade elétrica aparente do solo (CEa) atua como uma importante propriedade a ser considerada por ser reflexo de diversas características físico-

químicas do solo, tal como: sais solúveis; mineralogia e conteúdo de argila; quantidade de água; densidade volumétrica; teor de matéria orgânica e até temperatura do solo (RABELLO, 2014).

O conteúdo de argila, segundo Dias et al. (2013), pode estar correlacionado de forma negativa ao teor de fósforo apresentado em amostras de tecido de plantas de soja, uma vez que quanto mais argila, mais fortemente o fósforo fica adsorvido e menos disponível para a planta.

Pesquisas têm demonstrado sua correlação com atributos químicos e físicos do solo (MORAL et al., 2010; RODRÍGUEZ-PÉREZ et al., 2011). O mapeamento da CEa é rápido e apresenta baixo custo, se comparado com o mapeamento de nutrientes por amostragem e determinação dos atributos por análise em laboratório. Devido sua praticidade e confiabilidade, a CEa tem sido utilizada como estimador indireto da variabilidade existente em um campo de produção (CORWIN; LESCH, 2003). Embora esse atributo seja influenciado pela umidade do solo, ou seja, locais de maior umidade apresentam maiores valores de CEa, King et al. (2005) comprovaram que o padrão espacial se mantém estável, mudando apenas a amplitude dos valores mensurados.

Johnson et al. (2005) comprovaram que os fatores que contribuem para a condutividade eléctrica do solo são também limitantes da produtividade das culturas. Os autores observaram relações significativas entre a CEa, as características do solo e a produtividade das culturas, concluindo que a CEa pode ser utilizada para identificar os gradientes de fertilidade do solo. Em contrapartida, estudos conduzidos por Serrano et al. (2010) não encontraram correlação da CEa com teor de argila e com macronutrientes do solo. Segundo Sari et al. (2020) a CEa também pode ser utilizada como ferramenta para o direcionamento localizado de amostragens de resistência à penetração, podendo então servir como mapa base para a geração de zonas de manejo visando a caracterização da resistência do solo à penetração.

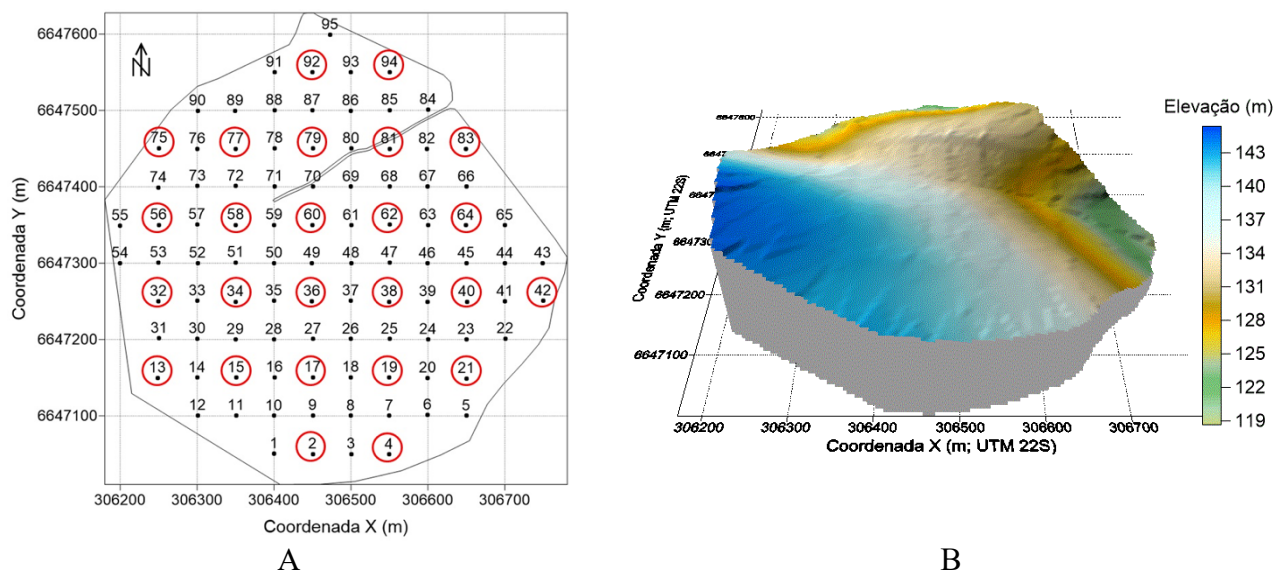
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O trabalho foi realizado no município de Cachoeira do Sul, estado do Rio Grande do Sul, em uma área comercial destinada ao cultivo de grãos em sistema de plantio direto, sob pivô central, com 25,7 hectares. O estudo foi realizado na entressafra na condição de resteva de aveia. O solo da região é classificado como ARGISSOLO Vermelho (EMBRAPA, 2013). Foi estabelecida uma malha amostral composta por 95 pontos (Fig. 1a), com espaçamento regular de 50 x 50 metros. Estes pontos serviram de base para coleta de dados de altitude em relação ao nível do mar, mensuração da condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m^{-1}) e retirada de amostras para caracterização textural e da umidade do solo (0-20 cm). Utilizou-se um receptor GPS da marca Garmin, modelo GPSMAP 62sc para localização dos pontos amostrais na área e obtenção do valor de altitude em relação ao nível do mar.

Na Figura 1 são apresentados o mapa de pontos amostrais (Fig. 1A) e o mapa representativo do modelo digital de elevação da área de estudo (Fig. 1B).

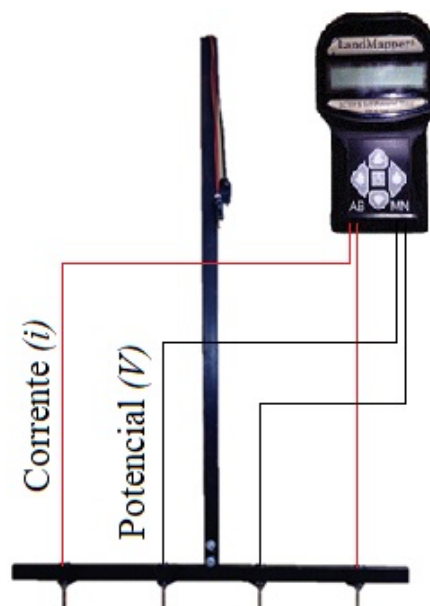
Figura 1 – Polígono da área de estudos e pontos amostrais utilizados como base na mensuração da condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m^{-1}) e coleta de amostras de solo (pontos circulados em vermelho) para determinação textural e da umidade (A) e modelo digital de elevação do terreno (B). Fonte: Autor



4.2 MAPEAMENTO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO (CEa)

Para mensuração da condutividade elétrica aparente do solo foi utilizado um medidor de condutividade elétrica portátil, marca Landviser®, modelo LandMapper® ERM-02 (Fig. 2A). A condutividade elétrica aparente do solo foi mensurada a partir do método da resistividade elétrica. A resistividade elétrica foi obtida introduzindo na superfície do solo quatro eletrodos igualmente espaçados. Nos eletrodos externos foi aplicada uma corrente elétrica e a diferença de potencial medida nos eletrodos internos. A configuração da montagem dos eletrodos foi a Matriz de Wenner (Fig. 2B), com quatro eletrodos arranjados de forma a obter medições a 0,20 m de profundidade (CORWIN; HEDRICKX, 2002; CORWIN; LESH, 2003).

Figura 2 – Medidor de condutividade elétrica portátil LandMapper ERM-02 e Matriz de Wenner. Fonte: Autor



Foi mensurada a condutividade elétrica da área de estudos em 5 (cinco) datas, a saber: 25/05/2018; 13/11/2018; 17/11/2018; 29/09/2019 e 19/05/2020, estas leituras serviram de base na delimitação das zonas de manejo.

4.3 SEMEADURA DAS DIFERENTES POPULAÇÕES DE PLANTAS

A semeadura da área experimental foi realizada com uma semeadora adubadora pneumática da marca John Deere, modelo 2115, nos dias 19 e 20 de novembro de 2020. A variação dos tratamentos foi realizada automaticamente pelo equipamento, a partir da leitura de um arquivo no formato *shape file* (.shp) de prescrição de semeadura elaborado tendo como base as zonas de manejo. Após a emergência das plântulas, foram averiguadas e confirmadas as populações alvo à campo, realizando a contagem de plantas por metro de linha em três locais diferente, dentro do bloco de mesma população.

A cultivar de soja utilizada para o experimento foi a Brasmax Zeus (55i57 RSF IPRO), de hábito de crescimento indeterminado e GMR 5.5 com tecnologia Intacta. A escolha do material foi feita com base no histórico e fertilidade da área, visando altas produtividades.

4.4 MAPEAMENTO DA PRODUTIVIDADE DE SOJA

A colheita foi realizada no dia 10 de abril de 2021, com uma colhedora automotriz da marca New Holland, modelo CR 9060. A colhedora estava equipada com o monitor IntelliView™ IV. De acordo com o fabricante, o IntelliView™ IV é uma tela colorida, intuitiva e sensível ao toque que pode vir de fábrica integrada a diversos modelos de equipamentos New Holland. Tem compatibilidade ISOBUS total e pode ser usada tanto para controlar as funções principais do veículo quanto para executar aplicações de precisão, como a orientação automática IntelliSteer™, mapeamento conforme aplicado e controle das funções do implemento de frotas mistas de equipamentos. Seu emprego em colhedoras permite a realização do mapeamento e monitoramento de rendimento e detecção de umidade dos grãos colhidos (NEW HOLLAND AGRICULTURE, 2022).

4.5 ANÁLISES GEOESTATÍSTICAS E DELIMITAÇÃO DAS ZONAS DE MANEJO

Inicialmente realizou-se uma filtragem dos dados de produtividade de soja oriundos do sistema de mapeamento da colhedora, removendo aqueles considerados discrepantes. Para identificação dos discrepantes, foi utilizado método proposto de Libardi et al. (1996), segundo o qual o limite crítico para estes valores é definido a partir da dispersão interquartil (DQ), sendo

o limite superior definido por $(Q3 + 1,5 \times DQ)$ e o inferior por $(Q1 - 1,5 \times DQ)$, em que Q1 e Q3 são o primeiro e o terceiro quartil, respectivamente.

A dependência espacial da condutividade elétrica aparente do solo foi avaliada pelo ajuste de variogramas, pressupondo a estacionaridade da hipótese intrínseca, definida pela Equação 1.

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

Em que;

$\hat{\gamma}(h)$ = Semivariância em função da distância de separação (h) entre pares de pontos;

h = Distância de separação entre pares de pontos, m;

N (h) = Número de pares experimentais de observações Z(xi) e Z (xi + h) separados por uma distância h.

Foram testados os modelos gaussiano, esférico e exponencial. Ajustou-se o modelo que apresentou a menor soma dos quadrados do resíduo (OLIVER; WEBSTER, 2014). O modelo selecionado foi avaliado pela técnica de validação cruzada. A precisão do modelo é refletida pelos parâmetros obtidos na análise de validação cruzada, que são eles: coeficiente de determinação (quanto mais próximo do valor 1, mais precisas são as estimativas), erro padrão de predição (quanto menor, mais precisas são as estimativas) e intercepto (quanto mais próximo de zero, mais precisas são as estimativas).

Uma vez detectada a dependência espacial e ajustado o modelo teórico de semivariância, foi produzido o mapa de variabilidade espacial da CE. A interpolação de valores foi realizada utilizando krigagem ordinária. Esse método de interpolação foi selecionado porque fornece as melhores previsões lineares sem viés (BLUP), buscando a variância mínima (OLIVER; WEBSTER, 2014). Para as estimativas de valores em locais não amostrados, foram utilizados 16 vizinhos próximos e um raio de busca igual ao valor do alcance encontrado no ajuste do variograma, de forma a garantir o intervalo de continuidade espacial. A partir dos arquivos de dados krigados, originados na análise da variabilidade espacial da CEa, foram delimitadas as zonas de manejo (ZM). Na delimitação das ZM foi considerada a variabilidade espacial da CEa medida nas cinco datas.

A análise da variabilidade espacial e a delimitação de zonas de manejo foi realizada no Sistema de Informação Geográfica (SIG) Quantum Gis (QGIS Development Team, 2020), versão 3.10.11 (A Coruña), utilizando o plugin Smart-Map, desenvolvido por Pereira et al. (2021). O Smart-Map possibilita a predição e o mapeamento de atributos do solo. Permite a interpolação dos dados utilizando Krigagem Ordinária e técnicas de *Machine Learning* por

meio do *Support Vector Machine* (SVM) bem como a delimitação de zonas de manejo. Possibilita a interação com o QGIS a partir de *layers* (*Shapefile* e *GeoTIFF*). O principal objetivo desse plugin é fornecer uma plataforma livre e *open source*, aliada às funções já existentes no QGIS. Disponível para os Sistemas Operacionais Windows, Linux e Mac tendo como única dependência o QGIS 3.10.x 64 bits instalado. Desenvolvido em Python 3, o plugin utiliza alguns pacotes já incorporados ao seu código como: *scikit-learn*, *scikit-fuzzy*, *pysal* e *pyKrige*.

4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Foi calculado o valor mínimo, a média, o valor máximo, desvio padrão e coeficiente de variação da CEa, para cada uma das datas de leitura e para cada uma das ZM, a fim de caracterizar o comportamento desta variável. O mesmo foi realizado para os dados de produtividade, considerando a população de plantas alocada em cada ZM.

O mapa dos blocos das diferentes populações de plantas foi sobreposto ao mapa filtrado de produtividade, oriundo da colhedora de grãos. Assim, foi possível extrair os valores de produtividade de soja presentes no interior de cada um dos blocos representativos das diferentes populações de plantas, cultivadas nas diferentes ZM. Os valores de produtividade de soja foram então comparados entre si, primeiramente contrastando as diferentes populações de plantas presentes na mesma ZM, posteriormente, entre populações presentes em zonas diferentes. A extração dos dados de produtividade de soja, de cada uma das diferentes populações de plantas estudadas, implantadas em cada uma das ZM, foi realizada no Sistema de Informação Geográfica (SIG) Quantum Gis (QGIS Development Team, 2020), versão 3.10.11 (A Coruña). As análises estatísticas foram realizadas no software Statistica, versão 7 (STATSOFT, 2004).

4.7 ESTIMATIVA DE GANHO DE PRODUTIVIDADE

Após delimitadas as zonas de manejo, foi quantificado o percentual que cada ZM representa em relação a área total. O percentual de área foi obtido transformando o mapa de ZM do formato raster para pixel, utilizando a ferramenta “*Pixel de raster para pontos*”. A tabela de atributos resultante desta transformação foi uma planilha, onde cada pixel que compõem o

mapa apresentou um valor. Pixels referentes a ZM1 apresentaram valor 1 e pixels referentes a ZM2, valor 2.

A produtividade média de cada ZM foi obtida sobrepondo o mapa de produtividade, oriundo da colhedora de grãos ao mapa de ZM vetorizado. Para vetorizar o mapa de ZM utilizou-se a ferramenta *vectorising grid classes*. Os valores de produtividade em cada ZM foram selecionados utilizando a ferramenta “*Seleccionar por localização*”. Não foi considerada a produtividade obtida nos blocos de testes das populações de plantas, apenas aquela onde a população adotada foi uniforme para toda a área, equivalente a 355.555 plantas por hectare.

Todas as transformações descritas neste item foram realizadas no Sistema de Informação Geográfica (SIG) Quantum Gis (QGIS Development Team, 2020), versão 3.10.11 (A Coruña).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O solo da área de estudo apresentou valores médios de 340 g kg⁻¹ de argila, 460 g kg⁻¹ de areia e 200 g kg⁻¹ de silte, sendo classificado como de textura média (EMBRAPA, 2013). Na Tabela 1 é apresentado o resumo estatístico para as leituras de CEa nas cinco datas em que foram realizadas.

Tabela 1 – Resumo estatístico descritivo da condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m⁻¹) mensurada na área de estudos em cinco datas

Leituras	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão	CV (%)	Umidade média (%)
25/05/2018	7,42	11,00	16,65	1,85	16,82	15,59
13/11/2018	1,87	10,54	32,46	3,66	34,73	13,73
17/11/2018	4,79	7,89	12,29	1,40	17,79	16,45
29/09/2019	1,99	9,76	16,92	2,08	21,31	13,10
19/05/2020	1,30	8,96	21,05	3,59	40,01	13,14

Mesmo com valores de umidade média de solo próximos se percebeu uma variabilidade temporal da CEa dentro do período estudado. Quando comparados com outras mensurações se percebe que são níveis expressivos de CEa, contrastando com o observado por Gimenez et al. (2019), que encontrou valores de CEa mais baixos, com média de 2,2 mS m⁻¹, oscilando entre 1,3 e 3,9 mS m⁻¹, com coeficiente de variação de 20,2%. Diferença essa que pode ser explicada pela textura do solo, sendo a área de estudo deste trabalho mais argilosa e também apresentando possivelmente maior umidade no solo no decorrer do ano devido ao perfil pluviométrico da região central do Rio Grande do Sul, com inverno bastante úmido e frio.

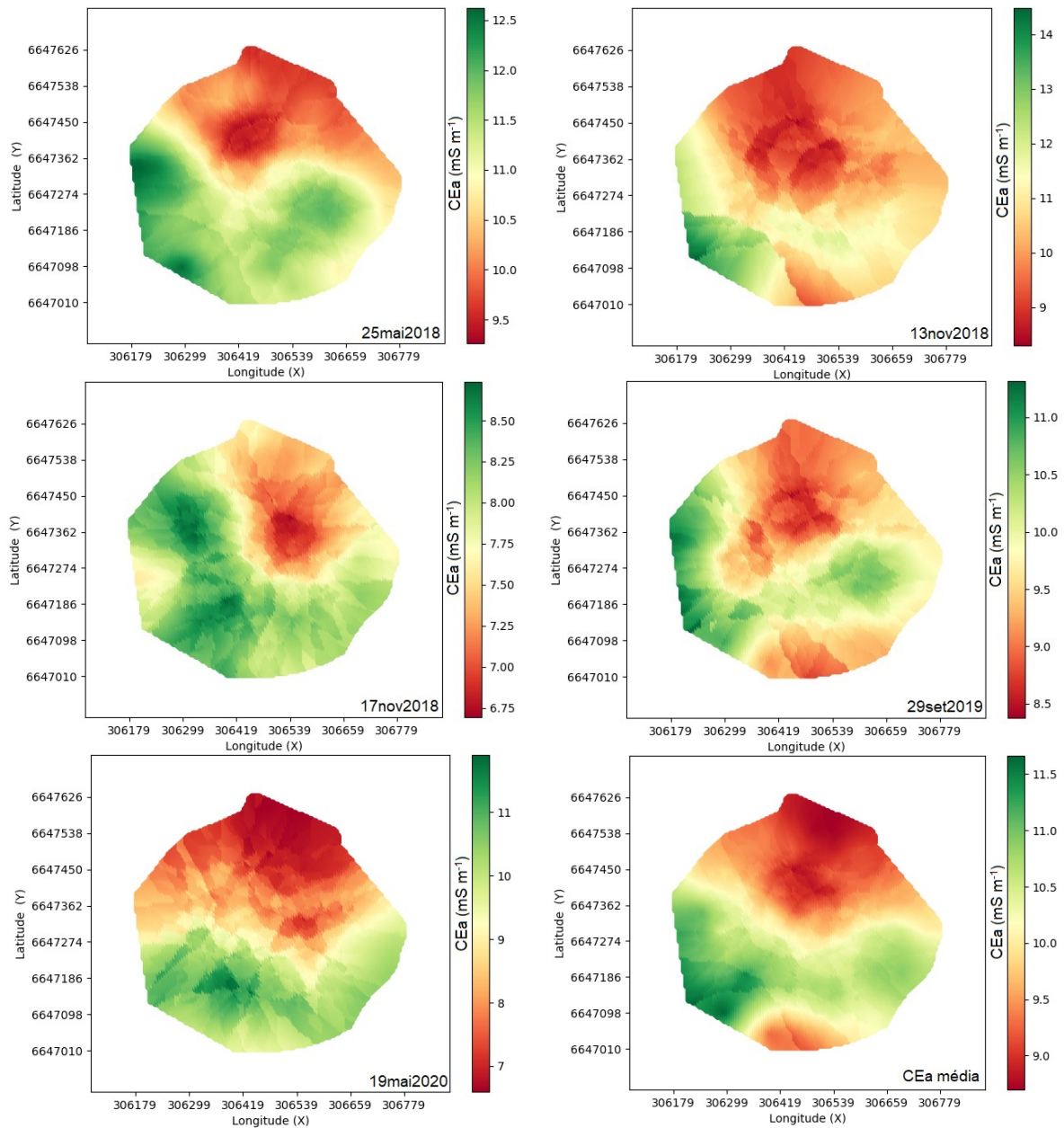
Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros dos semivariogramas teóricos e da análise de validação cruzada referente a modelagem da dependência espacial da condutividade elétrica aparente do solo. O menor alcance foi maior que duas vezes a distância entre pontos. O R² foi maior que 0,8 indicando que o modelo ajustado foi capaz de descrever a variância empírica dos valores de CEa. Esses resultados são representados pelo ajuste mensurado na validação cruzada onde foi observado coeficientes de regressão próximos a 1 e intercepto próximo a 0.

Tabela 2 – Parâmetros dos semivariogramas teóricos e da análise de validação cruzada referente a modelagem da dependência espacial da condutividade elétrica aparente do solo

Leituras	Parâmetros geoestatísticos						
	Modelo	a ⁽¹⁾	C ₀ +C ⁽²⁾	C ₀ ⁽³⁾	IDE ⁽⁴⁾	SQR ⁽⁵⁾	R ²⁽⁶⁾
25/05/2018	Esférico	280,60	2,768	1,331	Moderado	0,043	0,95
13/11/2018	Esférico	467,80	5,927	2,72	Moderado	0,105	0,98
17/11/2018	Esférico	151,80	1,098	0,313	Moderado	0,019	0,83
29/09/2019	Exponencial	117,80	2,734	1,307	Moderado	0,0198	0,96
19/05/2020	Gaussiano	369	11,12	4,98	Moderado	3,3	0,92
Parâmetros da análise de validação cruzada							
	Coeficiente de Regressão		Y ⁽⁷⁾	EPP ⁽⁸⁾		R ²	
25/05/2018	0,90		1,05	1,39		0,24	
13/11/2018	0,91		0,97	1,95		0,22	
17/11/2018	0,92		0,59	0,87		0,29	
29/09/2019	0,94		0,61	1,39		0,21	
19/05/2020	0,81		1,74	2,47		0,16	

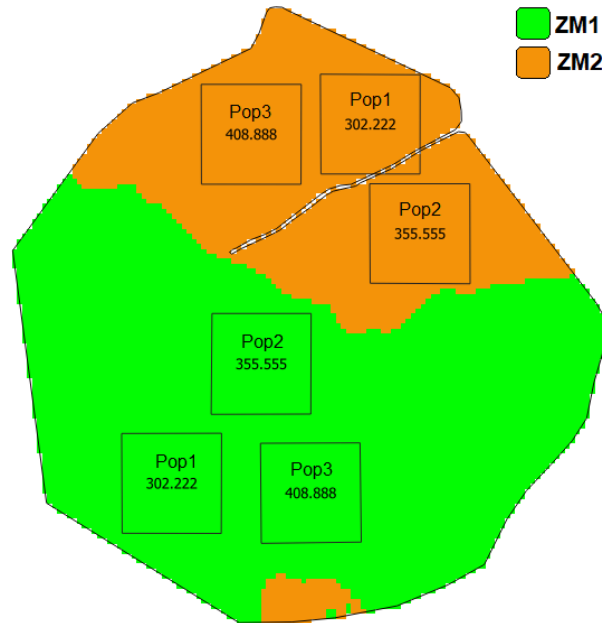
Na Figura 3 são apresentados os mapas temáticos representativos da variabilidade espacial da CEa para as diferentes datas de leitura. Pode ser observado que, embora haja uma certa migração dos limites das zonas ao longo das diferentes épocas do ano, a região de baixa CEa se repetiu ao longo dos anos. O mesmo comportamento foi observado para as zonas de alta CEa. Isso pode ser justificado por variações de textura do solo, que apresenta grande interação com a CEa (MOLIN et al., 2011), haja visto que fatores associados à química do solo sofreram alterações ao longo dos anos via manejos de fertilizantes do produtor. Quando se deseja utilizar uma determinada variável na delimitação de zonas de manejo, uma característica importante de se destacar é a baixa variabilidade temporal, ou seja, o comportamento da variabilidade pouco se altera geograficamente com o passar dos anos, mesmo em casos como o desta área na qual houve intensa rotação de culturas tanto no inverno quanto verão. Este fato pode ser melhor se exemplificado pelo mapeamento da variabilidade temporal da granulometria do solo, onde variações geográficas nos teores de areia, silte e argila são quase imperceptíveis ao longo da área em função do passar dos anos.

Figura 3 – Mapas temáticos representativos da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m^{-1}) obtidos para as diferentes datas de mensuração



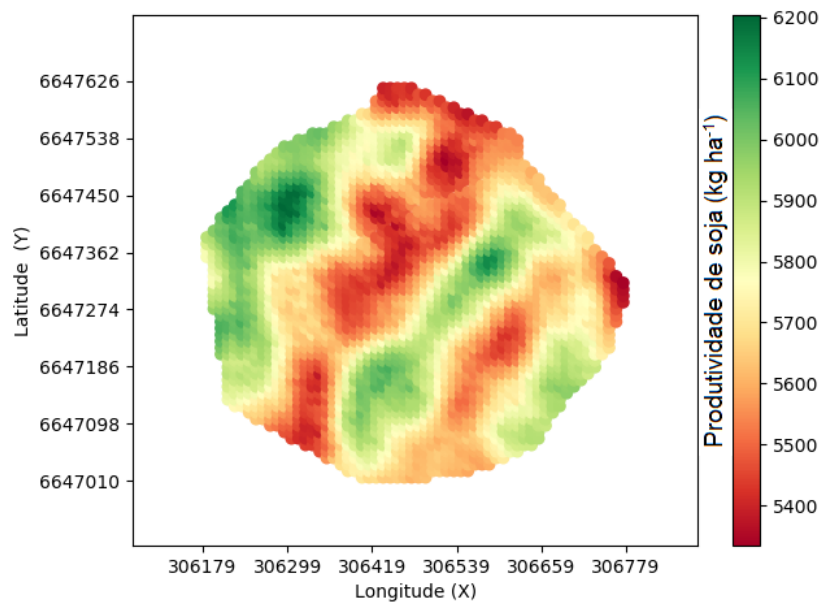
Na Figura 4 é apresentado o mapa de zonas de manejo, delimitadas com base na variabilidade temporal da CEa e os blocos com diferentes populações de plantas semeadas na área de estudos. A zona de manejo 1 (ZM1) representa a porção da área de estudos que apresentou maiores valores de CEa (65,1% da área) e a zona de manejo 2 (ZM2), a proporção da área com menores valores de CEa (34,9%). Nos locais fora das delimitações dos blocos, a população de plantas adotada foi aquela utilizada como padrão pela propriedade, com taxa alvo de 355.555 plantas por hectare.

Figura 4 – Mapa temático indicativo das zonas de manejo delimitadas e blocos com diferentes populações de plantas semeadas na área de estudos



Na Figura 5 é apresentado o mapa temático da variabilidade espacial da produtividade de soja.

Figura 5 – Mapa temático da variabilidade espacial da produtividade de soja



Foi observado que a produtividade de soja apresentou variabilidade na área, entretanto destaca-se um excelente potencial produtivo, visto que as menores produtividades mensuradas foram em torno de 5.400 kg ha⁻¹. Estes elevados patamares de produção são recorrentes nesta

área e justificados por vários fatores, sendo os principais: alta fertilidade química (mais de dez anos de uso de agricultura de precisão), sistema de semeadura direta, baixa resistência à penetração, rotação de culturas em inverno e verão, uso de culturas de cobertura e claro a presença da irrigação.

Na Tabela 3 é apresentado o resumo estatístico da CEa e da produtividade de soja, para as diferentes populações de plantas, cultivadas nas diferentes ZM.

Tabela 3 – Resumo estatístico descritivo da condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m⁻¹) e da produtividade de soja (PRD, kg ha⁻¹) para as diferentes populações de plantas estudadas (pop1, pop2 e pop3)

Zonas de Manejo	Variáveis	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão	CV (%)
ZM 1	CEa	5,77	10,39	16,85	1,62	15,64
	PRDpop1	4.327	5.564,466	6.900	548,364	9,85
	PRDpop2	4.344	5.517,956	6.950	491,259	8,90
	PRDpop3	4.914	5.888,522	7.044	395,263	6,71
ZM 2	CEa	6,82	8,57	11,99	1,38	16,07
	PRDpop1	4.348	5.459,04	7.052	663,787	12,16
	PRDpop2	4.404	5.880,636	7.053	528,401	8,99
	PRDpop3	4.383	5.712,32	6.951	492,847	8,63

Foi observado que, independente da ZM, elevados valores de produtividade foram alcançados na área. Para ZM1 o menor valor foi 5.517,956 kg ha⁻¹ e ZM2 foi de 5.459,04 kg ha⁻¹. Considerando apenas os menores valores de produtividade, o incremento em relação à média de produtividade estimada para o município na mesma safra já foi em torno de 70% (CONAB, 2021). As produtividades obtidas para cada população apresentaram comportamento uniforme dentro dos blocos tendo em vista os baixos CVs observados.

Na Tabela 4 é apresentado o resultado para o teste de médias t (p<0,05) para os valores de produtividade de soja (kg ha⁻¹) para as diferentes populações de plantas estudadas (pop1, pop2 e pop3). Não apresentaram diferença estatística significativa as médias de produtividade de soja observada para as populações pop1 (302.222 pl ha⁻¹) e pop2 (355.555 pl ha⁻¹), semeadas na ZM1 (maior CEa), pop2 e pop1; pop3(408.888 pl ha⁻¹) e pop2, alocadas nas ZM1 e ZM2 respectivamente. As produtividades destas duas últimas populações que não diferiram

estatisticamente, representam as maiores produtividades observadas neste estudo, sendo obtidos 5.888,52 kg ha⁻¹ com a pop3 na ZM1 (maior CEa) e 5.880,64 kg ha⁻¹ com a pop2 na ZM2 (menor CEa).

Tabela 4 – Teste de médias t (p<0,05) para os valores de produtividade de soja (kg ha⁻¹) para as diferentes populações de plantas estudadas (pop1, pop2 e pop3)

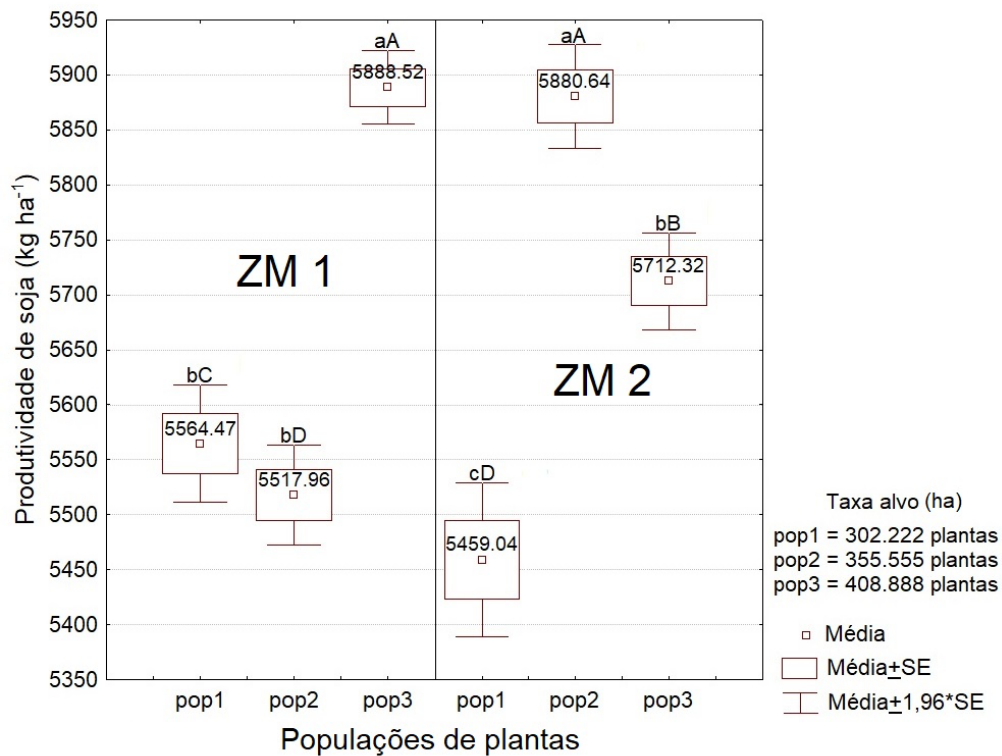
Interações ZM x pop	N ⁽¹⁾ grupo 1	N grupo 2	Média grupo 1	Média grupo 2	t-valor	g.l. ⁽²⁾	p-valor
ZM1pop1 x ZM1pop2	408	451	5.564,47	5.517,96	1,31	857,00	0,19
ZM1pop1 x ZM1pop3	408	533	5.564,47	5.888,52	-10,53	939,00	0,00
ZM1pop2 x ZM1pop3	451	533	5.517,96	5.888,52	-13,11	982,00	0,00
ZM2pop1 x ZM2pop2	348	478	5.459,04	5.880,64	-10,15	824,00	0,00
ZM2pop1 x ZM2pop3	348	487	5.459,04	5.712,32	-6,33	833,00	0,00
ZM2pop2 x ZM2pop3	478	487	5.880,64	5.712,32	5,12	963,00	0,00
ZM1pop1 x ZM2pop1	408	348	5.564,47	5.459,04	2,39	754,00	0,02
ZM1pop1 x ZM2pop2	408	478	5.564,47	5.880,64	-8,72	884,00	0,00
ZM1pop1 x ZM2pop3	408	487	5.564,47	5.712,32	-4,25	893,00	0,00
ZM1pop2 x ZM2pop1	451	348	5.517,96	5.459,04	1,44	797,00	0,15
ZM1pop2 x ZM2pop2	451	478	5.517,96	5.880,64	-10,82	927,00	0,00
ZM1pop2 x ZM2pop3	451	487	5.517,96	5.712,32	-6,04	936,00	0,00
ZM1pop3 x ZM2pop1	533	348	5.888,52	5.459,04	12,03	879,00	0,00
ZM1pop3 x ZM2pop2	533	478	5.888,52	5.880,64	0,27	1.009,00	0,79
ZM1pop3 x ZM2pop3	533	487	5.888,52	5.712,32	6,32	1.018,00	0,00

⁽¹⁾Número de pontos amostrais; ⁽²⁾Graus de liberdade

Os resultados apresentados na Tabela 4 são também apresentados na Figura 6, em forma de gráfico box-plot, objetivando evidenciar o comportamento da produtividade de soja, obtida para as diferentes populações de plantas alocadas nas diferentes zonas de manejo.

Figura 6 – Gráficos Box-Plot da produtividade de soja (kg ha⁻¹) observada para cada população de plantas em função da zona de manejo (ZM) na qual foram cultivadas. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste t (p<0,05), minúsculas para comparação da produtividade das diferentes populações de plantas na

mesma ZM e maiúsculas para comparações da produtividade das diferentes populações de plantas entre as ZM.



Analisando o gráfico, fica evidente que na ZM de maior CEa média (ZM1), a maior produtividade foi obtida pela maior população de plantas. Já para a ZM de menor CEa média (ZM2), a população intermediária foi a que apresentou maior produtividade.

Conforme constatado por Anjos & Mattiazzo (2000) a CEa apresenta relações com vários atributos de solo, sendo marcante a correlação positiva com teores de Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺, ou seja, quanto maior for a CEa, maiores serão os teores destes macronutrientes no solo. Isso ajuda a explicar a ocorrência de zonas de maior produtividade coincidentes com os maiores níveis médios de CEa.

O incremento na população de plantas de soja vem sendo utilizado em áreas comerciais visando um melhor desempenho produtivo em áreas de menor potencial. A tentativa é de favorecer o desenvolvimento da cultura da soja frente aos fatores limitantes encontrados no ambiente em questão. No caso da área em estudo, a ZM1 se mostrou responsiva a esta estratégia mesmo sendo considerada de alto potencial e com CEa média mais elevada.

Do outro lado, reduções de densidades de plantas de soja buscam não somente reduzir a competição intraespecífica, como também minimizar risco de acamamento, evitar perda precoce de folhas do terço inferior por sombreamento e gerar redução de custos com sementes

por parte do produtor. Como observado a ZM1 não apresentou resposta positiva em produtividade ao uso desta estratégia, mas a ZM2 sinalizou um ganho ao se reduzir de pop3 para pop2.

Estudando o ajuste na população de plantas em zonas de manejo, Gimenez et al. (2019) observaram que não houve efeitos sobre a produtividade da soja ocasionados pela variação da população de plantas, destacando a redução de população nestes casos como uma estratégia para obter maior lucratividade na área. Observação similar à que chegou Frigeri et al. (2019) demonstrando que as três cultivares trabalhadas não obtiveram perda de rendimento ao serem semeadas em menores densidades. Indo de encontro a esta oportunidade de redução de custos, se notou ainda que em ambientes de fertilidade equilibrada, o incremento da população de plantas pode resultar em um decréscimo da produtividade de soja (PESINI, 2019).

Na Tabela 5 é apresentada uma simulação para o ganho de produtividade adotando a população de plantas de melhor desempenho. Como na ZM2 a população de plantas de melhor desempenho foi também aquela adotada para todo o talhão (exceto nos blocos dos ensaios), o ganho de produtividade não foi simulado.

Tabela 5 – Estimativa de ganho de produtividade (PRD) adotando a população de plantas de melhor desempenho por zona de manejo

	PRD pop3 ZM1 (kg ha ⁻¹)	PRD média ZM1 (kg ha ⁻¹)	Diferença de PRD (kg ha ⁻¹)	área ZM1(ha)	Diferença de PRD ZM1 (kg)	Diferença de PRD em sacas
ZM1	5.888,52	5.731,45	157,07	16,73	2.627,78	43,80

Conforme apresentado na Figura 6, para a ZM1 a população de plantas que apresentou a maior produtividade foi a pop3 (408.888 pl ha⁻¹), sendo estimada em 5.888,52 kg ha⁻¹. A produtividade obtida nesta ZM1, estimada excluindo-se os blocos de testes das populações de plantas, foi de 5.731,45 kg ha⁻¹, portanto, 157,07 kg ha⁻¹ a menos. A ZM1 apresentou área de 16,73 ha, que multiplicados pela diferença de produtividade, equivale a 2.627,78 kg de soja, ou 43,80 sacas a mais na produção do talhão.

Tabela 6 – Estimativa de ganho de resultado líquido (R. Líq.) e retorno do investimento (ROI) com base nos custos de semente e preço da saca de soja na safra 2020/2021

	Ganho de PRD (kg ha ⁻¹)	Aumento de custo semente (R\$ ha ⁻¹)	Aumento Receita (R\$ ha ⁻¹)	Diferença R. Líq. (R\$ ha ⁻¹)	Retorno do Investimento (ROI)	Incremento R. Líqu. ZM1 estimado (R\$)
ZM1	157,07	88,80	445,03	+356,23	4,01	5.959,73

A possibilidade estimada de ganho em produtividade a partir do aumento de população na ZM1, indica que existem áreas de alto potencial que tem resposta positiva a esta variação, inclusive quando considerado o custo adicional deste ajuste, conforme Tabela 6. Se nota também a possibilidade de explorar uma variação maior de populações, tendo em vista que este foi um trabalho inicial exploratório para avaliar a resposta em cultivo irrigado. E se considerando que a CEa conseguiu delimitar essas zonas, torna-se esta uma ferramenta bastante útil para a tomada de decisão do produtor.

Quando se observa os registros pluviométricos (Fig. 7) da área na safra de estudo (2020/2021) e as lâminas de irrigação aplicadas via pivô central (Fig. 8) é possível constatar que o aspecto hídrico não apresentou nenhuma restrição ao desenvolvimento pleno da cultura, chegando a um total de 524 mm durante todo o ciclo. Dois pontos importantes a serem levados em consideração além da pluviometria são o material genético utilizado e a época de semeadura.

Figura 7 – Registro de precipitações em ordem cronológica durante o ciclo da cultura, com acumulados por período.

Precipitação		
Data	Precipitação (mm)	Acumulado (mm)
Novembro		
29/11/20	26.00	26.00
Dezembro		
02/12/20	45.00	45.00
12/12/20	7.00	52.00
13/12/20	10.00	62.00
19/12/20	15.00	77.00
Janeiro		
05/01/21	13.00	13.00
11/01/21	28.00	41.00
16/01/21	42.00	83.00
26/01/21	15.00	98.00
27/01/21	35.00	133.00
28/01/21	15.00	148.00
30/01/21	35.00	183.00
Fevereiro		
02/02/21	44.00	44.00
10/02/21	18.00	62.00
15/02/21	6.00	68.00
Março		
04/03/21	35.00	35.00
05/03/21	15.00	50.00
17/03/21	28.00	78.00
21/03/21	32.00	110.00
24/03/21	25.00	135.00
27/03/21	17.00	152.00
Total		506.0

Figura 8 – Registro de lâminas de irrigação aplicadas em ordem cronológica durante o ciclo da cultura, com acumulados por período.

Irrigações aplicadas		
Data	Irrigação aplicada (mm)	Lâmina acumulada (mm)
Novembro		
21/11/20	10.00	10.00
24/11/20	8.00	18.00
Total		18.0

No caso deste estudo, a cultivar Zeus possui uma característica muito marcante de baixa propensão ao engalhamento e maior dependência por populações mais elevadas, o comportamento apresentado demonstra a resposta positiva a um incremento de plantas quando o ambiente se demonstra bastante favorável ao desenvolvimento do cultivo. Quando se analisa a época de semeadura se percebe o enquadramento como final da janela indicada para o material na região, fator este que também tende a privilegiar a busca por populações maiores, visando um estímulo ao desenvolvimento vegetativo das plantas antes de uma floração precoce, sendo uma prática comum entre os produtores este incremento na densidade populacional em semeaduras mais tardias.

6 CONCLUSÕES

A utilização de ferramentas como a condutividade elétrica aparente (CEa) se mostrou efetiva na delimitação de zonas de manejo para este talhão e pode ser utilizada posteriormente como ferramenta para a variação de dose de outros insumos além de sementes.

Na zona de manejo de alta CEa obteve-se uma maior produtividade de soja ao se utilizar uma maior população de plantas ($408.888 \text{ pl ha}^{-1}$), ao passo que, na zona de menor CEa foi observada maior produtividade para a população de plantas intermediária ($355.555 \text{ pl ha}^{-1}$).

Este incremento de população na ZM1 se mostrou economicamente positivo ao produtor.

Neste trabalho foi observado que na zona de alta CEa a maior população de plantas respondeu de forma significativa em produtividade, enquanto que, na zona de baixa CEa, o comportamento não se repetiu, contrariando o posicionamento padrão esperado e abrindo uma janela para maiores aprofundamentos no assunto.

Sugere-se que mais estudos relacionados ao ajuste populacional de plantas da cultura da soja, em função da delimitação de zonas de manejo com base na variabilidade espacial da CEa, sejam conduzidos, com vistas a validar este método de tomada de decisão.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora não seja objeto de estudo deste trabalho há de se considerar a importância da elaboração de estudos avaliando este comportamento nos distintos cenários possíveis de ocorrência a campo, sendo possíveis de variáveis como diferentes tipos de solo, níveis de fertilidade, clima, latitude, épocas de semeadura, materiais genéticos, cultivos com presença ou não de irrigação, entre outros. Outro ponto bastante importante é a possibilidade do aumento da variação de população de plantas e avaliação de um número maior de populações-alvo.

REFERÊNCIAS

- ANJOS, A. R. M.; MATTIAZZO, M. E. Lixiviação de íons inorgânicos em solos repetidamente tratados com bio sólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 927-938, 2000.
- BERNARDI, A.C.C., *et al.* *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Alberto Carlos de Campos Bernardi, [et al.], editores técnicos. – Brasília, DF: Embrapa, 2014. 596 p.
- BETIOLI JÚNIOR, E., *et al.* Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n. 3, p. 971-982, maio/jun. 2012.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.7, p.849-856, 2003.
- BEUTLER, A.N., *et al.* Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.6, p.575-580, 2004.
- BONETTI, L. P. Distribuição da soja no mundo. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. (Ed.). **A soja no Brasil**. Campinas: Instituto de Tecnologia de Alimentos, 1981. p. 1-6.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria no 852 - Art. 1o Criar a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão – CBAP. **Diário Oficial da República Federativa** do Brasil, Brasília, DF, 21 set. 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/decreto/D10052.htm#:~:text=DECRETA%3A-,Art.,precis%C3%A3o%20e%20digital%20no%20Pa%C3%ADs. Acesso em: 15 de jun. de 2022.
- CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, v.25, n.1, p.183-188, 1995.
- CARLSON, J.B. Morphology. In: CALDWELL, B. E. (Ed.). **Soybean: production, improvement and uses**. Madison: American Society of Agronomy, 1973. p. 17-95.
- CENTURION, J.F.; DEMATTÊ, J.L.I. Efeito de sistemas de preparo de solo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivando soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.9, p.263-266, 1985.
- CHIG, L.A.; OLIVEIRA, E.F de; CRESTANI, A.B. Zonas de Manejo da Compactação do Solo. **Uniciências**, v. 18, n. 2, p. 85-90, Dez. 2014.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Acesso em: Maio de 2022.
- CONAB. **Série histórica de área e produção de grãos**. 2019. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 2 de outubro de 2019.
- COOPERATIVE EXTENSION SERVICE AMES. **How a soybean plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1994. 20p.

CORÁ, J.E., *et al.* Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 06, p. 1013-1021, 2004.

CORRECHEL, V.; SILVA, A. P. da; TORMENA, C. A; SANCHEZ, A. C. Resistência de um latossolo ao penetrômetro em dois sistemas de preparo de solo. *In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, p. 20, Rio de Janeiro:1997.

CORTEZ, J.W., *et al.* Avaliação da intensidade de tráfego de tratores em alguns atributos físicos de um Argissolo Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.3, p. 1000-1010. 2014.

CORWIN, D.L.; HENDRICKX, J.M.H. Electrical Resistivity: Wenner Array. In: SILVA, J.S. *Methods of Soil Analysis Part 4 Physical Methods*, Madison, Wisconsin, USA : **SSSA Book Series**, n. 5, p.1282-1287. 2002.

CORWIN, D.L.; LESCH, S.M. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture: Theory, Principles, and Guidelines. **Agronomy Journal**, v.95, n. 3, p. 471-471. 2003.

CUNHA, J.P.A.R.; VIEIRA, L.B.; MAGALHÃES, A. C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.10, p.1-7, 2002.

DIAS, Rodrigo Franco. **Diagnóstico da fertilidade do solo de áreas em implantação de agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. 2013. Dissertação (Mestrado em Agricultura de Precisão) – Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.

DOBERMANN, A.; GOOVAERTS, P.; NEUE, H. U. Scale-dependent correlations among soil properties yield maps. **Agronomy Journal**, v.96, n.1,p.285-297, 2004.

DURIGON, R. **Aplicação de técnicas de manejo localizado na cultura do arroz irrigado (Oryza sativa L.)**. 147 F. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria.

EMBRAPA. **História da Soja**. 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/historia>. Acesso em: 25 de setembro de 2019.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja: Região Central do Brasil 2004**. 2003. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/451526/tecnologias-de-producao-de-soja---regiao-central-do-brasil-2004>. Acesso em: 30 de setembro de 2019.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistemas de Produção, 1**. ISSN 1679-012 Versão Eletrônica - 3^a edição. Nov./2007. Cultivo do Milho. Editor Técnico: José Carlos Cruz. Embrapa Milho e Sorgo. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_sisal/arvore/CONT000fckl80cd02wx5e0a2ndxy9grdabq.html>

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica. 353p. 2013.

FLOWERS, M.D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic Ochraqualf in Northwest Ohio. **Soil and Tillage Research**, v.48, p.21-35, 1998.

FOLEGATTI, M.V., SILVA, A.P. da,; DE MARIA, I.C. Avaliação da resistência do solo utilizando penetrômetro e penetrógrafo. In: *XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, p.525. Piracicaba: 1990.

FOTCHT, D.; ROLOFF, G.; SCHIEBELBEIN, L. M. Benefícios agrônômicos, ambientais e monetários do uso da agricultura de precisão em diferentes cenários brasileiros. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO**, Piracicaba: ESALQ/USP, 2004.

FREELAND, R.S. Review of soil moisture sensing using soil electrical conductivity. **Transaction of the ASAE**, v. 32, n.6, p. 2190-2194, 1989.

FRIGERI, Ary Roberto et al. Épocas de semeadura e população de plantas para três cultivares de soja. **Acta Iguazu**, v. 8, n. 4, p. 41-52, 2019.

FU, Q.; WANG, Z.; QIUXIANG, J. Delineating soil nutrient management zones based on fuzzy clustering optimized by PSO. **Mathematical and Computer Modelling**, v.51, p. 1299-1305, 2010.

GAMMA DESIGN SOFTWARE, LLC. **GS+ Geostatistics for the Environmental Sciences**, version 7. 2006.

GIMENEZ, L. M.; CORTINOVE, L.; LEAL, M. Níveis de adubação e população de plantas de soja avaliados sob a perspectiva do manejo localizado. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 11, p. 26116-26121, 2019.

GOLDEN SOFTWARE, Inc. **Surface Mapping System – Surfer**, version 10.1.561. mar 2011.

IBGE. **Mapa exploratório de solos do Estado do Rio Grande do Sul**. 2002. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/tematicos/solos>. Acesso em: 28 de setembro de 2019.

JOHNSON, C.; ESKRIDGE, K., CORWIN, D. Apparent soil electrical conductivity: applications for designing and evaluating field-scale experiments. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, p. 181-202, 2005.

KIANG, Y. T.; GORMAN, M. B. Soybean. In: TANKSLEY, S. D.; ORTON, T. J. (Ed.). **Isozymes in plants genetics and breeding**: part B. Amsterdam: Elsevier, 1983. p. 295-328.

KING, J.; DAMPNEY, P.; LARK, R.; WHEELER, H.; BRADLEY, R.; MAYR, T. Mapping potential crop management zones within fields: use of yield-map series and patterns of soil physical properties identified by electromagnetic induction sensing. **Precision Agriculture**, v. 6, p. 167-181, 2005.

LARSON, W.E.; ROBERT, P.C. Farming by soil. In: LAL, R.; PIERCE, F. J. (Ed.). **Soil Management for sustainability**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1991. p. 103-112.

LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O. TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 20, n.1, p. 1-12, 1996.

LIMA, C.L.R., *et al.* Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.124, p.190-195, Aug. 2012.

LUIZ, M. C. P. Efeito da época de semeadura e população de plantas sobre o potencial produtivo e caracteres agrônômicos em soja. 2018, 64 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.757>.

MANTOVANI, E.C. **Agricultura de precisão na Embrapa**. Brasília: Embrapa Sede, 2006. 8p. (Embrapa Sede).

MASSRUHÁ, S.M.F.S.; LEITE, M.A. de A. Agro 4.0 - rumo à agricultura digital. In: MAGNONI JÚNIOR, L.; STEVENS, D.; SILVA, W. T. L. da; VALE, J. M. F. do; PURINI, S. R. de M.; MAGNONI, M. da G. M.; SEBASTIÃO, E.; BRANCO JÚNIOR, G.; ADORNO FILHO, E. F.; FIGUEIREDO, W. dos S.; SEBASTIÃO, I. (Org.). *JC na Escola Ciência, Tecnologia e Sociedade: mobilizar o conhecimento para alimentar o Brasil*. 2. ed. São Paulo: Centro Paula Souza, 2017. p. 28-35.

MEDINA, J.C. Introdução e evolução da soja no Brasil. In MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. (Ed.). **A Soja no Brasil**. Campinas: Instituto de Tecnologia de Alimentos, 1981. p. 18-25.

MILANI, L., *et al.* Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.28, p.591-598, 2006.

MIQUELONI, D.P.; Gianello, D.M.; Bueno, C.R.P.; Silva, P.C.M.; Mesquita, F.O. & Costa, T.K.G. Variabilidade espacial de atributos e perda de solo na definição de zonas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. vol.45, n.1, p.18-28, 2015.

MIRANDA, A. C. C.; VERÍSSIMO, A. M.; CEOLIN, A. C. Agricultura de Precisão: Um Mapeamento da Base da Scielo. GESTÃO. Org - **Revista Eletrônica de Gestão Organizacional**, v. 15, n. Ed. Especial, p. 129-137, 2017.

MOLIN, J.P.; RABELLO, L.M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola** [online]. 2011, v. 31, n. 1 [Acessado 30 Maio 2022] , pp. 90-101. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000100009>>. Epub 16 Mar 2011. ISSN 1809-4430. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000100009>.

MOLINI, J.P.; MAGALHÃES, R.P.; FAULIN, G.D.C. Análise espacial da ocorrência do índice de cone em área sob semeadura direta e sua relação com fatores do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 2, Jaboticabal May/Aug. 2006.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. ed. 4, 493 p. Rio de Janeiro, editora LTC. 2009.

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

MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos. Porto Alegre: Departamento de plantas de lavouras da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Evangraf, 2005.

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 America Journal**, v.44, n.5, p. 1216-1221, 1980.

NEW HOLLAND AGRICULTURE. Agricultura de precisão. 9p. Acesso em: 17/06/2022. Disponível em: < https://assets.cnhindustrial.com/nhag/lar/pt-br/assets/PLM/Telas-PLM/NHAG_FOLHETO_COMPLETO.pdf>

OLIVER, M.A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, v.113, p.56-69, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>.

OLIVEIRA, F.A.; FRANCHINI, J.C.; DEBIASI, H. Variabilidade espacial da produtividade da soja e da condutividade elétrica de um Latossolo Bruno. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (Ed.). *Agricultura de precisão: um novo olhar*. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2011. p. 153-156.

PEDROTTI, A., *et al.* Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um Planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 4, p. 709-715, Abril 2001.

PEREIRA, G.W.; VALENTE, D.S.M.; QUEIROZ, D.M.; COELHO, A.L. de F.; HURTADO, S.M.C.; COSTA, M.M. **Smart-Map plugin**. Disponível em: < <https://github.com/gustavowillam/SmartMapPlugin>> Acesso em: 27 de agosto de 2021.

PESINI, Felipe. **Relação da população de plantas de soja (*Glicine max* L.) por ambientes produtivos definidos pelo mapa de colheita**. 2019. Dissertação (Mestrado em Agricultura de Precisão) – Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.

PROCOPIO, S. de O.; SANTIAGO, A. D.; DE CARVALHO, H. W. L. Estudos de população de plantas de soja na região do SEALBA. 2018.

QGIS Development Team, 2020. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.

RABELLO, L.M.; BERNARDI, A.C. de C., INAMASU, R.Y. Condutividade elétrica aparente do solo. **Embrapa Instrumentação-Capítulo em livro científico**. Alice. p. 48-57. 2014.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, n.27, p.30-48, Julho/Dezembro de 2003.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em Ciência do Solo**, v.5, p.49-134, 2007.

RIBON, A.A.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; PEREIRA, G.T. Densidade e resistência à penetração de solos cultivados com seringueira sob diferentes manejos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.25, n.1, p.13-17, 2003.

RICHART, A. *et al.* Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v.26, n.3, p.321-344, 2005.

RODRIGUES JUNIOR, F.A.; VIEIRA, L.B.; QUEIROZ, D.M.; SANTOS, N.T. Geração de zonas de manejo para cafeicultura empregando-se sensor SPAD e análise foliar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.8, p.778–787, 2011.

RODRÍGUEZ-PÉREZ, J.R.; PLANT, R.E.; LAMBERT, J.J.; SMART, D.R. Using apparent soil electrical conductivity (ECa) to characterize vineyard soils of high clay content. **Precision Agriculture**, v.12, p.775–794, 2011.

ROQUE, M.W. *et al.* Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1827-1835, 2008.

RUBIN, S.A.L.; SANTOS, O.S. Progresso do melhoramento genético da soja no Estado do Rio Grande do Sul. i. Rendimento de grãos. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.2, p.139-147, 1996.

SARI, Eder Luís. **Tomada de decisão para operação de descompactação do solo com base em zonas de manejo**. 2020. Dissertação (Mestrado em Agricultura de Precisão) – Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020.

SÁ, M.A.C. de. Considerações teóricas sobre o cálculo da resistência mecânica do solo à penetração determinada com penetrômetros dinâmicos. *Documentos / Embrapa Cerrados* – Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 27 p.

SERRANO, J.M.; PEÇA, J.O.; SILVA, J.R.; SHAHIDIAN, S. Medição e mapeamento da condutividade eléctrica aparente do solo em pastagens. **Revista de Ciências Agrárias**, p. 5–14, 2010.

SILVA, R.B., *et al.* O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.973-983, 2003.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II – Grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.9-15, 2002.

SONG, X.; WANG, J.; HUANG, W.; LIU, L.; YAN, G.; PU, R. The delineation of agricultural management zones with high resolution remotely sensed data. **Precision Agriculture**, v.10, p.471-487, 2009.

STATSOFT, Inc. **STATISTICA (data analysis software system)**, version 7. 2004. www.statsoft.com.

STIRZAKER, R.J.; PASSIOURA, J.B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. **Plant Soil**, v.185, n.1, p.151-162, 1996.

STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, A.A.J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, p.207-212, 2002.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.333-339, 1996.

VALENTE, D. S. M. **Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão**. 2010. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.

VIEIRA, S.R. *et al.* Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. **Tópicos em Ciência do Solo**, v.2, p.1-45, 2002.

WAGNER, W., *et al.* Condutividade elétrica e sua relação com a resistência a penetração do solo visando orientar a escarificação mecânica de sítio-específico em lavoura de soja. **Revista Plantio Direto & Tecnologia Agrícola**, ed. 161, p. 14-26, jan-fev. 2018.

ZANÃO JÚNIOR, L.A., *et al.* Variabilidade espacial de atributos químicos em diferentes profundidades em um latossolo em sistema de plantio direto. **Revista Ceres**, v. 57, n.3, p.429-438, 2010.

ZANON, A.J. **Crescimento, desenvolvimento e potencial de rendimento de soja em função do tipo de crescimento e grupo de maturidade relativa em ambiente subtropical**. 179p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.