



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL



BEATRIZ REGINA DA SILVA SANTOS

**UTILIZAÇÃO DE ALGORITMO PARA ANÁLISE DE SINAL EM SISTEMA INTELIGENTE
DE BAIXO CUSTO PARA CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DO SOLO
E USO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO**

RECIFE

2025

BEATRIZ REGINA DA SILVA SANTOS

**UTILIZAÇÃO DE ALGORITMO PARA ANÁLISE DE SINAL EM SISTEMA INTELIGENTE
DE BAIXO CUSTO PARA CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DO SOLO
E USO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Di Tarso Dos Santos Sousa.

RECIFE
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

S237u Santos, Beatriz Regina da Silva.
Utilização de algoritmo para análise de sinal em sistema inteligente de baixo custo para caracterização da variabilidade espacial do solo e uso em agricultura de precisão / Beatriz Regina da Silva Santos. – Recife, 2025.
37 f.; il.

Orientador(a): Emanuel Di Tarso Dos Santos Sousa.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Agrícola e Ambiental, Recife, BR-PE, 2026.

Inclui referências.

1. Sensor. 2. Mapeamento do solo. 3. Variabilidade espacial. 4. Levantamento do solo 5. Geoestatística. I. Sousa, Emanuel Di Tarso Dos Santos, orient. II. Título

CDD 628

BEATRIZ REGINA DA SILVA SANTOS

**UTILIZAÇÃO DE ALGORITMO PARA ANÁLISE DE SINAL EM SISTEMA INTELIGENTE
DE BAIXO CUSTO PARA CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DO SOLO
E USO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Aprovado em: 17/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Emanuel Di Tarso Santos Sousa (Orientador) – DEAGRI/UFRPE
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profa. Dra. Amélia Laisy do Nascimento (Membro participante) – DEAGRI/UFRPE
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Marco Antonio Zanella (Membro participante) – DEAGRI/UFRPE
Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder saúde, forças e perseverança para enfrentar os desafios ao longo desta trajetória acadêmica.

Agradeço profundamente aos meus pais, Flavia Carneiro da Silva e Givanildo José Brito dos Santos, por seu apoio incondicional e incentivo constante. Às minhas avós, Irene Maria (*in memoriam*) e Eunice Albino (*in memoriam*), por sempre se esforçarem para me confortar nos momentos difíceis, e ao meu avô José Aécio, que sempre foi minha base e fonte de inspiração, garantindo que nunca me faltasse nada.

Registro também minha gratidão aos professores que tanto contribuíram para minha formação. Em especial, à professora Daniella de Moura Bezerra Amorim, por me introduzir ao mundo da mecanização, ensinar e apoiar com sensibilidade e sabedoria, muitas vezes sem perceber a importância de sua ajuda naquele momento. Ao professor Emanuel Di Tarso Dos Santos Sousa, por ser um educador ímpar, ensinar com paixão inspiradora, orientar com sabedoria e aconselhar nos momentos de dúvida; sua dedicação serve de modelo para a profissional que aspiro me tornar.

Agradeço ainda ao meu supervisor do estágio, Érico, e aos colegas de trabalho, Jânio, Flávio e Ester, que sempre se mostraram dispostos a me ensinar, compartilhar conhecimento e me ajudar a me tornar uma profissional melhor.

Expresso ainda minha gratidão ao meu amigo e parceiro de vida, Gabriel Fernando, que esteve ao meu lado durante toda a graduação, compartilhando risos, oferecendo apoio nos momentos de dificuldade e sempre me encorajando a seguir adiante. Agradeço também aos colegas de turma, que tornaram o percurso acadêmico mais leve e agradável; sem a presença e o apoio de cada um, essa jornada teria sido muito mais desafiadora.

RESUMO

O mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo apresenta potencial para caracterização da variabilidade espacial do solo, uma vez que pode se correlacionar com outros atributos do solo e reduzir o número de amostras necessárias, reduzindo assim os custos de análise. Entretanto, falhas de contato entre os eletrodos do sensor que mede a Condutividade elétrica aparente (CEa) e o solo podem comprometer a qualidade das medições. Dessa forma, este trabalho buscou avaliar um multisensores de baixo custo e verificar se o algoritmo desenvolvido para análise de sinal empregado nele interfere na qualidade dos dados obtidos. Inicialmente, realizou-se um teste de bancada em condições controladas para verificar a resposta do algoritmo. Utilizaram-se três resistores (8Ω , 47Ω e 470Ω), sendo a primeira leitura realizada com todos os eletrodos em contato com os resistores, e nas leituras seguintes, procedeu-se à desconexão gradual de cada eletrodo. Para cada condição testada foram realizadas 15 leituras. Tendo em vista que o coeficiente de variação (CV) das leituras variou de 2% para 20% quando houve perda de contato com o primeiro eletrodo, e de 2% a 6% quando foi retirada a conexão com os outros eletrodos de forma alternada, isso sugere que a interrupção ou alteração do contato entre os eletrodos afeta a estabilidade da leitura de CEa para todos os resistores avaliados. Posteriormente, foi realizada a avaliação em campo no talhão 5 da Estação experimental de cana-de-açúcar da UFRPE, onde 60 pontos foram coletados com informações de temperatura, CEa e umidade. Como resultado, tivemos que a CEa não apresentou correlação significativa a 5% de significância para maioria dos atributos analisados, com exceção da temperatura, que apresentou correlação médio negativa tanto com a CEa obtida incluindo as leituras sem contato (CEa_c) quanto com a CEa obtida apenas com leituras com contato adequado (CEa_s). Além disso, o nível de concordância entre as zonas de manejo testadas, variou de ruim a muito ruim para a maioria das variáveis consideradas.

Palavras-chave: Sensor;. Mapeamento do solo; Variabilidade espacial.; Levantamento do solo; Geoestatística.

ABSTRACT

Mapping the apparent electrical conductivity of soil has the potential to characterize the spatial variability of soil, as it can correlate with other soil attributes and reduce the number of samples required, thus reducing analysis costs. However, contact failures between the electrodes of the sensor measuring apparent electrical conductivity (ECa) and the soil can compromise the quality of the measurements. Therefore, this work aimed to evaluate a low-cost multisensor and verify if the algorithm developed for signal analysis employed in it interferes with the quality of the data obtained. Initially, a bench test was performed under controlled conditions to verify the algorithm's response. Three resistors (8Ω , 47Ω , and 470Ω) were used, with the first reading performed with all electrodes in contact with the resistors, and in subsequent readings, each electrode was gradually disconnected. Fifteen readings were performed for each condition tested. Given that the coefficient of variation (CV) of the readings ranged from 2% to 20% when there was a loss of contact with the first electrode, and from 2% to 6% when the connection with the other electrodes was removed alternately, this suggests that the interruption or alteration of contact between the electrodes affects the stability of the EC reading for all resistors evaluated. Subsequently, a field evaluation was carried out in plot 5 of the UFRPE sugarcane experimental station, where 60 points were collected with information on temperature, EC, and humidity. As a result, we found that EC did not show a significant correlation at the 5% significance level for most of the attributes analyzed, with the exception of temperature, which showed a negative average correlation with both the EC obtained including readings without contact (EC_c) and the EC obtained only with readings with adequate contact (EC_s). In addition, the level of agreement between the management zones tested ranged from poor to very poor for most of the variables considered..

Keywords: Sensor; Soil mapping; Spatial variability; Soil survey; Geostatistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Esquema de distribuição de eletrodos pela Matriz de Wenner com distância “x” entre eletrodos. Adaptado de (CORWIN; LESCH, 2005).	17
Figura 2 : Avaliação de bancada do sistema experimental com simulação de falha de contato em diferentes eletrodos. “ √ ” indica contato; “X”, indica ausência de contato.	18
Figura 3 : Distribuição georreferenciada dos 60 pontos amostrais no talhão 5 da Estação Experimental de Cana-de-açúcar da UFRPE, com espaçamento médio de 18 metros.....	19
Figura 4 : Sinal de tensão obtido na determinação da CEa com resistor de 47Ω em contato com todos eletrodos. (I - Sinal obtido na determinação da corrente elétrica, EP1 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 1, EP2 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 2, V - Sinal da diferença de potencial).....	22
Figura 5 : Sinal de tensão obtido na determinação da CEa com resistor de 47Ω em contato com todos eletrodos exceto o primeiro. (I - Sinal obtido na determinação da corrente elétrica, EP1 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 1, EP2 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 2, V - Sinal da diferença de potencial).....	23
Figura 6 : Sinal de tensão obtido na determinação da CEa com resistor de 47Ω em contato com todos eletrodos exceto o segundo. (I - Sinal obtido na determinação da corrente elétrica, EP1 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 1, EP2 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 2, V - Sinal da diferença de potencial).....	24
Figura 7 : Sinal de tensão obtido na determinação da CEa com resistor de 47Ω em contato com todos eletrodos exceto o terceiro. (I - Sinal obtido na determinação da corrente elétrica, EP1 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 1, EP2 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 2, V - Sinal da diferença de potencial).....	24
Figura 8 : Sinal de tensão obtido na determinação da CEa com resistor de 47Ω em contato com todos eletrodos exceto o quarto. (I - Sinal obtido na determinação da corrente elétrica, EP1 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 1, EP2 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 2, V - Sinal da diferença de potencial).	25
Figura 9 : Mapas de variabilidade espacial da CEa, Umidade e Temperatura do solo elaborados com os dados obtidos com o Smart-Sensor durante a coleta realizada no dia 06/12/2024 na estação experimental de cana-de-açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, em Carpina/PE.....	28
Figura 10 : Mapas da variabilidade espacial dos teores de areia grossa, areia fina, silte e argila do solo elaborados a partir da amostragem de solo realizada no dia 06/12/2024 no Talhão 5 da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar da Universidade Federal Rural de	

Pernambuco, em Carpina/PE	29
Figura 11 : Mapas da variabilidade espacial dos teores de cálcio, magnésio, alumínio e potássio, elaborados a partir da amostragem de solo realizada no dia 06/12/2024 no Talhão 5 da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, em Carpina/PE.....	30
Figura 12 :Mapas da variabilidade espacial da densidade aparente e do PH do solo, elaborados a partir da amostragem de solo realizada no dia 06/12/2024 no Talhão 5 da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, em Carpina/PE	30
Figura 13 : Gráfico de correlação de Pearson, onde “X” representa correlação não significativa a 5% de significância.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 : Escala de concordância de acordo com o valor de Kappa	21
Tabela 2 : Coeficiente de variação (CV) da CEa para cada resistor em diferentes condições de contato entre os eletrodos.	25
Tabela 3 : Parâmetros teóricos de semivariância ajustados no plugin Smart-Map do QGIS para os dados experimentais obtidos com o smart-sensor.	27
Tabela 4 : Parâmetros teóricos de semivariância ajustados no plugin Smart-Map do QGIS para os dados experimentais obtidos com o smart-sensor.	29
Tabela 5 : Parâmetros teóricos de semivariância ajustados no plugin Smart-Map do QGIS para os dados experimentais obtidos a partir da amostragem de solo realizada no talhão 5 da Estação Experimental de Cana de açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, em Carpina/PE	31
Tabela 6 : Nível de concordância das comparações entre os mapas de zona de manejo da CEa ajusta com a temperatura e umidade e as demais variáveis.	32
Tabela 7 : Nível de concordância das comparações entre os mapas de zona de manejo da CEa e as demais variáveis	33

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AP	Agricultura de Precisão
AD	Agricultura Digital
CEa	Condutividade Elétrica Aparente
CEa_c	CEa que inclui leituras sem contato
CEa_s	CEa obtida apenas com leituras com contato adequado
ZM CTU	Zona de manejo da CEa ajustada por temperatura e umidade
ZMCEa	Zona de manejo da CEa sem ajustes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	12
	2.1 Objetivo Geral	12
	2.2 Objetivos Específicos	12
3	REVISÃO DE LITERATURA	13
	3.1 Agricultura de Precisão e Digital	13
	3.2 Variabilidade Espacial e Temporal de solos	14
	3.3 Sensores para Detecção da Variabilidade Espacial de Solos	15
4	METODOLOGIA	16
	4.1 Equipamento Utilizado	16
	4.2 Avaliação de Bancada	17
	4.3 Avaliação de Campo	19
	4.3.1 Coleta de Dados	19
	4.3.2 Análise de Correlação	20
	4.3.3 Análise de Semivariância e Elaboração de Mapas	20
	4.3.4 ,Comparação dos Mapas de Variabilidade Obtidos	21
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
	5.1 Avaliação de Bancada	22
	5.2 Avaliação de Campo	26
	5.3 Resultado Índice Kappa	32
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

1 INTRODUÇÃO

Baseado nas ideias apresentadas por Sousa (2019) e Filho et al (2007), a Agricultura de Precisão busca atender as necessidades do solo otimizando a aplicação de insumos e conseqüentemente, reduzindo os custos de produção. Entretanto, para isso faz-se necessário o conhecimento da variabilidade espacial do solo e das plantas, o que demanda processos de amostragem e análise laboratorial.

No entanto, entende-se que os procedimentos de amostragem de solo e análises laboratoriais para a caracterização dessas variabilidades são caros e demorados. Além do custo elevado, este procedimento é propenso a erros em etapas como a amostragem, transporte, preparação de amostras e análise, o que dificulta a realização de uma amostragem ideal e satisfatória (Viscarra Rossel & Bouma, 2016 Apud Sousa, 2019).

Com base em Chig, Couto e Amorim (2010), o principal desafio da Agricultura de Precisão (AP) consiste na busca por metodologias que possibilitem a elaboração de mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo, com acurácia comprovada, baixo custo e menor número de análises físico-químicas em laboratório.

Nesse sentido, Grisso et al. (2009) apontam que o mapeamento da condutividade elétrica aparente (CEa) do solo é uma das medições mais simples, precisas e econômicas, visto que pode ser realizado com o uso de sensores, disponíveis atualmente para a caracterização da variabilidade dos atributos do solo. Além disso, a CEa apresenta correlação com outras propriedades, como a textura, a temperatura, o conteúdo de água, a capacidade de troca catiônica e os teores de alguns elementos, como cálcio, magnésio e potássio.

Com base nisso, a presente pesquisa buscou avaliar um multi sensor inteligente de baixo custo para Caracterização da Variabilidade Espacial do solo a partir das medições de CEa, Umidade e Temperatura e seu uso em Agricultura de Precisão.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar multi sensor inteligente de solo de baixo custo para determinação da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente, teor de água e temperatura do solo.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o desempenho do algoritmo de análise de sinal para determinação de condutividade elétrica aparente do solo implementado no multi sensor inteligente;
- Avaliar a influência do algoritmo de análise de sinal sobre a variabilidade espacial das variáveis obtidas por meio do multi sensor inteligente;
- Avaliar a influência do algoritmo de análise de sinal sobre a correlação linear entre a condutividade elétrica aparente obtida por meio do multisensor e os atributos físicos e químicos do solo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Agricultura de Precisão e Digital

De acordo com a definição adotada pela Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão, vinculada ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, a Agricultura de Precisão refere-se a um conjunto de ferramentas e tecnologias aplicadas para permitir um sistema de georreferenciamento agrícola baseado na variabilidade espacial e temporal da unidade produtiva, com o objetivo de aumentar o retorno econômico e reduzir o impacto ambiental (BRASIL, 2014, p. 6, apud Molin; Amaral; Colaço, 2015).

Nesse contexto, Manzatto et al. (1999, apud Tschiedel e Ferreira, 2002), complementam que a Agricultura de Precisão consiste em aplicar os insumos no local correto, no momento adequado e nas quantidades necessárias à produção agrícola, em áreas cada vez menores e mais homogêneas, conforme as condições tecnológicas e os custos envolvidos o permitam.

Em consonância com essas definições, Gebbers e Adamchuk (2010) destacam que a Agricultura de Precisão compreende um conjunto de tecnologias integradas que envolve sensores, sistemas de informação, máquinas aprimoradas e gestão orientada por dados, com o propósito de otimizar a produção agrícola considerando a variabilidade e as incertezas inerentes aos sistemas produtivos. Essa abordagem possibilita o uso mais eficiente dos recursos disponíveis e contribui de forma significativa para a sustentabilidade e o aprimoramento contínuo do setor agrícola.

Complementando essas abordagens, Wolfert et al. (2017) ressaltam que a Agricultura Digital expande os conceitos da Agricultura de Precisão ao incorporar dados em tempo real, considerando contexto e situação, para apoiar a tomada de decisões no manejo agrícola. Essa abordagem possibilita respostas rápidas a alterações inesperadas nas condições operacionais, por meio de recursos tecnológicos dotados de assistência inteligente na

implementação, manutenção e utilização das ferramentas, promovendo maior eficiência e adaptabilidade nas operações agrícolas. Dessa forma, observa-se que o avanço da Agricultura de Precisão para Agricultura Digital, evidencia a crescente integração de tecnologias e dados em tempo real, proporcionando maior eficiência, adaptabilidade e sustentabilidade no manejo agrícola.

3.2 Variabilidade Espacial e Temporal de solos

De acordo com Filho et al. (2007), por mais uniforme que o solo seja, este apresenta variações nos seus atributos físicos e químicos. Mesmo entre solos pertencentes a uma mesma classe, verifica-se variação espacial de determinados atributos a curtas distâncias, em grau suficiente para interferir na produtividade das culturas. Nesse sentido, considerando que essa variabilidade deve necessariamente ser incorporada aos procedimentos e técnicas aplicados na agricultura, torna-se essencial conhecê-la afim de otimizar a aplicação de corretivos, fertilizantes e água, além de reduzir as despesas com coletas de amostras no campo e, conseqüentemente, com análises laboratoriais.

Nesse contexto, as medições geoespaciais da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) apresentam-se como métodos confiáveis e frequentemente utilizados para caracterizar a variabilidade espacial das propriedades edáficas, incluindo atributos como: textura, densidade do solo, PH e os teores de alumínio, cálcio, magnésio e potássio. (Corwin e Plant, 2005). Para o mapeamento desta variabilidade, o processo de amostragem é de suma importância, uma vez que possibilita conhecer a fertilidade e as características que influenciam a produtividade. Além disso, o procedimento em grade regular é o mais utilizado, sendo a densidade amostral ajustada conforme a área, a cultura existente, bem como o conhecimento prévio e a análise visual da variabilidade presente no talhão (Grego et al., 2020).

No estudo conduzido por Brocca et al. (2010), a variabilidade temporal é abordada de forma implícita, ao se considerar as flutuações da umidade do solo em diferentes períodos de observação. A partir disso, pode-se compreender que o termo refere-se às variações que os atributos do solo apresentam ao longo do tempo devido aos processos naturais ou às práticas de manejo do solo. Dessa forma, o conhecimento da variabilidade espacial e temporal do solo mostra-se fundamental para agricultura de precisão.

3.3 Sensores para Detecção da Variabilidade Espacial de Solos

Conforme citado anteriormente, a CEa é amplamente utilizada para mensurar a variabilidade espacial de solos. Nesse sentido, Grisso et al (2009) mencionam que há dois tipos de sensores disponíveis comercialmente para medir a CEa do solo: sensores de contato e sensores sem contato, sendo o resultado de ambos comparáveis.

Grisso et al (2009), descrevem como sensores de contato, aqueles que utilizam relhas como eletrodos para estabelecer contato direto com o solo e medir a CEa. Nesse modelo, dois a três pares de relhas são montados numa barra, sendo um par responsável por fornecer corrente elétrica ao solo (eletrodos transmissores) e os demais por medir a queda de tensão entre eles (eletrodos receptores). Os dados obtidos são registrados em um dispositivo juntamente com informações de localização fornecidas por um Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS). Esse tipo de sensor é amplamente utilizado em AP por permitir o mapeamento de grandes áreas rapidamente, sem interferências elétricas externas. No entanto, devido o seu tamanho, seu uso em pequenas áreas é limitado. Atualmente, a Stara S.A. fabrica dispositivos de medição de CEa do tipo contato, capazes de realizar leituras em duas profundidades, 30 cm e 90 cm.

Já os sensores sem contato funcionam com base no princípio da indução eletromagnética (EMI), utilizando um par de bobinas suspensas sobre o solo. Enquanto uma bobina gera um campo eletromagnético, induzindo corrente na camada superficial do solo, a outra detecta a corrente gerada, sendo a intensidade do campo eletromagnético secundário proporcional à condutividade elétrica aparente (CEa) do solo. Esse método apresenta limitações, como a sensibilidade à presença de metais próximos, que interferem no campo magnético e comprometem a precisão das medições, e a influência da temperatura ambiente, que pode variar ao longo do período de coleta, dificultando a obtenção de dados consistentes durante longas sessões de campo (GRISSE et al., 2009; CANAL FILHO et al., 2024).

Em pesquisa realizada por Igboama e Ugwu (2011), em que a configuração de Wenner foi adotada, os autores explicam que a condutividade elétrica aparente do solo depende do espaçamento entre os eletrodos e pode ser obtida a partir da equação a seguir:

$$\rho_a = \frac{2\pi a \Delta V}{I} \quad (1)$$

Em que, ρ_a é a resistividade elétrica aparente, a é o espaçamento entre os eletrodos, ΔV é a diferença de potencial mensurada nos eletrodos internos e I é a corrente elétrica aplicada pelos eletrodos externos. Dessa forma, a condutividade elétrica aparente (CEa) do solo pode ser obtida a partir do inverso da resistividade (ρ_a).

4 METODOLOGIA

4.1 Equipamento Utilizado

O sistema de aquisição de dados avaliado, denominado sistema inteligente, integra o sensor denominado *Smart Sensor*, desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal de Viçosa (UFV), e foi desenvolvido com circuitos eletrônicos destinados à determinação da condutividade elétrica aparente do solo, com base nos circuitos apresentados por Queiroz et al. (2020) e empregados por Sousa et al. (2021). O circuito eletrônico voltado para determinação do teor de água foi inspirado no circuito apresentado por Sousa et al. (2023), enquanto a medição de temperatura foi realizada por meio de um sensor de temperatura do tipo *Resistance Temperature Detector* (RTD), modelo PT100.

Os circuitos e sensores foram integrados a um microcontrolador ESP32, programado em linguagem C++ através da plataforma de programação IDE Arduino, para estabelecer comunicação com um tablet via Bluetooth LE 5.0, permitindo a operação do sistema através de uma interface gráfica desenvolvida para Android. Essa interface foi programada em linguagem Java na plataforma *MIT App Inventor*.

A determinação da condutividade elétrica aparente do solo pelo sistema inteligente baseia-se no princípio da resistividade elétrica, utilizando quatro eletrodos metálicos de alta condutividade (alumínio e aço inoxidável), dispostos com espaçamento de 30 cm entre eles. A disposição dos eletrodos segue a configuração de Wenner, conforme descrita por Corwin e Lesch (2005), ilustrada na Figura 1. De acordo com Calamita et al. (2012), nessa configuração os quatro eletrodos são alinhados e igualmente espaçados, sendo a corrente alternada aplicada aos eletrodos externos, enquanto os eletrodos internos são responsáveis pela medição da diferença de potencial.

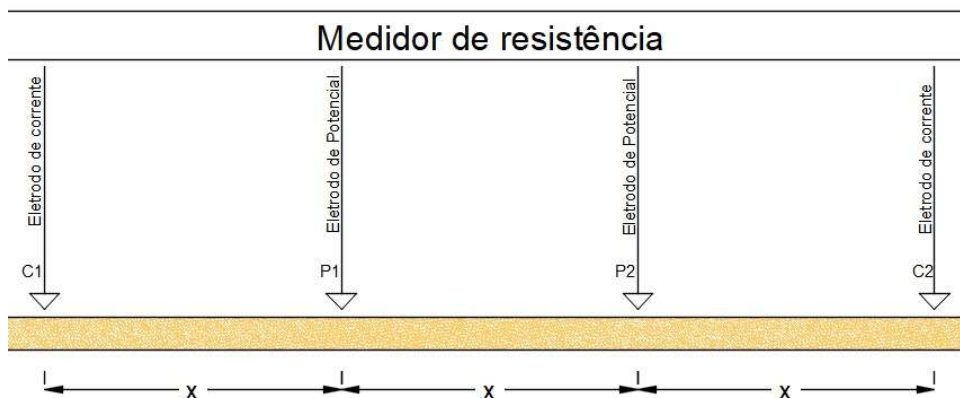


Figura 1: Esquema de distribuição de eletrodos pela Matriz de Wenner com distância “x” entre eletrodos.

Adaptado de (CORWIN; LESCH, 2005).

O sistema inteligente utilizado, integra sensores para leitura da CEa, do teor de água e da temperatura do solo, considerando que estas duas últimas variáveis influenciam a primeira, conforme descrito por Corwin e Lesch (2005) e Sousa et al. (2023). Assim, espera-se que os valores de CEa corrigidos em função do teor de água e da temperatura sejam mais fortemente associados a outros atributos físicos e químicos do solo. Dessa forma, é provável que o uso da CEa, seja mais eficiente no direcionamento da amostragem do solo.

Considerando a importância da CEa no direcionamento da amostragem de solo, é essencial que a confiabilidade dos dados seja garantida, a fim de possibilitar medições mais precisas, correções mais adequadas e a geração de mapas coerentes, que sirvam de apoio nas decisões do manejo em agricultura de precisão.

Desse modo, para aumentar a confiabilidade dos dados adquiridos, a determinação da condutividade elétrica aparente (CEa) contou com a implementação de uma versão aprimorada do algoritmo de análise de sinal proposto por Sousa et al. (2021). Esses autores destacam que sensores considerados inteligentes apresentam características como processamento dedicado de sinal e verificação de falhas nas leituras. A data, a hora e as coordenadas geográficas dos pontos de medição da aquisição dos dados, foram obtidas por meio do receptor de sistema de navegação global por satélites (GNSS) integrado ao tablet conectado ao sistema.

4.2 Avaliação de Bancada

Em primeiro momento foi realizado o teste de bancada, no qual foram empregados três resistores distintos, com resistências de 8Ω , 47Ω e 470Ω , respectivamente, sendo induzido o não contato com os eletrodos de forma individual. Dessa forma, a primeira leitura

foi realizada com os resistores conectados aos quatro eletrodos; na segunda leitura, o resistor do primeiro eletrodo foi desconectado; na terceira leitura, procedeu-se à desconexão do resistor do segundo eletrodo, sendo este o eletrodo de potencial (POT) 01 e assim sucessivamente. Ao todo, foram realizadas 15 leituras para cada condição testada, a fim de verificar a variabilidade das respostas para a mesma condição experimental.

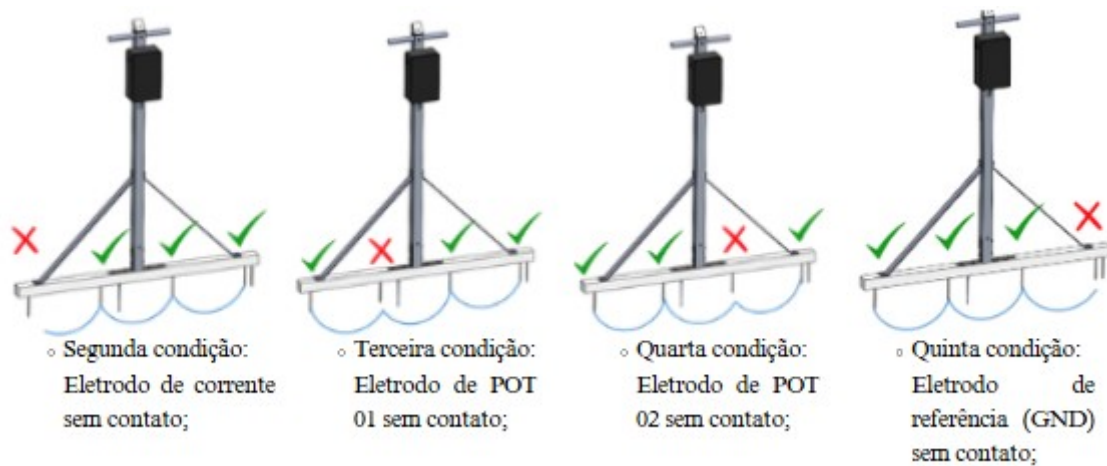


Figura 2: Avaliação de bancada do sistema experimental com simulação de falha de contato em diferentes eletrodos. “✓” indica contato; “X”, indica ausência de contato.

Além disso, visando comparar a variabilidade dos valores de CEa quando os contatos foram alternados para um mesmo resistor, calculou-se o coeficiente de variação (CV) para cada condição testada. O CV foi obtido pela razão entre o desvio padrão e a média dos dados, multiplicada por 100, conforme apresentado na Equação 2, em que S representa o desvio padrão e \bar{x} corresponde à média dos valores analisados.

O desvio padrão foi determinado pela raiz quadrada da variância, conforme expresso na Equação 3. A variância, por sua vez, foi obtida conforme a Equação 4, em que X_i representa cada valor individual da amostra e n indica o número total de elementos da amostra.

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 \quad (2)$$

$$S = \sqrt{S^2} \quad (3)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n}}{n - 1} \quad (4)$$

A avaliação da condição de satisfação dos gráficos gerados baseou-se em dois critérios principais: (i) frequência próxima de 20% do valor de referência adotado, correspondente a 10 Hz, e (ii) conformidade do sinal quanto ao formato de onda, o qual deveria apresentar configuração quadrada e simétrica, com cristas e vales de amplitudes equivalentes nos eixos positivo e negativo, conforme os critérios apresentados por Sousa et al (2021)

4.3 Avaliação de Campo

4.3.1 Coleta de Dados

Após a etapa de bancada, foi realizado o teste em campo, conduzido na Estação Experimental de Cana-de-açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), especificamente no talhão 5, que possui área aproximada de 19.000 m². Para este experimento, foram definidos 60 pontos amostrais, com espaçamento médio de 18 metros entre si. Em cada ponto, num raio de 2 metros, coletaram-se cinco amostras simples de solo, as quais foram homogeneizadas para compor uma amostra composta posteriormente encaminhada a laboratório certificado para análise de rotina, contemplando parâmetros químicos e físicos.



Figura 3: Distribuição georreferenciada dos 60 pontos amostrais no talhão 5 da Estação Experimental de Cana-de-açúcar da UFRPE, com espaçamento médio de 18 metros.

4.3.2 Análise de Correlação

De modo semelhante ao ensaio anterior, empregou-se o sensor Smart-Sensor, desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal de Viçosa, para a mensuração da condutividade elétrica aparente (CEa), da temperatura e da umidade do solo (QUEIROZ et al., 2020; SOUSA et al., 2023). Os dados obtidos foram submetidos a análise de correlação de Pearson a 5% de significância, por meio do comando `cor.test` no software R na versão 4.4.3, de forma a avaliar as relações entre os valores de CEa e os atributos físico-químicos do solo.

Nesse contexto, empregou-se a correlação de Pearson para medir a correlação linear entre as variáveis analisadas. Segundo Paranhos, et al. (2014), esse coeficiente é definido como a associação linear entre variáveis quantitativas e varia entre -1 e 1. Em que, quanto mais próximo de -1 ou 1, mais forte é o nível de associação linear entre as variáveis. Em contrapartida, quanto mais próximo a zero, menor é a associação entre as variáveis. Sendo zero, o indicativo de ausência de correlação (PARANHOS, et al. 2014). No presente estudo, a análise correlação foi realizada entre a CEa_c e os demais atributos do solo, bem como entre a CEa_s e os atributos analisados, incluindo textura do solo, PH, densidade, do solo e os teores de cálcio, magnésio, alumínio e potássio.

4.3.3 Análise de Semivariância e Elaboração de Mapas

Para a construção dos mapas de variabilidade espacial, os dados obtidos tanto pelo sistema inteligente quanto pelas análises laboratoriais das amostras de solo foram inicialmente submetidos a um processo de depuração, com o objetivo de remover valores considerados discrepantes. Essa etapa foi realizada por meio do *plugin* Smart-Map (PEREIRA et al., 2022) o qual possibilita a identificação e remoção desses valores antes da execução da análise de semivariância.

Em seguida, aplicaram-se análises de semivariância e krigagem ordinária no software QGIS versão 3.28.3 (QGIS Development Team, Open Source Geospatial Foundation, Chicago, IL, EUA). Sendo a krigagem ordinária um método univariado de inferência espacial que usa a dependência no espaço expressa no semivariograma/variograma entre amostras vizinhas para estimar valores em qualquer posição da área de estudo, sem tendência e com variância mínima, tornando-se um ótimo estimador (DANTAS; OLIVEIRA, 2021). Além disso, com o auxílio do *plugin* Smart-Map (PEREIRA et al., 2022), os parâmetros da semivariância foram ajustados de modo a reduzir ao máximo os erros na validação cruzada.

4.3.4 ,Comparação dos Mapas de Variabilidade Obtidos

Para comparar os mapas das variáveis obtidas, inicialmente foram gerados mapas de manejo individuais para cada variável. Esses mapas foram construídos no QGIS versão 3.28.3 com o auxílio do plugin Smart Map (PEREIRA et al., 2022), em que utilizou-se o Índice de Desempenho Fuzzy (FPI) e a Entropia de Classificação Normalizada (NCE) para determinar o número ideal de zonas de manejo para cada variável. Após determinação do número ideal de zonas de manejo para cada variável, foi calculada a média do número de zonas, sendo esta igual a 5, permitindo gerar os mapas de todas as variáveis com o mesmo número de zonas, de modo a possibilitar a comparação direta. A comparação dos mapas se deu em duas condições, (i) - O mapa de manejo da CEa ajustado pela Temperatura e Teor de umidade, comparado aos mapas dos demais atributos do solo; (ii) - O mapa de manejo da CEa, comparado aos mapas dos demais atributos do solo. Com os mapas padronizados, foi então calculado o índice Kappa utilizando a extensão GRASS GIS versão 8.2.1, por meio do comando *r.kappa*, para avaliar o grau de concordância entre as zonas de manejo.

A avaliação do sistema proposto foi realizada por meio da comparação entre os mapas das variáveis obtidas pelo sistema e os mapas dos atributos físicos e químicos do solo. Essa comparação utilizou o índice Kappa, validado pela estatística z com nível de significância de 5%. Adicionalmente, foi avaliado o erro na validação cruzada da CEa, com o sistema operando com o algoritmo de análise de sinal habilitado e desabilitado. Espera-se que a estimativa da CEa por krigagem apresente erros significativamente menores quando o algoritmo estiver habilitado, proporcionando ganhos relevantes no direcionamento da amostragem do solo e na aplicação de práticas de agricultura de precisão.

Assim, para interpretar o nível de concordância entre os mapas das zonas de manejo, os valores dos Índices Kappa obtidos nas comparações entre os mapas de manejo, foram classificados de acordo com a Tabela 1, conforme os parâmetros apresentados por Landis; Koch (1977, apud Sousa 2015).

Tabela 1: Escala de concordância de acordo com o valor de Kappa

Kappa	Nível de Concordância
< 0	Muito Ruim
0 - 0,20	Ruim
0,21 - 0,40	Razoável
0,41 - 0,60	Boa
0,61 - 0,80	Muito Boa
0,81 - 1	Excelente

Fonte: LANDIS; KOCH (1977 apud SOUSA 2015)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Avaliação de Bancada

Para primeira condição de avaliação, a leitura realizada com o resistor de $47\ \Omega$ e todos os eletrodos devidamente conectados, obteve-se o resultado apresentado na Figura 4.

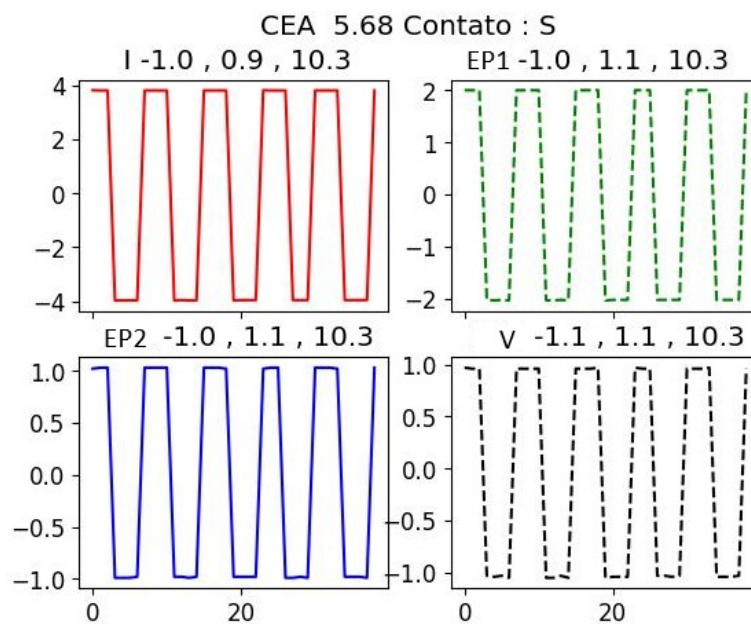


Figura 4: Sinal de tensão obtido na determinação da CEa com resistor de 47Ω em contato com todos eletrodos. (I - Sinal obtido na determinação da corrente elétrica, EP1 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 1, EP2 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 2, V - Sinal da diferença de potencial).

Observa-se que o algoritmo identificou contato em todos os eletrodos, com valor de CEa igual a $5,68\ \text{mS/m}$, frequência constante de $10,3\ \text{Hz}$ e ondas simétricas, resultados que se encontram dentro dos parâmetros esperados. A confirmação do contato em todos os eletrodos é indicada na informação localizada na parte superior do gráfico, onde se lê "Contato: S". Quando o contato do resistor com o primeiro eletrodo foi removido, obteve-se a resposta apresentada na Figura 5.

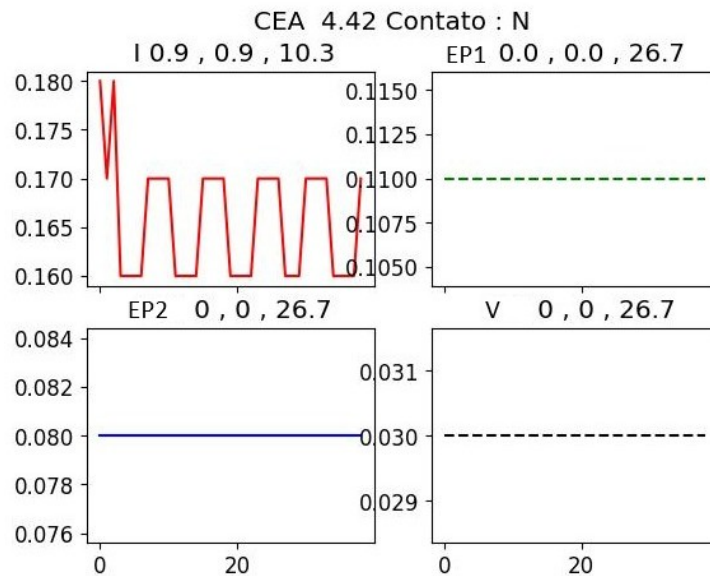


Figura 5: Sinal de tensão obtido na determinação da CEa com resistor de 47Ω em contato com todos eletrodos exceto o primeiro. (I - Sinal obtido na determinação da corrente elétrica, EP1 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 1, EP2 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 2, V - Sinal da diferença de potencial)

Verificou-se que o algoritmo não identificou o contato do resistor com o eletrodo, não apresentou frequência próxima à esperada e não evidenciou ondas simétricas, não atendendo, portanto, aos parâmetros estabelecidos. Além disso, a CEa apresentou valores muito superiores aos esperados, comportando-se como se não houvesse resistência no sistema. De forma semelhante, quando o contato do resistor com o segundo eletrodo foi removido, o algoritmo igualmente não identificou o contato, não atingiu a frequência prevista na leitura de potencial 01 e não apresentou ondas simétricas, deixando de atender aos parâmetros desejados, conforme ilustrado na Figura 6.

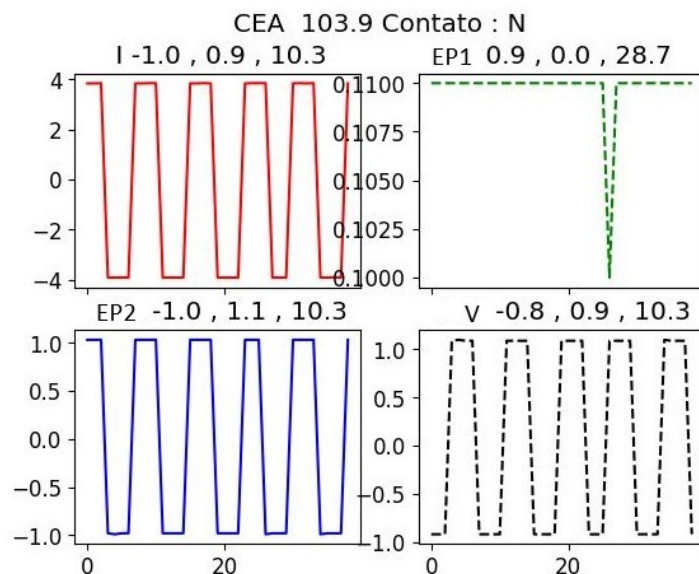


Figura 6: Sinal de tensão obtido na determinação da CEa com resistor de 47Ω em contato com todos eletrodos exceto o segundo. (I - Sinal obtido na determinação da corrente elétrica, EP1 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 1, EP2 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 2, V - Sinal da diferença de potencial).

Quando o contato do resistor com o terceiro eletrodo foi removido, o algoritmo não identificou o contato nem registrou o sinal do eletrodo de potencial 2. Dessa forma, a diferença de potencial do solo permaneceu equivalente ao potencial 1, conforme ilustrado na Figura 7.

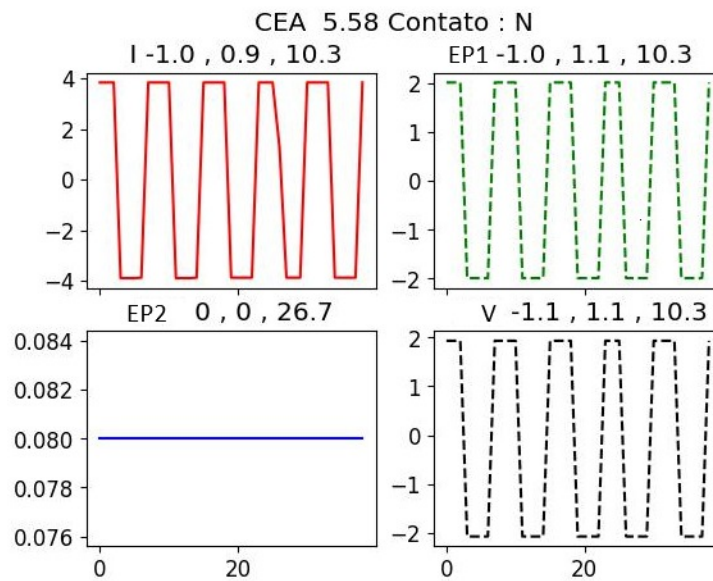


Figura 7: Sinal de tensão obtido na determinação da CEa com resistor de 47Ω em contato com todos eletrodos exceto o terceiro. (I - Sinal obtido na determinação da corrente elétrica, EP1 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 1, EP2 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 2, V - Sinal da diferença de potencial).

Entretanto, ao ser interrompido o contato do resistor com o quarto eletrodo, o algoritmo, ainda que não identifique o contato, é capaz de realizar a leitura. Toda via, os resultados obtidos não são satisfatórios, uma vez que as ondas não apresentaram simetria, exibindo apenas valores positivos, além de valores de CEa muito inferiores ao esperado, conforme evidenciado na Figura 8.

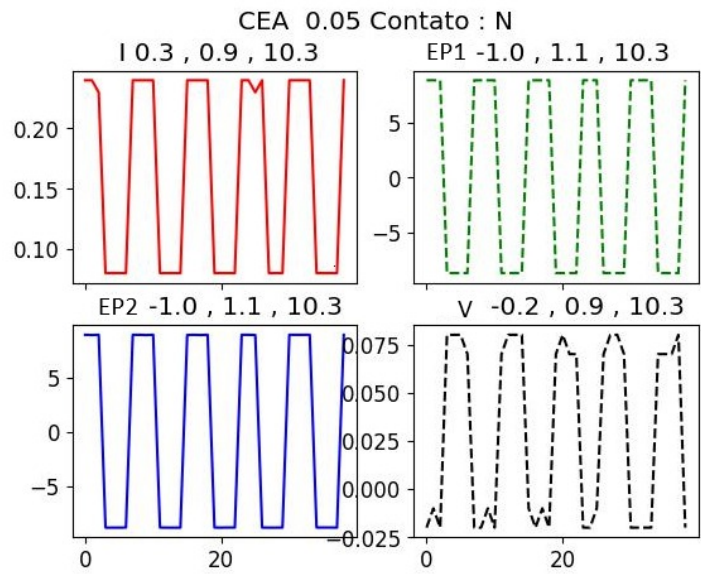


Figura 8: Sinal de tensão obtido na determinação da CEa com resistor de 47Ω em contato com todos eletrodos exceto o quarto. (I - Sinal obtido na determinação da corrente elétrica, EP1 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 1, EP2 - Sinal obtido na leitura do eletrodo de potencial 2, V - Sinal da diferença de potencial).

Ao calcular o coeficiente de variação da CEa para cada resistor utilizado, considerando a alternância dos contatos do eletrodo, obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 2. Observa-se que, para um mesmo resistor, o coeficiente de variação tende a aumentar quando o contato com o eletrodo é alterado. Por exemplo, ao analisar o resistor de 8Ω, nota-se que o CV é de 2% na condição em que todos os eletrodos estão em contato com os resistores, mas aumenta para 20% quando se força o não contato com o primeiro eletrodo, mantendo-se entre 2% e 6% quando o contato é alternado entre o segundo, terceiro e quarto eletrodos.

Tabela 2: Coeficiente de variação (CV) da CEa para cada resistor em diferentes condições de contato entre os eletrodos.

Resistor (Ω)	Coeficiente de variação	Condição testada
8	2%	Todos os contatos com o eletrodo
47	1%	Todos os contatos com o eletrodo
470	3%	Todos os contatos com o eletrodo
8	20%	Todos os contatos EXCETO O 1º eletrodo
47	1%	Todos os contatos EXCET O 1º eletrodo
470	7%	Todos os contatos EXCETO O 1º eletrodo
8	3%	Todos os contatos EXCETO O 2º eletrodo
47	0%	Todos os contatos EXCETO O 2º eletrodo
470	4%	Todos os contatos EXCETO O 2º eletrodo
8	2%	Todos os contatos EXCETO O 3º eletrodo
47	1%	Todos os contatos EXCETO O 3º eletrodo

470	0%	Todos os contatos EXCETO O 3º eletrodo
8	6%	Todos os contatos EXCETO O4º eletrodo
47	25%	Todos os contatos EXCETO O4º eletrodo
470	11%	Todos os contatos EXCETO O4º eletrodo

Esse comportamento demonstra que a interrupção ou alteração do contato entre os eletrodos afeta a estabilidade da leitura de CEa para todos os resistores avaliados. De modo geral, quando todos os eletrodos mantêm contato com o resistor, o CV permanece baixo, não ultrapassando 3%, o que indica boa repetibilidade. No entanto, a ausência de contato de um dos eletrodos provoca aumento expressivo na variabilidade, como observado no resistor de 8Ω, em que o CV passou de 2% para 20%, quando o contato com o 1º eletrodo foi retirado. Comportamento análogo ocorreu nos resistores de 47Ω e 470Ω que apresentaram elevação significativa do CV, especialmente quando o 4º eletrodo foi desconectado.

Esses resultados sugerem que a ausência de contato com eletrodos específicos compromete a estabilidade das medições de forma mais acentuada. Situação análoga foi descrita por Zimmermann e Huisman (2023), que descrevem que impedâncias de contato heterogêneas, causadas por má conexão, rugosidade ou irregularidades na superfície dos eletrodos, geram instabilidade nas medições de resistividade, afetando significativamente a amplitude e a fase dos sinais elétricos. Portanto, para reduzir a variabilidade das leituras torna-se fundamental garantir condições adequadas de contato entre os eletrodos.

5.2 Avaliação de Campo

Na elaboração dos mapas de variabilidade espacial, empregaram-se modelos matemáticos otimizados para minimizar o erro quadrático e maximizar o coeficiente de determinação. A Tabela 3 apresenta os dados utilizados na elaboração dos mapas de condutividade elétrica aparente, nos quais CEa_c corresponde a condutividade elétrica aparente obtida considerando também as leituras em que os eletrodos não estavam em contato com solo, enquanto que a CEa_s representa a condutividade elétrica aparente considerando apenas as leituras em que houve contato adequado dos eletrodos com o solo. Além disso, também foram incluídas as variáveis de temperatura e umidade do solo.

Tabela 3: Parâmetros teóricos de semivariância ajustados no plugin Smart-Map do QGIS para os dados experimentais obtidos com o smart-sensor.

Variável	Modelo	Alcance (m)	RMSE	R ²
CEa_c	Gaussiano	126	0	0,737
CEa_s	Gaussiano	121,6	0,003	0,511
Temperatura do solo	Linear com patamar	119,3	0,058	0,952
Umidade do solo	Gaussiano	120,24	0,074	0,93

Após a coleta de dados realizada na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar da UFRPE, constatou-se na análise um comportamento atípico na análise da CEa do solo, visto que não foram identificadas correspondências entre os mapas de variabilidade espacial de CEa e de umidade, conforme ilustrado na Figura 9. Esse resultado diverge do comportamento esperado, uma vez que a literatura científica reconhece a correlação da CEa em relação ao teor de umidade do solo. Nesse contexto, Ekwue e Bartholomew (2010) observaram uma forte correlação positiva entre a CEa e o teor de umidade nos solos franco-arenoso, franco-argiloso e argiloso, em condições controladas e de campo.

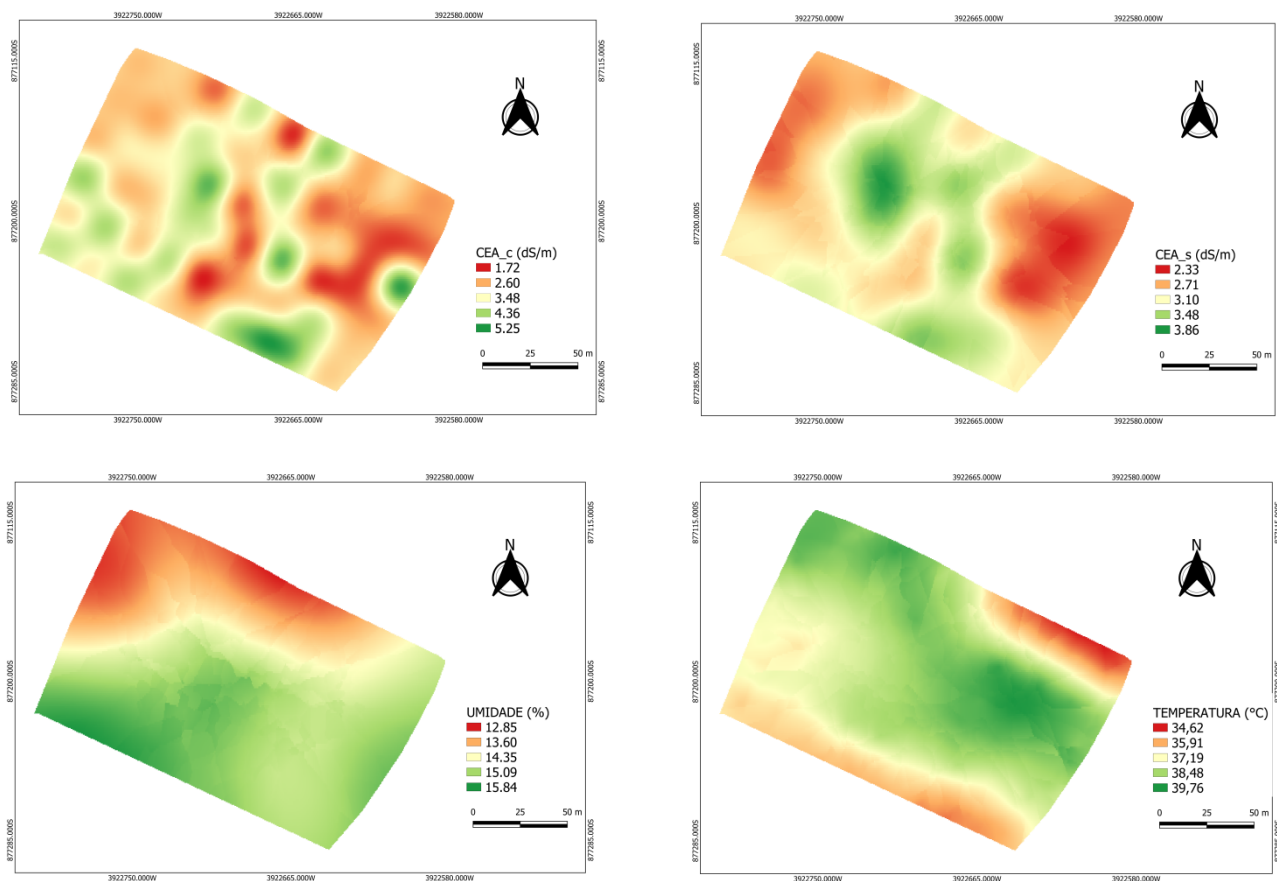
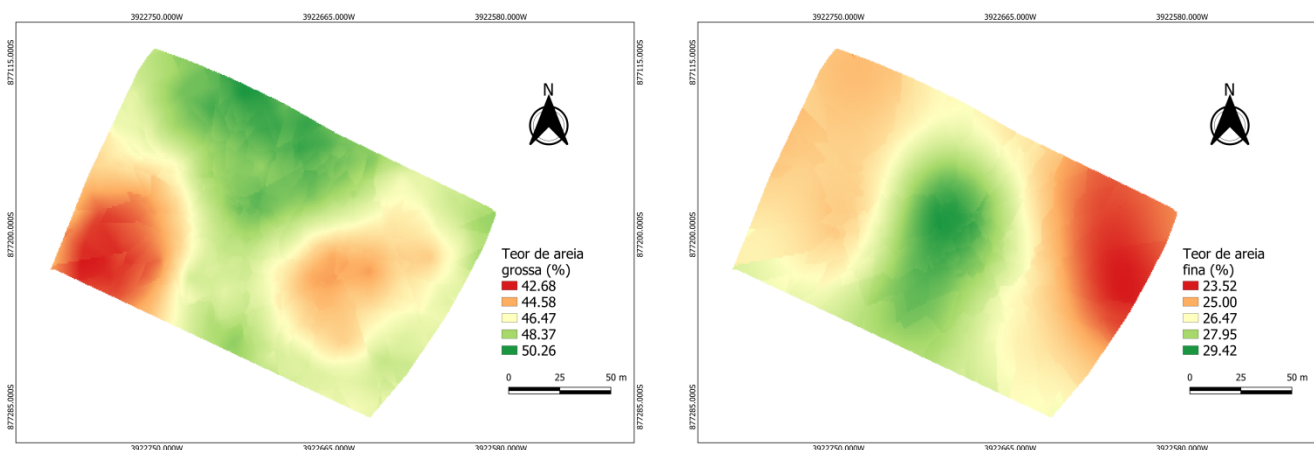


Figura 9: Mapas de variabilidade espacial da CEa, Umidade e Temperatura do solo elaborados com os dados obtidos com o Smart-Sensor durante a coleta realizada no dia 06/12/2024 na estação experimental de cana-de-açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, em Carpina/PE.

Em contrapartida, Faulin e Molin (2006) concluíram que a variabilidade espacial CEa do solo é influenciada pelo teor de umidade quando a amplitude dos valores de umidade é elevada. Quando essa amplitude é reduzida, o teor de umidade não exerce influência sobre a variabilidade espacial da condutividade.

Os autores Faulin e Molin (2006) estudaram duas áreas distintas por dois anos consecutivos, e encontraram, para primeira área, valores de CV do teor de umidade de 28,6% no primeiro ano e 30,5% no segundo ano. Na área 2, foram observados CV de 10,8% no primeiro ano e 7,3% no segundo ano. Considerando que o CV do teor de umidade obtido no presente estudo foi de 12,75%, sendo este considerado baixo em comparação aos apresentados por Faulin e Molin (2006), sugere-se que a não associação entre a variabilidade da CEa e o teor de umidade se dá em função da baixa amplitude do teor de umidade⁴

Com base nos dados obtidos na coleta realizada na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar da UFRPE, analisou-se a variabilidade dos atributos físicos do solo — areia grossa, areia fina, silte e argila — com o objetivo de caracterizar sua classe textural. A variabilidade desses atributos pode ser observada na Figura 10.



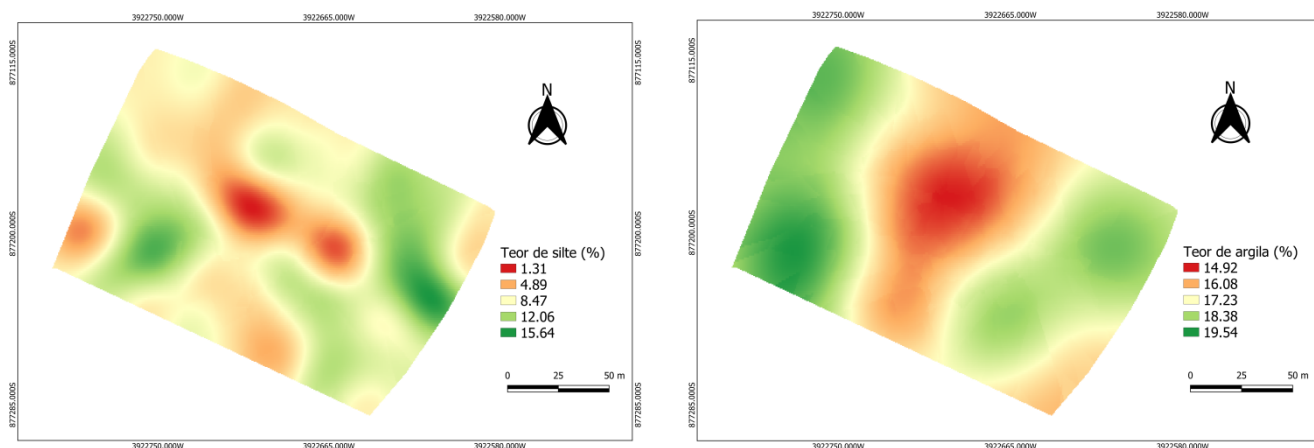


Figura 10: Mapas da variabilidade espacial dos teores de areia grossa, areia fina, silte e argila do solo elaborados a partir da amostragem de solo realizada no dia 06/12/2024 no Talhão 5 da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, em Carpina/PE

A partir dos mapas apresentados na Figura 10, verifica-se que a área do Talhão 5 da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar da UFRPE (EECAC) apresenta solo de textura predominantemente arenosa, uma vez que os teores de areia grossa e areia fina superam significativamente os das frações mais finas, como silte e argila, caracterizando a distribuição granulométrica do solo. Os Coeficientes de Variação (CV) de areia grossa (6%) e areia fina (15%), indicam baixa a moderada variabilidade espacial, sugerindo uma distribuição mais uniforme dessas frações na área na área. Por outro lado, o silte apresentou elevado CV (40%) e baixa participação percentual, enquanto a argila embora tenha apresentado CV moderado (14%), também ocorreu em menor proporção. Esses resultados confirmam a predominância do teor arenoso no solo. A Tabela 4 apresenta os parâmetros matemáticos utilizados na análise da distribuição espacial das propriedades granulométricas do solo no referido talhão.

Tabela 4: Parâmetros teóricos de semivariância ajustados no plugin Smart-Map do QGIS para os dados experimentais obtidos com o smart-sensor.

Variável	Modelo	Alcance(m)	RMSE	R ²
Teor de areia grossa no solo	Linear com patamar	110	0,202	0,971
Teor de areia fina no solo	Gaussiano	110	3,100	0,549
Teor de silte no solo	Gaussiano	110	1,314	0,835
Teor de argila no solo	Gaussiano	90	0,108	0,965

Adicionalmente, foi analisada a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, com o objetivo de mapear a concentração dos elementos e identificar possíveis demandas nutricionais. Foram avaliados, especificamente, os teores de cálcio, magnésio, alumínio e potássio, conforme apresentado na Figura 11. Além disso, elaboraram-se mapas de

variabilidade espacial da densidade aparente e do pH do solo, com o objetivo de analisar a distribuição dessas propriedades ao longo da área em estudo, conforme ilustrado na Figura 12.

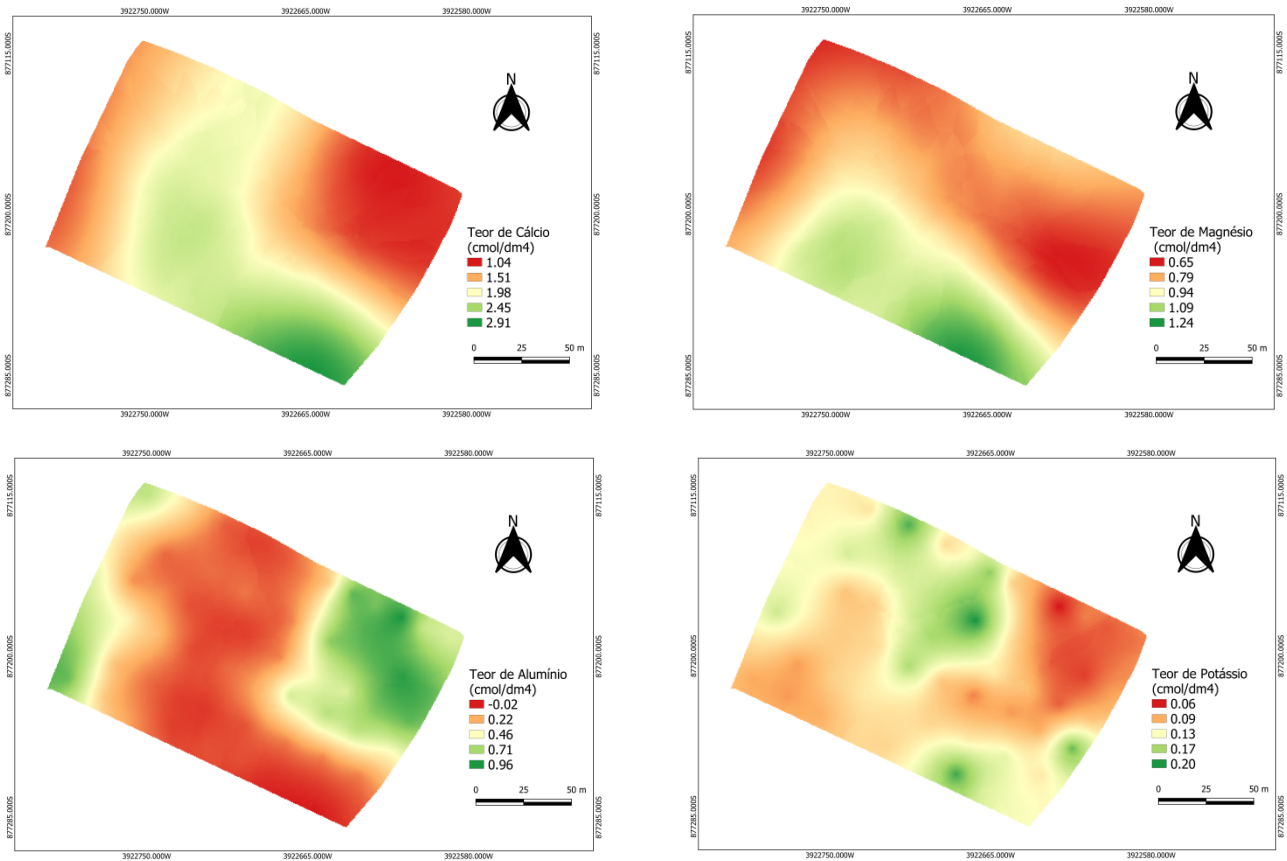


Figura 11: Mapas da variabilidade espacial dos teores de cálcio, magnésio, alumínio e potássio, elaborados a partir da amostragem de solo realizada no dia 06/12/2024 no Talhão 5 da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, em Carpina/PE.

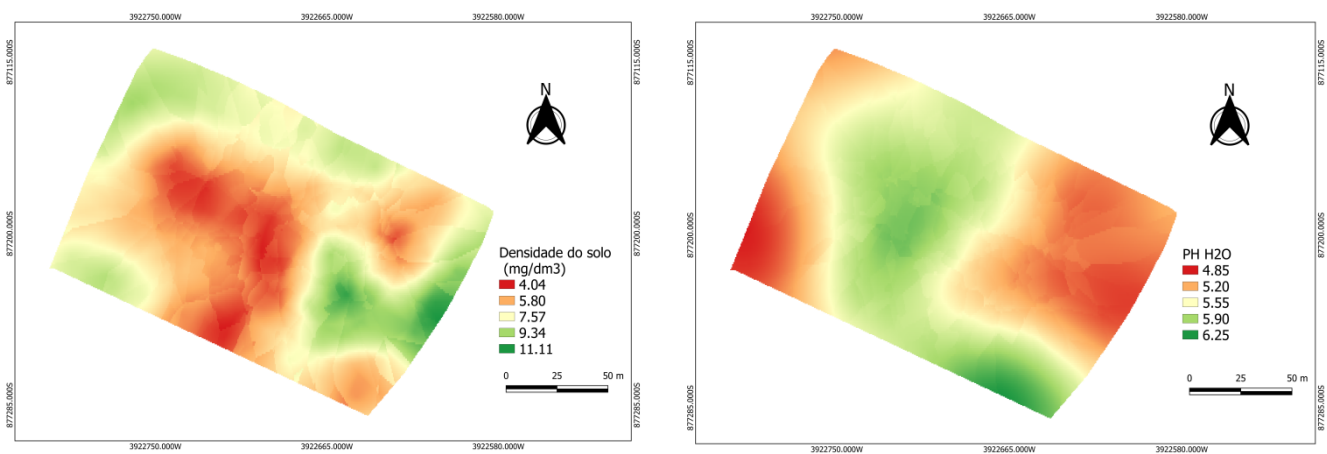


Figura 12: Mapas da variabilidade espacial da densidade aparente e do PH do solo, elaborados a partir da amostragem de solo realizada no dia 06/12/2024 no Talhão 5 da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, em Carpina/PE

A Tabela 5 apresenta os parâmetros matemáticos utilizados na construção dos mapas de variabilidade espacial das características do solo. Esses parâmetros permitiram representar de forma mais precisa a distribuição dos teores de nutrientes, do PH e da densidade, contribuindo para uma interpretação mais clara e objetiva dessas propriedades.

Tabela 5: Parâmetros teóricos de semivariância ajustados no plugin Smart-Map do QGIS para os dados experimentais obtidos a partir da amostragem de solo realizada no talhão 5 da Estação Experimental de Cana de açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco, em Carpina/PE

Variável	Modelo	Alcance (m)	RMSE	R²
Teor de cálcio	Gaussiano	120,24	0,011	0,901
Teor de alumínio	Linear com patamar	120,24	0,000	0,995
Teor de magnésio	Gaussiano	120,1	0,000	0,991
Teor de potássio	Exponencial	118	0,000	0,923
Densidade do solo	Linear com patamar	76	0,749	0,868
PH do solo	Gaussiano	120,24	0,003	0,900

Conforme ilustrado na Figura 13, pode-se observar que a correlação entre a maior parte dos atributos não foi significativa a 5% de significância. Destaca-se, no entanto, uma correlação média negativa entre a CEa e a temperatura, onde espera-se que quanto maior a temperatura, menor o valor de CEa no solo.

Resultados semelhantes foram observados por Valente et al. (2012), cujo resultados também indicaram ausência de correção entre a CEa e a maioria dos atributos avaliados. Analogamente ao presente estudo, esses autores relataram baixa variabilidade no teor de umidade e no teor de argila no solo, o que pode ter influenciado os resultados.

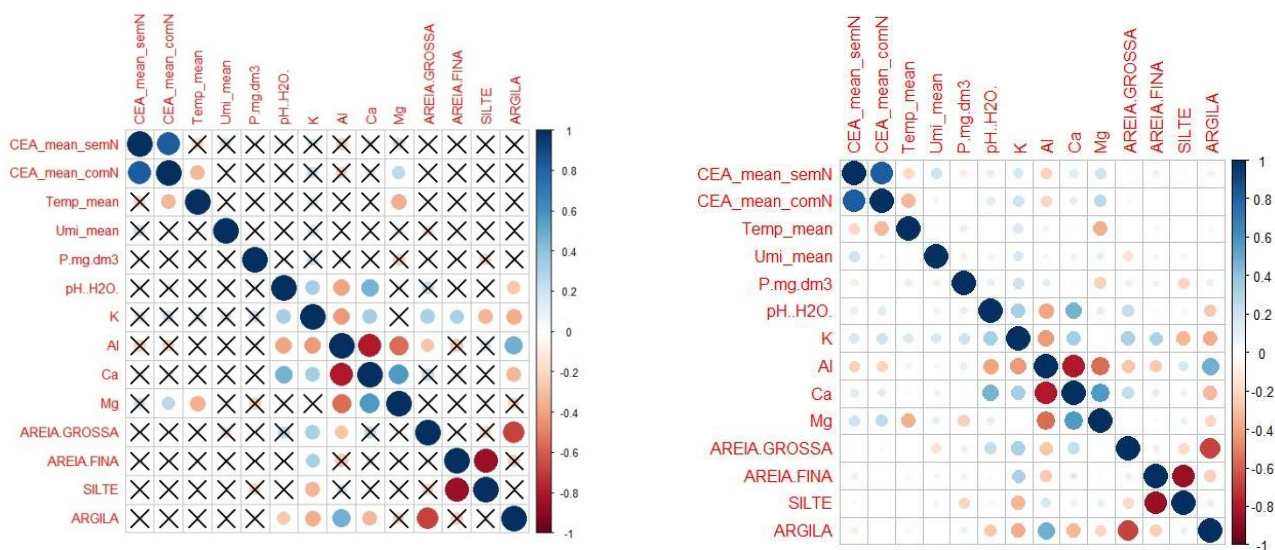


Figura 13: Gráfico de correlação de Pearson, onde “X” representa correlação não significativa a 5% de significância.

5.3 Resultado Índice Kappa

O resultado da comparação entre os mapas atendendo a primeira condição testada, foi apresentado na Tabela 6, na qual ZM CTU corresponde à zona de manejo da CEa ajustada pelos parâmetros de temperatura e umidade do solo. Posteriormente, os resultados da comparação entre os mapas referente à segunda condição testada são apresentados na Tabela 7, onde ZMCEa representa a zona de manejo da CEa solo sem ajustes.

Tabela 6: Nível de concordância das comparações entre os mapas de zona de manejo da CEa ajusta com a temperatura e umidade e as demais variáveis.

Mapas Comparados	Kappa	Nível de Concordância
ZM CTU x Areia Grossa	0,09	Ruim
ZM CTU x Areia Fina	0,13	Ruim
ZM CTU x Silte	0,1	Ruim
ZM CTU x Argila	- 0,06	Muito Ruim
ZM CTU x Densidade	- 0,15	Muito Ruim
ZM CTU x PH	- 0,05	Muito Ruim
ZM CTU x Al	0,03	Ruim
ZM CTU x Ca	0,24	Razoável
ZM CTU x K	0,03	Ruim
ZM CTU x Mg	-0,05	Muito Ruim

Tabela 7: Nível de concordância das comparações entre os mapas de zona de manejo da CEa e as demais variáveis

Mapas Comparados	Kappa	Nível de Concordância
ZM CEa x Areia Grossa	0.005	Ruim
ZM CEa x Areira Fina	0,18	Ruim
ZM CEa x Silte	0,03	Ruim
ZM CEa x Argila	0,016	Ruim
ZM CEa x Densidade	0,04	Ruim
ZM CEa x PH	0,09	Ruim
ZM CEa x Al	0,04	Ruim
ZM CEa x Ca	0,05	Ruim
ZM CEa x K	-0,05	Ruim
ZM CEa x Mg	0,07	Ruim

Os valores do coeficiente Kappa obtidos tanto na comparação entre as zonas de manejo da CEa ajustada pela temperatura e umidade (ZM CTU) e os atributos físico-químicos do solo, quanto as zonas de manejo da CEa sem ajustes (ZM CEa) e esses mesmos atributos, foram predominantemente ruins ou muito ruins para a maior parte das variáveis avaliadas, com exceção do Cálcio que apresentou nível de significância razoável quando comparado com a ZM CTU.

Conforme classificação proposta por Landis; Koch (1977 apud SOUSA 2015), observa-se que a maior parte dos atributos apresentaram concordância ruim ou muito ruim, com destaque para os atributos físicos, como argila e densidade, e os atributos químicos, como PH e magnésio, cujos valores negativos do índice Kappa indicam discordância espacial entre os mapas comparados. A maior concordância ocorreu entre os mapas ZM CTU e o cálcio, sendo esta, classificada como razoável, destacando-se como a única comparação que apresentou desempenho mais satisfatório.

Esses resultados são coerentes aos observados por Silva et al. (2022), nos quais também foram observadas concordâncias variando de muito ruim a bom na comparação entre as zonas de manejo geradas a partir da CEa e os atributos do solo. Entretanto, no mesmo estudo, as zonas de manejo geradas a partir das combinações, ECa06 e Ca06-O, apresentaram melhor desempenho, uma vez que demonstraram concordância significativa com atributos químicos do solo, em especial o K, P e S, para os quais foram registrados valores de Kappa dentro do intervalo $0,40 < k < 0,60$.

Esses resultados sugerem que, embora a CEa apresente sensibilidade a fatores ambientais, como umidade e condições momentâneas do solo, o que pode comprometer sua estabilidade temporal e sua capacidade de refletir de forma consistente os atributos físico-químicos, a combinação com outras variáveis e/ou métodos complementares, pode resultar

em maior precisão na identificação da variabilidade espacial do solo.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação do multisensor inteligente de solo de baixo custo permitiu verificar que o algoritmo de análise de sinal testado foi eficaz na detecção de condições de mal contato entre os eletrodos.

Considerando que os mapas gerados para CEa_c e CEa_s apresentaram diferenças mínimas na distribuição espacial e que a correlação entre ambas foi próxima de 1, conclui-se que, neste caso, o algoritmo de sinal não exerceu influência significativa sobre a variabilidade espacial das variáveis analisadas.

A variabilidade espacial da CEa não foi representada de forma satisfatória por fatores alheios ao método de coleta, enquanto a umidade e a temperatura do solo apresentaram resultados consistentes. A baixa correlação da CEa com os demais atributos pode estar associada às características do solo, especialmente ao teor de argila e teor de umidade.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R. do; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Disponível em: <https://www.bibliotecaagpatea.org.br/agricultura/precisao/livros/AGRICULTURA%20DE%20PRECISAO%20-%20OFICINA%20DE%20TEXTOS.pdf>. Acesso em: 08, out. 2025.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 159–163, 2002. ISSN 0103-8478. DOI: 10.1590/S0103-84782002000100027. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/54b6LCQHrJsnwqdCTGKHtB/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 08, out. 2025.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 828–831, fev. 2010. DOI: 10.1126/science.1183899. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/41424902_Precision_Agriculture_and_Food_Security_Science3275967_828-831#fullTextFileContent. Acesso em: 08, out. 2025.

WOLFERT, S.; GE, L.; VERDOUW, C.; BOGAARDT, M.-J. Big data in smart farming – a review. **Agricultural Systems**, v. 153, p. 69–80, Maio 2017. DOI: 10.1016/j.agry.2017.01.023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X16303754>. Acesso em: 08, out. 2025.

FILHO, J. A.; NEGREIROS, R. F. D.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 415-422, jun. 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000300001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/G97ZVzGfj6Xr6D6RzrWnKkP/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 08, out. 2025.

CORWIN, D. L.; PLANT, R. E. Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 1-10, mar. 2005. DOI: 10.1016/j.compag.2004.10.004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169904001231>. Acesso em: 09, out. 2025.

GREGO, C. R.; SPERANZA, E. A.; RODRIGUES, G. C.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; VENDRUSCULO, L. G.; RODRIGUES, C. A. G.; INAMASU, R. Y.; VAZ, C. M. P.; RABELLO, L. M.; JORGE, L. A. C.; ZOLIN, C. A.; FRANCHINI DOS SANTOS, J. C.; RONQUIM, C. C. Tecnologias desenvolvidas em Agricultura de Precisão. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. A.; OLIVEIRA, S. R. M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; BOLFE, É. L., eds. **Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 169. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1126213/2/LV-Agricultura-digital-2020.pdf>. Acesso em: 17 out, 2025.

GRISSE, R. D.; ALLEY, M. M.; HOLSHOUSER, D.; THOMASON, W. Precision Farming Tools: Soil Electrical Conductivity. Publication 442-508. Virginia Tech: **Virginia Cooperative Extension**, jan 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/285309866>. Acesso em: 17 out, 2025.

CANAL FILHO, R.; SILVA, E. R. O.; WEI, M. C. F.; STERLE, L. G. G.; MOLIN, J. P. **Boletim Técnico 07 – Condutividade elétrica aparente do solo**. Piracicaba, SP: LAP - Laboratório de Agricultura de Precisão, jun. 2024. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/381671510> . Acesso em: 17 out. 2025.

QUEIROZ, D. M.; SOUSA, E. D. T. S.; LEE, W. S.; SCHUELLER, J. K. Development and testing of a low-cost portable apparent soil electrical conductivity sensor using a beaglebone black. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 36, n. 3, p. 341-355, 2020. DOI: 10.13031/aea.13439.

SOUSA, E. D. T. S.; QUEIROZ, D. M.; COELHO, A. L. F.; VALENTE, D. S. M. Development of signal analysis algorithm for apparent soil electrical conductivity sensor. **Biosystems Engineering**, v. 211, 183–191, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.09.007>.

SOUSA, E. D. T. S.; QUEIROZ, D. M.; COELHO, A. L. F.; VALENTE, D. S. M. Development of a portable multisensor platform for soil mapping. **Revista Ciência Agronômica**, v. 54, 2023. DOI: 10.5935/1806-6690.20230008.

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

CALAMITA, G.; BROCCA, L.; PERRONE, A.; PISCITELLI, S.; LAPENNA, V.; MELONE, F.; MORAMARCO, T. Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in

central Italy test-sites. **Journal of Hydrology**, v. 454-455, p. 101-112, 2012.

IGBOAMA, W. N.; UGWU, N. U. Fabrication of resistivity meter and its evaluation. **American Journal of Scientific and Industrial Research**, v. 2, n. 5, p. 713-717, 2011. DOI: 10.5251/ajsir.2011.2.5.713.717. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/271353336_Fabrication_of_resistivity_meter_and_its_evaluation. Acesso em: 12, out. 2025.

DANTAS, G. D.; OLIVEIRA, L. A.. Análise da continuidade espacial da precipitação na bacia hidrográfica do rio São Francisco em sua área de ocorrência no estado de Minas Gerais-Brasil, série histórica 2004 a 2017. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 23585-23595, mar. 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n3-190. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/25993/20611>. Acesso em: 12, out. 2025.

PEREIRA, G. W.; VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M. D.; COELHO, A. L. D. F.; COSTA, M. M.; GRIFT, T. Smart-map: an open-source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging. **Agronomy**, v. 12, n. 6, p. 1350, jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12061350>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/6/1350>. Acesso em: 20, out. 2025.

PARANHOS, R.; FIGUEIREDO FILHO, D. B.; ROCHA, E. C.; SILVA JÚNIOR, José Al.; NEVES, J. A. B.; SANTOS, M. L. W. D. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson: o Retorno. **Leviathan (São Paulo)**, n. 8, p. 66–95, 2014. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2237-4485.lev.2014.132346>. Disponível em: <https://revistas.usp.br/leviathan/article/view/132346>. Acesso em: 20, out. 2025

SOUSA, Emanuel Di Tarso dos Santos. **Estabilidade espaço-temporal de atributos físicos e químicos do solo em área cultivada com café para definição de classes de manejo**. 2015. Dissertação (Magister Scientiae) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

SOUZA, Emanuel Di Tarso dos Santos. **Desenvolvimento De Plataforma Multi-Sensor De Solos Para Uso Em Agricultura De Precisão**. 2019. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

CHIG, L. A.; COUTO, E; G.; AMORIM, R. S. S.. Tecnologias para levantamento da variabilidade dos atributos do solo para um programa de agricultura de precisão. **UNICIÊNCIAS**, [S. l.], v. 14, n. 2, 2010. Disponível em:

<https://uniciencias.pgsscogna.com.br/uniciencias/article/view/734>. Acesso em: 19 out. 2025.

ZIMMERMANN, E.; HUISMAN, J. A. The effect of heterogeneous contact impedances on complex resistivity measurements. **Geophysical Journal International**, Oxford, v. 236, n. 3, p. 1234-1245, mar. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggad477>. Disponível em: <https://academic.oup.com/gji/article/236/3/1234/7478037>. Acesso em: 20 nov. 2025.

EKWUE, E.I.; BARTOLOMEU, J. Electrical conductivity of some soils in Trinidad as affected by density, water and peat content. **Biosystems Engineering**, v. 108, n. 2, p. 95-103, fev. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.11.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511010002357>. Acesso em: 20 nov. 2025.

FAULIN, G. D. C.; MOLIN, J. P. Amplitude dos valores da umidade e sua influência na mensuração da condutividade elétrica do solo. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO**. 2006. São Pedro, SP. Resumos... São Pedro, SP, 2006. Disponível em: https://www.agriculturadeprecisao.org.br/wp-content/uploads/2020/01/cgr_2006-01.pdf. Acesso em: 20 nov. 2025.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, N. T.; SANTOS, F. L. The relationship between apparent soil electrical conductivity and soil properties. **Revista Ciência Agronômica**. Fortaleza, CE, v. 43, n. 4, p. 683-690, out.-dez. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000400009>. Disponível em: <https://www.scielo.br/rca/a/Th8HXC6BHjvwJgTB7wLwXQc/?lang=en>. Acesso em: 27 nov. 2025.

SILVA, S. A.; SANTOS, R. O.; QUEIROZ, D. M.; LIMA, J. S. S.; PAJEHÚ, L. F.; MEDAUAR, C. C. Apparent soil electrical conductivity in the delineation of management zones for cocoa cultivation. **Information Processing in Agriculture**. Alegre, ES, v.9, n. 3, p. 443-455, set. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.04.004>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214317321000287?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 01/12/2025.

Brocca, L., F. Melone, T. Moramarco, and R. Morbidelli (2010), Spatial-temporal variability of soil moisture and its estimation across scales, **Water Resour. Res.**, 46, W02516, doi:10.1029/2009WR008016.