

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRÔNOMICA

Letícia da Silva

**DETERMINAÇÃO DAS UNIDADES DIFERENCIADAS DE GESTÃO POR MEIO
DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS E COMPONENTES ESPECTRAIS,
APLICADO À CAFEICULTURA**

São João Evangelista

2026

LETÍCIA DA SILVA

**DETERMINAÇÃO DAS UNIDADES DIFERENCIADAS DE GESTÃO POR MEIO
DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS E COMPONENTES ESPECTRAIS,
APLICADO À CAFEICULTURA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Curso Bacharelado em Agronomia do
Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus*
São João Evangelista para obtenção do grau
de bacharel em Agronomia.

Orientador: Dr. Jonathan da Rocha Miranda

São João Evangelista

2026

S586d Silva, Letícia da.
Determinação das unidades diferenciadas de gestão por meio dos atributos físico-hídricos e componentes espectrais, aplicado à cafeicultura/ Letícia da Silva – 2026.
30f.: il.

Orientador: Dr. Jonathan da Rocha Miranda.
Coorientador: Dr. Alisson José Eufrásio de Carvalho.
Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Agronomia) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João Evangelista, 2026.

1. Coffea arabica. 2. Agricultura de precisão. 3. Zoneamento. 4. Bicho-mineiro. 5. Variabilidade espacial. I. Silva, Letícia da. II. Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* SJE. III. Título.

CDD 633.7

Catálogo: Esther Soares Cunha - CRB-6/4333

Letícia da silva

**DETERMINAÇÃO DAS UNIDADES DIFERENCIADAS DE GESTÃO POR MEIO
DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS E COMPONENTES ESPECTRAIS,
APLICADO À CAFEICULTURA**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso Bacharelado em
Agronomia do Instituto Federal de Minas
Gerais - *Campus* São João Evangelista
para obtenção do grau de bacharel em
Agronomia.

Aprovado em: 02 / 02 / 2026 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 JONATHAN DA ROCHA MIRANDA
Data: 12/08/2026 10:57:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Jonathan da Rocha Miranda (Orientador) – IFMG – SJE

Dr. Alisson José Eufrásio de Carvalho – IFMG – SJE

Documento assinado digitalmente
 RICARDO GOMES DE OLIVEIRA
Data: 12/08/2026 12:43:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ms. Ricardo Gomes Oliveira – IFMG - SJE

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por Sua infinita graça, proteção e sabedoria ao longo de toda esta caminhada. Foi por meio da fé, da perseverança e da confiança em Seus planos que encontrei forças para superar os desafios, vencer o cansaço e seguir firme até a conclusão deste trabalho. Em cada etapa, senti Sua presença me guiando e me fortalecendo.

À minha família, expresso minha mais sincera e profunda gratidão pelo amor incondicional, pelo apoio constante, pela paciência nos momentos difíceis e pela confiança depositada em mim. Vocês foram meu alicerce, minha motivação diária e minha maior fonte de incentivo. Cada palavra de encorajamento, cada gesto de cuidado e cada demonstração de orgulho fizeram toda a diferença nesta conquista.

Ao meu orientador minha eterna gratidão, pela dedicação, profissionalismo, paciência e valiosas orientações, que contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste trabalho. Estendo meus agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram com esta realização, seja com conselhos, apoio, incentivo ou compreensão. Cada contribuição foi fundamental para que este objetivo se tornasse realidade.

RESUMO

A cafeicultura de precisão demanda o entendimento da variabilidade espacial e temporal das lavouras para otimizar o manejo e garantir a sustentabilidade produtiva. O presente trabalho teve como objetivo delimitar Unidades de Gestão Diferenciada (UGDs) em uma lavoura cafeeira, utilizando a integração de atributos físico-hídricos do solo e componentes espectrais. O estudo foi conduzido no *Campus* do IFMG em São João Evangelista, avaliando as safras de 2022 e 2024. A metodologia consistiu na coleta georreferenciada de dados de Resistência do Solo à Penetração (RSP) nas camadas de 0-25 cm e 25-50 cm, Capacidade de Campo (CC), levantamento topográfico (altitude) e monitoramento da incidência de Bicho-Mineiro (*Leucoptera coffeella*) e enfolhamento. Foram aplicadas técnicas de geoestatística para modelagem da dependência espacial e algoritmos de agrupamento (*cluster*) para a definição das zonas de manejo. Os resultados indicaram que a distribuição do Bicho-Mineiro variou conforme a disponibilidade de tecido foliar, apresentando padrão contínuo (*drift*) em 2022 (alcance de 5.688 m) e fragmentado em 2024 (alcance de 75 m). A análise de agrupamento definiu quatro UGDs distintas: a UGD 1 caracterizou-se pela limitação hidrológica (menor CC); a UGD 2, situada em maiores altitudes e com menores índices de compactação, destacou-se pelo vigor vegetativo, atuando, contudo, como refúgio ecológico para pragas em anos de estresse; a UGD 3 apresentou a maior retenção hídrica, mas com ruído espectral devido a plantas daninhas; e a UGD 4 evidenciou maiores níveis de RSP em profundidade. Conclui-se que a abordagem multivariada permitiu segregar a lavoura em unidades com potencial produtivo e restrições distintas, validando o uso de sensoriamento remoto e atributos físicos do solo como ferramentas complementares para a tomada de decisão agrônômica.

Palavras-chave: *Coffea arábica*. Agricultura de Precisão. Zoneamento. Bicho-Mineiro. Variabilidade Espacial.

ABSTRACT

Precision coffee farming requires an understanding of the spatial and temporal variability of fields in order to optimize management and ensure productive sustainability. This study aimed to delineate Management Zones (MZs) in a coffee plantation by integrating soil physical–hydric attributes and spectral components. The study was conducted at the IFMG Campus in São João Evangelista, evaluating the 2022 and 2024 growing seasons. The methodology consisted of georeferenced sampling of Soil Penetration Resistance (SPR) in the 0–25 cm and 25–50 cm layers, Field Capacity (FC), topographic survey (elevation), and monitoring of leaf miner incidence (*Leucoptera coffeella*) and leaf cover. Geostatistical techniques were applied to model spatial dependence, and clustering algorithms were used to define management zones. The results indicated that leaf miner distribution varied according to leaf tissue availability, showing a continuous pattern (drift) in 2022 (range of 5,688 m) and a fragmented pattern in 2024 (range of 75 m). Cluster analysis defined four distinct MZs: MZ 1 was characterized by hydrological limitation (lowest FC); MZ 2, located at higher elevations and with lower compaction levels, stood out for greater vegetative vigor, but also acted as an ecological refuge for pests in stress years; MZ 3 showed the highest water retention, but with spectral noise due to weed presence; and MZ 4 exhibited higher SPR levels at greater depths. It is concluded that the multivariate approach allowed the plantation to be segmented into units with distinct productive potential and constraints, validating the use of remote sensing and soil physical attributes as complementary tools for agronomic decision-making.

Keywords: *Coffea arabica*. Precision Agriculture. Zoning. Leaf Miner. Spatial Variability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização da área de estudo.....	15
Figura 2 – Distribuição dos pontos amostrais	16
Figura 3 – Penetrômetro de impacto utilizado para determinação da resistência do solo	16
Figura 4 – Processo de determinação da Capacidade de Campo (CC) em laboratório	17
Figura 5 – Levantamento topográfico com receptor GNSS RTK	18
Figura 6 – Avaliação da incidência de bicho-mineiro (<i>Leucoptera coffeella</i>).....	19
Figura 7 – Nota de classificação visual do plantio de folhas em cafezais.....	19
Figura 8 – Fluxograma das etapas metodológicas.....	23
Figura 9 – Distribuição interpolada da incidência do bicho mineiro para os anos de 2022 e 2024.	25
Figura 10 – Distribuição interpolada do enfolhamento para os anos de 2022 e 2024.....	25
Figura 11 – Distribuição interpolada da Capacidade de Campo (CC) na área experimental ...	27
Figura 12 – Distribuição interpolada da Resistência do Solo à Penetração (RSP).....	28
Figura 13 – NDVI Sentinel-2 no mês de setembro para os anos 2022 e 2024.....	30
Figura 14 – Delineamento das quatro UGDs após o processo de agrupamento (K-means)	31
Figura 15 – Boxplot das variáveis e teste de média para diferentes UGDs.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos parâmetros geoestatísticos e indicadores de qualidade de ajuste dos modelos de krigagem.....	24
Tabela 2 – Média e desvio das variáveis de Capacidade de Campo, Altitude e Resistência nas UGDs	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA - Analysis of Variance (Análise de Variância)

AP - Agricultura de Precisão

CC - Capacidade de Campo

GIS/SIG - Geographic Information System (Sistema de Informação Geográfica)

GNSS - Global Navigation Satellite System

IFMG - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

MDT - Modelo Digital de Terreno

Mpa - Megapascal

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)

PIB - Produto Interno Bruto

RSP - Resistência do Solo à Penetração

RTK - Real Time Kinematic

SQE - Soma dos Quadrados dos Erros

TIN - Triangular Irregular Network

UGD - Unidade de Gestão Diferenciada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 Aspectos econômicos da cafeicultura	12
2.2 Agricultura de precisão na cafeicultura	13
2.3 Unidades de gestão diferenciada: Determinação e aplicabilidade na cafeicultura	14
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1 Área de estudo.....	14
3.2 Aquisição de amostras georreferenciadas	15
3.3 Determinação da resistência do solo à penetração (RSP)	16
3.4 Teste de capacidade de campo	17
3.5 Levantamento topográfico	17
3.6 Incidência de bicho mineiro.....	18
3.7 Enfolhamento	19
3.8 Índice de Vegetação	20
3.9 Análise Geoestatística	20
3.10 Definição das unidades de gestão diferenciadas (UGDs)	21
3.11 Validação agrônômica e análise estatística das UGDs.....	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
4.1 Análise Geoestatística das variáveis estudadas	23
4.1.1 <i>Bicho Mineiro e Enfolhamento</i>	24
4.1.2 <i>Capacidade de campo e MDT</i>	26
4.1.3 <i>Resistência do solo à penetração</i>	28
4.2 Análise temporal do NDVI.....	29
4.3 Agrupamento de classes (UGDs)	30
4.4 Interações Espectrais e Fitossanitárias nas UGDs.....	33
5 CONCLUSÃO.....	36
6 REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

O estado de Minas Gerais possui papel de destaque como a maior produção na cafeicultura brasileira, sendo responsável por 48,4% da produção total nacional. São 463 municípios produtores de café, com 1,2 milhão de hectares de lavouras. A espécie de café arábica é a mais cultivada, representando 67,7% do total de área plantada no país (VIANA *et al.*, 2022).

Por sua relevância na economia brasileira, o monitoramento da cultura do café assume grande importância, visto que, estes mecanismos contribuem para a identificação de problemas nutricionais e fitossanitários da planta. De acordo com Bernardes *et al.* (2012), o monitoramento de lavouras cafeeiras assume um importante papel no levantamento de informações sobre os aspectos fitossanitários, área plantada e estimativa de safra, que são essenciais para gestão e planejamento desta *commodity*. Para garantir maiores produtividades nos segmentos da cafeicultura, as tecnologias empregadas do plantio a comercialização estão sendo cada vez mais requisitadas principalmente com o advento da agricultura de precisão (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

A Agricultura de Precisão (AP) apresenta-se enquanto uma ferramenta que tem por objetivo gerenciar a propriedade agrícola, sob essa perspectiva de variabilidade espacial e temporal das questões que interferem na produtividade, visando o aumento da rentabilidade e maior sustentabilidade (ALVES *et al.*, 2006). Neste sentido, a AP estuda não somente a variabilidade espacial, mas também a temporal das lavouras para que se estabeleçam as unidades de gestão diferenciada (UGDs).

Estas unidades revelam áreas semelhantes no qual requer um tratamento diferenciado, sua implantação é considerada a mais nobre de um sistema de AP. Sua divisão requer o reconhecimento de parâmetros permanentes no solo, como textura e tipo de solo, e podem ser especializado por meio da geoestatística (CARVALHO *et al.*, 2013). No entanto, cabe salientar as informações dos solos somente traz uma espacialização genérica da área e requer informações colaterais que corroboram na delimitação de áreas com o mesmo desenvolvimento da cultura (CARVALHO *et al.*, 2013).

Neste sentido, o sensoriamento remoto pode propiciar as informações da variabilidade espacial das plantas por meio dos índices espectrais (ALVES *et al.*, 2006). De acordo com Miranda *et al.*, (2020), o sensoriamento remoto pode ser utilizado para monitorar e estimar, com razoável precisão nas respostas, o rendimento, a saúde das plantas e a nutrição do café.

As imagens aéreas e orbitais são promissoras na determinação da variabilidade espacial do desenvolvimento de plantas. Com os dados adquiridos é possível evidenciar a origem dessa variabilidade e indicar um manejo mais assertivo de acordo com o resultado encontrado (ALVES *et al.*, 2006).

Partindo do pressuposto que o sensoriamento remoto, em conjunto da análise física do solo, pode auxiliar o delineamento de UGDs, o objetivo desta pesquisa foi a utilização de critérios de agrupamento de cluster para delimitar as UGDs, classificar de modo qualitativo quanto ao uso adequado da área.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Aspectos econômicos da cafeicultura

A cafeicultura é um pilar fundamental da economia brasileira, contribuindo significativamente para o Produto Interno Bruto (PIB) agrícola, criação de empregos e ganhos de divisas através das exportações. Dentro do Brasil, o estado de Minas Gerais se destaca como o maior produtor de café, respondendo por aproximadamente 50% da produção brasileira (CONAB, 2022).

Segundo o levantamento mais recente da Companhia Nacional de Abastecimento, na safra de 2025 o estado colheu 25,17 milhões de sacas de café arábica, respondendo por 45,5% da produção nacional, em uma área cultivada de aproximadamente 1,4 milhão de hectares, o que equivale a 62% da área total destinada à cafeicultura no país (CONAB, 2025).

A cafeicultura em Minas Gerais é relevante não apenas por sua participação quantitativa, mas também pela diversidade de sua produção. O estado abriga diferentes regiões produtoras, cada uma com suas particularidades, o que permite uma oferta variada de produtos, desde o café tradicional até variedades gourmet e especiais (VALE *et al.*, 2014). A qualidade do café pode variar significativamente dependendo da localização e altitude do local de produção, destacando o potencial de certas áreas em Minas Gerais para a produção de cafés especiais (FERNANDES *et al.*, 2020).

Além disso, a cafeicultura mineira contribui significativamente para o desenvolvimento regional, com impactos socioeconômicos expressivos. A produção de café é, muitas vezes, a principal fonte de renda de pequenos e médios produtores rurais, impactando diretamente na qualidade de vida e na economia de muitos municípios (ICO, 2021).

A cafeicultura também se mostra como um vetor de inovação tecnológica frente aos desafios impostos pelo mercado e pelo clima, os produtores de café de Minas Gerais têm buscado constantemente a modernização e a sustentabilidade de suas lavouras (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015). A agricultura de precisão, por exemplo, tem se mostrado uma aliada importante nesse processo, possibilitando o manejo mais eficiente dos recursos e a melhoria na qualidade do café produzido (DE ASSIS SILVA *et al.*, 2016).

2.2 Agricultura de precisão na cafeicultura

A AP é uma abordagem tecnológica que visa otimizar a gestão das atividades agrícolas por meio do uso de sistemas avançados de monitoramento e controle. Essa metodologia proporciona o manejo mais eficiente dos recursos agrícolas, levando em consideração a variabilidade espacial e temporal dos campos (MULLA, 2013). Na cafeicultura, a AP tem se mostrado uma ferramenta de grande potencial para melhorar a eficiência da produção e a sustentabilidade do cultivo (CHEMURA *et al.*, 2018).

Um dos principais benefícios da AP é a capacidade de monitorar a lavoura de café em tempo real e de forma precisa. Por meio de sensores, drones, satélites e sistemas de informação geográfica (GIS), os produtores podem obter informações detalhadas sobre as condições da lavoura, como umidade do solo, disponibilidade de nutrientes, incidência de pragas e doenças, entre outros (BASSO; ANTLE, 2020). Com base nesses dados, é possível tomar decisões de manejo mais precisas e oportunas, como a irrigação e a adubação direcionadas, o que pode resultar em economia de recursos e aumento da produtividade (CHEMURA *et al.*, 2018).

Além disso, a AP pode contribuir para a melhoria da qualidade do café produzido. Com um manejo mais preciso e personalizado, os produtores podem proporcionar as condições ideais para o desenvolvimento dos grãos, o que pode resultar em um café de melhor sabor e aroma (FERNANDES *et al.*, 2020). Isso pode agregar valor ao produto e aumentar a competitividade dos cafeicultores no mercado (FERNANDES *et al.*, 2020).

A AP também tem um papel importante na sustentabilidade da cafeicultura ao permitir o uso mais eficiente dos recursos, a AP pode contribuir para a redução dos impactos ambientais do cultivo de café. Além disso, por fornecer informações precisas sobre a lavoura, a AP pode ajudar os produtores a adotar práticas de manejo mais sustentáveis e resilientes às mudanças climáticas (HORŇÁK *et al.*, 2015).

2.3 Unidades de gestão diferenciada: Determinação e aplicabilidade na cafeicultura

As Unidades de Gestão Diferenciada (UGD) são conceitos centrais na agricultura de precisão, representando áreas de um campo agrícola que apresentam características homogêneas, mas diferem significativamente de outras áreas do mesmo campo. A definição dessas unidades permite o manejo específico de cada uma delas, promovendo a utilização mais eficiente dos recursos agrícolas e o aumento da produtividade (VAN VEENHUIZEN, 2006).

Na cafeicultura, a determinação das UGDs integra as fontes de dados já mencionadas sensoriamientos remotos, sensores de solo e sistemas de informação geográfica, permitindo aos cafeicultores identificar, dentro de suas lavouras, zonas de manejo com características homogêneas que podem ser geridas como uma única unidade (ALVES *et al.*, 2006).

A aplicabilidade das UGDs na cafeicultura é vasta. Uma vez determinadas as UGDs, os produtores podem realizar uma série de práticas de manejo adaptadas a cada unidade. Por exemplo, a adubação e a irrigação podem ser ajustadas de acordo com as necessidades específicas de cada UGD, evitando o uso excessivo de fertilizantes e água e, conseqüentemente, reduzindo custos e impactos ambientais. Além disso, a identificação de UGDs pode auxiliar na detecção precoce e no controle de pragas e doenças, pois as condições favoráveis para a ocorrência desses problemas podem variar entre diferentes UGDs (BASSO; ANTLE, 2020).

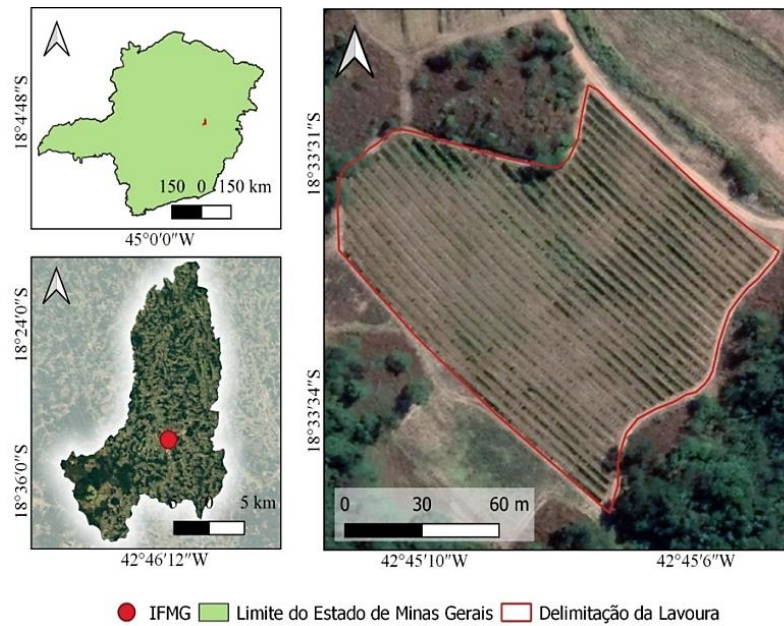
As UGDs também podem ter um impacto positivo na qualidade do café produzido ao adaptar as práticas de manejo às condições específicas de cada UGD, os produtores podem proporcionar as condições ideais para o desenvolvimento dos grãos em cada parte da lavoura, potencialmente resultando em um café de melhor sabor e aroma (FERNANDES *et al.*, 2020).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A lavoura cafeeira estudada está localizada no Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista (Figura 1). As cultivares Topázio 1190 e Catiguá MG2 são cultivadas em uma área de 1,5 hectares, com o transplântio realizado em 2019.

Figura 1: Localização da área de estudo.



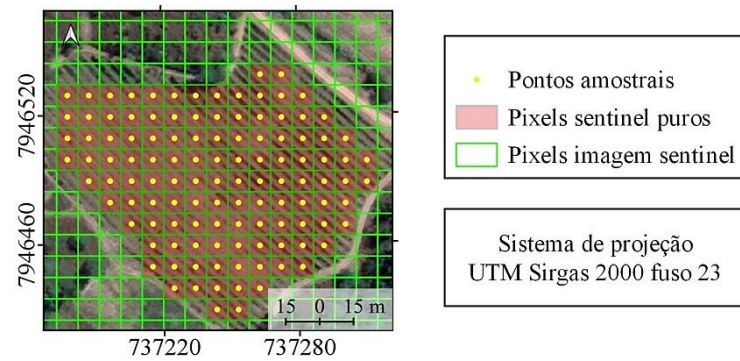
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Conforme a classificação de koppen, a região é caracterizada por ser do tipo Cwa apresentando clima chuvoso, inverno seco e verão chuvoso e quente. Possui anualmente temperaturas média máxima e mínima de 26, 1°C e 15°C, respectivamente, temperatura média de 20,1°C e precipitação de 1.180 mm (MARTINS *et al.*, 2018).

3.2 Aquisição de amostras georreferenciadas

A bordadura do talhão pode influenciar nos aspectos de reflectância da imagem pois os pixels presentes irão refletir não somente a cultura, mas também os carregadores. Neste sentido, deve-se evitar os efeitos de mistura espectral oriundo da bordadura da imagem. Para efetuar esta filtragem dos pontos foram considerados apenas os pixels puros, ou seja, o pixel da imagem deve conter uma área totalmente coberta pela cultura sem a inserção de carregadores. O processo foi realizado pela orientação dos pixels presentes a um raio de 10 metros para dentro da área de estudo, sendo efetuado para tal o buffer negativo para o polígono da área (Figura 2).

Figura 2: Distribuição dos pontos amostrais



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

De posse dos pontos, foram sorteados aleatoriamente 30 pontos espaçados no mínimo de 10 metros entre si. Estes pontos foram inseridos a um GPS RTK e alocados em campo, sendo selecionadas as plantas mais próximas do ponto georreferenciado.

3.3 Determinação da resistência do solo à penetração (RSP)

A determinação da resistência do solo à penetração (RSP) foi realizada em novembro de 2022, utilizando-se um penetrômetro de impacto posicionado a 60 cm das plantas demarcadas. O equipamento, caracterizado por massa de 4 kg e cone de 27 cm de circunferência, operou mediante o registro de impactos para a inserção da haste até 50 cm de profundidade (Figura 3).

Figura 3: Penetrômetro de impacto utilizado para determinação da resistência do solo.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O número de batidas (N) foi convertido em Megapascal (MPa) conforme equação de Solf (1991).

A análise dos dados foi estratificada nas camadas de 0-25 cm e 25-50 cm, visando avaliar, respectivamente, a zona de maior atividade radicular absorvente e a ocorrência de compactação subsuperficial restritiva ao aprofundamento das raízes.

3.4 Teste de capacidade de campo

A determinação da capacidade de campo foi realizada mediante a saturação das amostras de solo, seguida de um processo de drenagem natural com duração de duas horas para a eliminação da água gravitacional (Figura 4). Após o período de estabilização hídrica, o material foi submetido à secagem em estufa até atingir massa constante, permitindo a quantificação da massa seca e da umidade residual. O cálculo do parâmetro foi obtido conforme a Equação 2, aplicando-se o fator de correção de 60% sobre a gravimetria para a definição da capacidade de retenção hídrica na condição avaliada.

Onde m_h representa a massa do solo úmido e m_s a massa do solo seco.

Figura 4: Processo de determinação da Capacidade de Campo (CC) em laboratório.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

3.5 Levantamento topográfico

A caracterização do relevo foi realizada mediante levantamento topográfico com receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) em modo RTK (*Real Time Kinematic*)

(Figura 5). A amostragem compreendeu a coleta de 200 pontos cotados distribuídos na lavoura, processados posteriormente via interpolação TIN (*Triangular Irregular Network*). A escolha deste interpolador justifica-se pela formação de uma malha de triângulos adjacentes não sobrepostos, o que permite preservar os valores altimétricos originais nos vértices medidos e adequar a modelagem à distribuição irregular dos pontos amostrais.

Figura 5: Levantamento topográfico com receptor GNSS RTK.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

3.6 Incidência de bicho mineiro

A avaliação da incidência do bicho-mineiro (Figura 6) foi conduzida nos meses de novembro dos anos de 2022 e 2024. O monitoramento baseou-se na inspeção de três plantas selecionadas em cada ponto amostral georreferenciado. O procedimento de amostragem consistiu na observação do terceiro e quarto pares de folhas, abrangendo ambos os lados das plantas avaliadas, conforme protocolo de monitoramento descrito por Souza, Reis e Rigitano (1998). A incidência foi calculada pela razão entre o número de folhas infestadas e o número total de folhas observadas, expressando-se o resultado em porcentagem para representar o nível de infestação local.

Onde N_{inf} é o número de folhas infestadas e N_{total} é o número total de folhas observadas.

Figura 6: Avaliação da incidência de bicho-mineiro (*Leucoptera coffeella*).

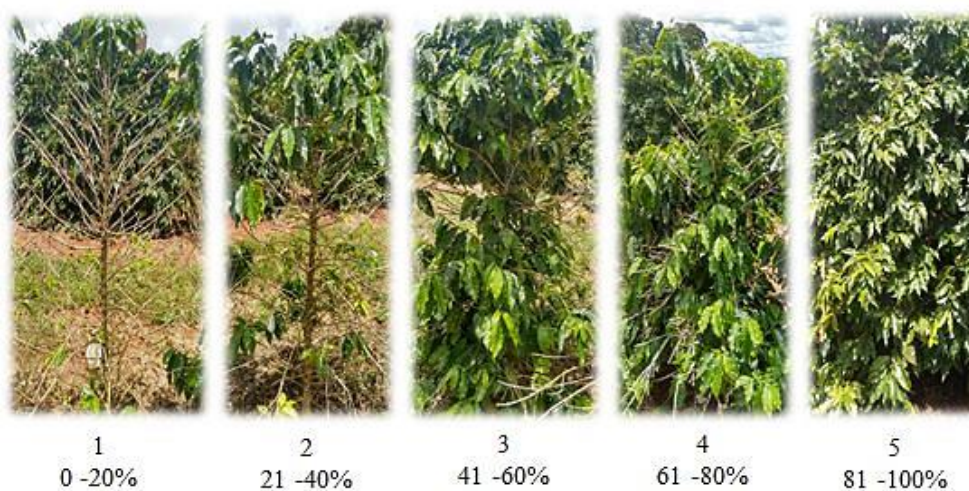


Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

3.7 Enfolhamento

A avaliação do enfolhamento foi realizada *in situ* nos meses de novembro de 2022 e 2024, mediante inspeção visual conduzida por três avaliadores. Adotou-se a escala de notas proposta por Alves *et al.* (2006), variando de 1 (plantas com acentuada desfolha) a 5 (máximo enfolhamento), conforme ilustrado na Figura 7. Para a composição dos dados, considerou-se a média aritmética das atribuições dos avaliadores em cada ponto amostral.

Figura 7- Nota de classificação visual do plantio de folhas em cafezais.



Fonte: Adaptado de Alves *et al.* (2006).

3.8 Índice de Vegetação

A caracterização espectral da lavoura foi realizada mediante o uso de imagens do satélite Sentinel-2, sensor MSI (*Multi-Spectral Instrument*), adquiridas em 10 de setembro de 2022 e 14 de setembro de 2024. Optou-se pela utilização de produtos de nível 2A, os quais são submetidos à correção atmosférica para conversão da reflectância do Topo da Atmosfera (TOA) em Reflectância de Superfície (BOA). Este pré-processamento elimina interferências de gases e aerossóis, assegurando a consistência radiométrica necessária para análises temporais.

Sobre essa base de dados calibrada, procedeu-se ao cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Equação 4), métrica utilizada para quantificar a densidade de biomassa e o vigor vegetativo das plantas (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009).

Onde *NIR* representa a reflectância no infravermelho próximo e *RED* a reflectância no vermelho.

3.9 Análise Geoestatística

A caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta fundamentou-se na teoria das variáveis regionalizadas, a qual assume que amostras distribuídas no espaço apresentam um grau de dependência entre si, estruturada em função da distância de separação.

O semivariograma estima a magnitude da variância espacial em função da distância, sendo calculado pela seguinte expressão matemática (Equação 5): onde $\gamma(h)$ representa o valor do variograma para a distância h , $N(h)$ é o número de pares de pontos separados pela distância h , e $Z(s)$ é o valor da variável em estudo no ponto x_i .

A análise do comportamento gráfico do semivariograma permitiu a identificação de três componentes estruturais para a modelagem espacial:

1. **Efeito Pepita:** Refere-se à descontinuidade do semivariograma na origem. Este parâmetro expressa a variabilidade não explicada pela escala de amostragem, englobando a microvariabilidade do solo e erros de medição.
2. **Patamar:** Representa o valor da semivariância no qual a função se estabiliza. Matematicamente, corresponde à variância total dos dados.

3. **Alcance:** Define a distância máxima em que existe correlação espacial entre os pontos amostrais. Amostras separadas por distâncias superiores ao alcance são consideradas estocasticamente independentes, apresentando distribuição espacial aleatória.

Para a representação contínua da variabilidade, o semivariograma experimental (pontos discretos) foi ajustado a modelos matemáticos teóricos que garantem a condição de "positi-definida" necessária para as equações de krigagem. Foram testados modelos clássicos como o Esférico, Exponencial e Gaussiano. A seleção do modelo de melhor ajuste obedeceu a critérios estatísticos, como o maior coeficiente de determinação (R^2), validados pela técnica de validação cruzada (*cross-validation*).

Uma vez definido o modelo teórico que melhor descreveu a estrutura de dependência espacial, procedeu-se à Krigagem Ordinária no qual a estimativa em um local não amostrado é dada por uma combinação linear ponderada dos valores vizinhos medidos.

3.10 Definição das unidades de gestão diferenciadas (UGDs)

A delimitação das UGDs fundamentou-se na premissa da estabilidade temporal dos atributos selecionados, utilizando-se as variáveis de Resistência do Solo à Penetração (RSP), Capacidade de Campo (CC) e Topografia (Altitude).

A escolha deste conjunto de dados justifica-se por representar características pedológicas e geomorfológicas intrínsecas à área, as quais apresentam baixa variabilidade temporal e são pouco suscetíveis a flutuações sazonais curtas, diferentemente de variáveis químicas que requerem monitoramento frequente.

Para a segmentação da área, aplicou-se o algoritmo de agrupamento não hierárquico *k-means*, definindo-se quatro clusters ($k=4$) sobre o espaço euclidiano multidimensional formado pelas variáveis padronizadas. O objetivo matemático central do algoritmo foi particionar as n observações interpoladas em grupos pré-definidos ($S = \{S1, S2, S3, S4\}$), de modo a minimizar a variância intra-grupo, expressa pela Soma dos Quadrados dos Erros (SQE).

O procedimento analítico desenvolveu-se de forma iterativa, iniciando-se com a determinação aleatória de quatro centroides iniciais no espaço de atributos. Na sequência, cada ponto da malha amostral foi atribuído ao cluster cujo centroide se encontrava a uma menor distância Euclidiana. Após essa etapa de atribuição, procedeu-se à atualização dos centroides, recalculados a partir da média aritmética dos vetores de atributos de todos os

pontos alocados a cada grupo. O ciclo de atribuição e atualização foi repetido sucessivamente até que a alteração na posição dos centroides se tornasse inferior a um limiar de tolerância pré-estabelecido, indicando a convergência do algoritmo e a estabilização definitiva das UGDs.

3.11 Validação agrônômica e análise estatística das UGDs

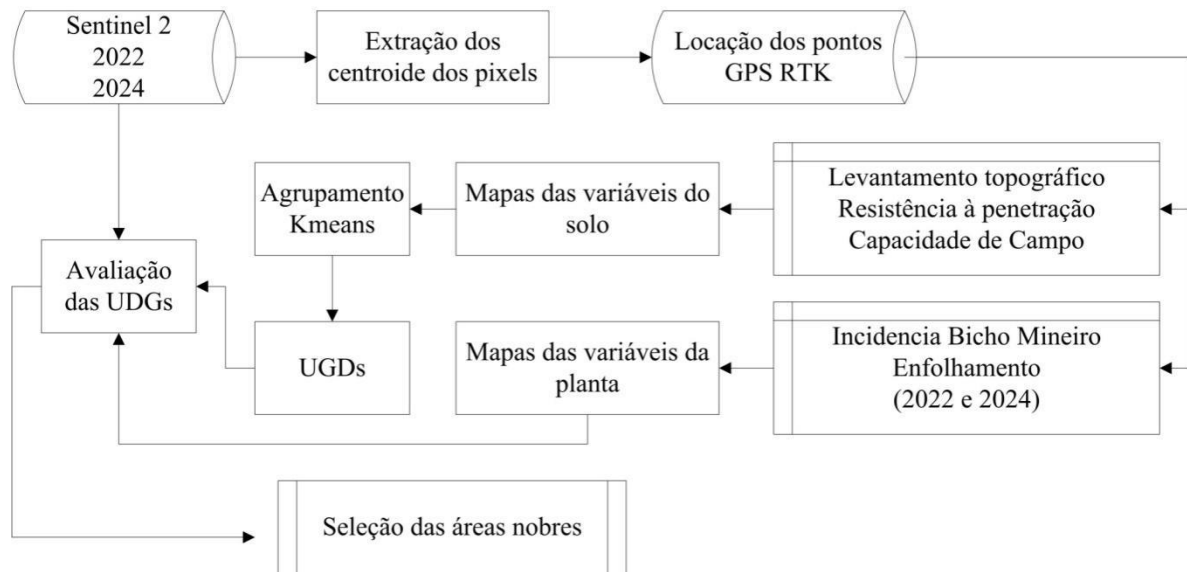
A etapa subsequente ao delineamento dos clusters consistiu na validação agrônômica das Unidades de Gestão Diferenciada (UGDs), visando confirmar se a segmentação espacial baseada em atributos do solo e relevo reflete, efetivamente, comportamentos distintos na vegetação e na fitossanidade da cultura. Para tal, as UGDs foram tratadas como fatores independentes em um delineamento experimental, sobre as quais foram avaliadas variáveis resposta de natureza espectral (NDVI), morfológica (índice de enfolhamento) e biótica (incidência de *Leucoptera coffeella*).

O procedimento estatístico adotado fundamentou-se na análise de variância (ANOVA) *univariada* (*one-way*), aplicada para testar a hipótese nula (H_0) de que as médias das variáveis biológicas são estatisticamente iguais entre as diferentes zonas de manejo delineadas. A eventual rejeição da hipótese nula pelo teste F ($p < 0,05$) indicaria a existência de heterogeneidade significativa entre os grupos, o que confirmaria que as UGDs capturam variabilidades agrônômicas reais no campo — resultado apresentado e discutido no Capítulo 4.

Nos casos em que a ANOVA indicasse significância, procedeu-se à aplicação de testes de comparação múltipla de médias (teste *post-hoc*). Esta etapa permitiu o ordenamento e a distinção estatística entre as UGDs, atribuindo letras distintas para grupos com comportamentos divergentes nas variáveis espectrais, morfológicas e bióticas avaliadas.

O fluxograma das etapas metodológicas, compreendendo a aquisição de dados orbitais e terrestres, processamento geoestatístico, definição das UGDs via algoritmo *k-means* e validação agrônômica está apresentado na Figura 8.

Figura 8: Fluxograma das etapas metodológicas (aquisição de dados, processamento e validação).



Fonte: Adaptado de Alves *et al.* (2006).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise Geoestatística das variáveis estudadas

A análise geoestatística revelou que todas as variáveis estudadas apresentaram estrutura de dependência espacial definida, permitindo o ajuste de modelos teóricos (Esférico e Gaussiano) aos semivariogramas experimentais com elevados coeficientes de determinação (R^2), que variaram de 0,71 a 0,99 (Tabela 1). Estes valores de R^2 indicam que os modelos ajustados explicaram a maior parte da variabilidade espacial dos dados, validando o uso da krigagem para a interpolação e mapeamento, conforme preconizado em estudos de variabilidade espacial na cafeicultura (CARVALHO *et al.*, 2017; FERRAZ *et al.*, 2012).

Tabela 1: Resumo dos parâmetros geoestatísticos e indicadores de qualidade de ajuste dos modelos de krigagem para as variáveis do estudo.

Variável	Modelo	Efeito Pepita	Patamar	Alcance (m)	MAE	R ²
BM 2022	Esférico	0	0.42	5688	0.008	0.98
	Gaussian					
BM 2024	o	0.0004	0.09	75.39	0.045	0.92
	Gaussian					
CC	o	3.96	303.7	79.29	1.464	0.97
Altitude	Esférico	0	24417	384970	0.233	0.99
	Gaussian					
RSP 25 cm	o	0.0004	0.03	58.16	0.011	0.98
RSP 50 cm	Esférico	0	1.13	2707	0.086	0.71

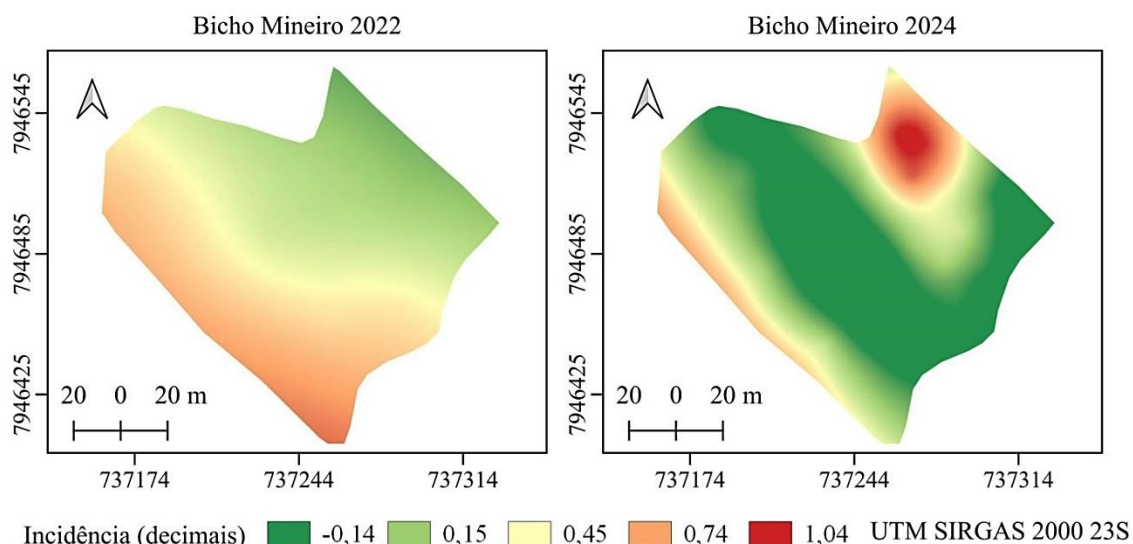
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Nota: os valores de alcance de BM 2022 (5.688 m) e de Altitude (384.970 m) superam amplamente a extensão da área experimental (1,5 ha) e não representam distâncias reais de correlação espacial. Esses valores atipicamente elevados são indicativos da presença de tendência regional (*drift*) nessas duas variáveis, ou seja, de uma variação suave e contínua ao longo de toda a área amostrada, sem estabilização do semivariograma dentro dos limites do talhão conforme discutido na seção 4.1.1.

4.1.1 Bicho Mineiro e Enfolhamento

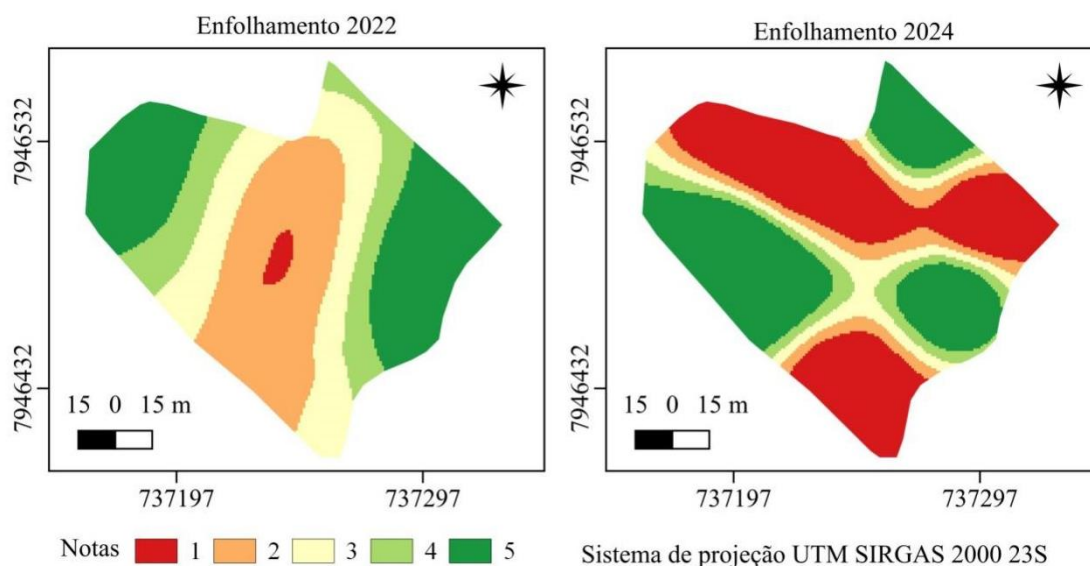
Na safra de 2022, marcada por um alto índice de enfolhamento, o ajuste ao modelo Esférico indicou um alcance de 5.688 metros valor muito superior à extensão da própria área experimental (1,5 ha) e que, portanto, não deve ser interpretado como uma distância de correlação espacial real, mas sim como indicativo de forte tendência regional (*drift*, ou deriva espacial): quando a variável analisada varia de forma suave e contínua ao longo de toda a área amostrada, sem que o semivariograma atinja um patamar de estabilização dentro dos limites do talhão, o algoritmo de ajuste tende a estimar um alcance artificialmente elevado, refletindo um padrão contínuo de dispersão do inseto em vez de um raio de correlação delimitado (Figura 9 e 10). Este cenário reflete uma elevada conectividade do *habitat*, corroborando estudos que demonstram que a distribuição de pragas no cafeeiro, como o bicho-mineiro, tende a apresentar forte estrutura de dependência espacial e colonização extensiva quando as condições do hospedeiro e do ambiente são favoráveis (ALVES *et al.*, 2011).

Figura 9. Distribuição interpolada da incidência do bicho mineiro para os anos de 2022 e 2024



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 10. Distribuição interpolada do enfolhamento para os anos de 2022 e 2024



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

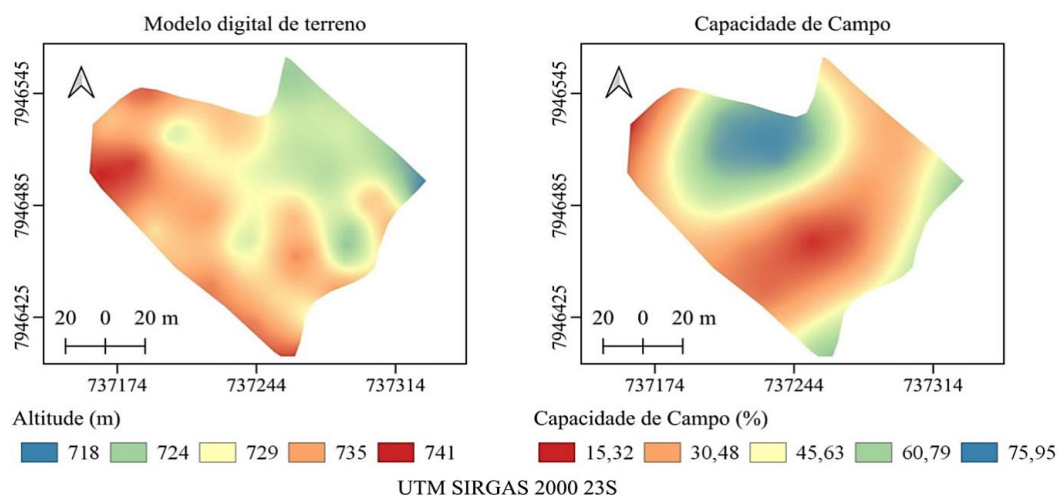
Em contrapartida, na safra de 2024, a redução acentuada do enfolhamento impôs uma severa fragmentação do habitat (Figura 9). O ajuste ao modelo Gaussiano, com alcance drasticamente reduzido para 75,39 metros, demonstra que a distribuição espacial de *L. coffeella* transicionou de um padrão contínuo para um comportamento agregado em "manchas" discretas. Esta agregação é frequentemente observada em análises espaço-temporais, na qual a infestação se concentra em focos específicos (reboleiras) em resposta à heterogeneidade do ambiente ou do hospedeiro (SCALON; MATEUS; ZACARIAS, 2013).

Esta retração na dependência espacial pode ser explicada pela escassez de substrato na maior parte da lavoura, restringindo a sobrevivência do inseto a zonas específicas de refúgio ecológico. A literatura recente reforça que o bicho-mineiro é uma praga chave que responde diretamente às variações microclimáticas e à disponibilidade de folhas, sendo sua população severamente impactada pela falta de alimento e abrigo (DANTAS *et al.*, 2021). Portanto, o curto alcance observado em 2024 não reflete apenas uma característica intrínseca de dispersão do inseto, mas sim uma limitação física imposta pela descontinuidade do dossel. Esse fenômeno alinha-se ao observado por (MARIN *et al.* 2019), que destacam a complexidade na identificação e mapeamento de variáveis bióticas do cafeeiro quando há interações com fatores de estresse abiótico, confinando a infestação estritamente aos locais onde a oferta alimentar permaneceu viável.

4.1.2 Capacidade de campo e MDT

A capacidade de campo revelou um efeito pepita de 3,96, indicando uma descontinuidade na origem que reflete a variabilidade não explicada pela escala de amostragem adotada (Figura 11). Agronomicamente, este parâmetro representa a micro-heterogeneidade intrínseca dos atributos físicos do solo a curtas distâncias, somada a possíveis erros experimentais de medição. A interpretação deste componente aleatório é fundamental na AP, pois estabelece o limite técnico da precisão do mapeamento, sugerindo que variações inferiores a este limiar devem ser tratadas como ruído natural do sistema solo-água, e não necessariamente como zonas de manejo distintas (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

Figura 11. Distribuição interpolada da Capacidade de Campo (CC) na área experimental



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

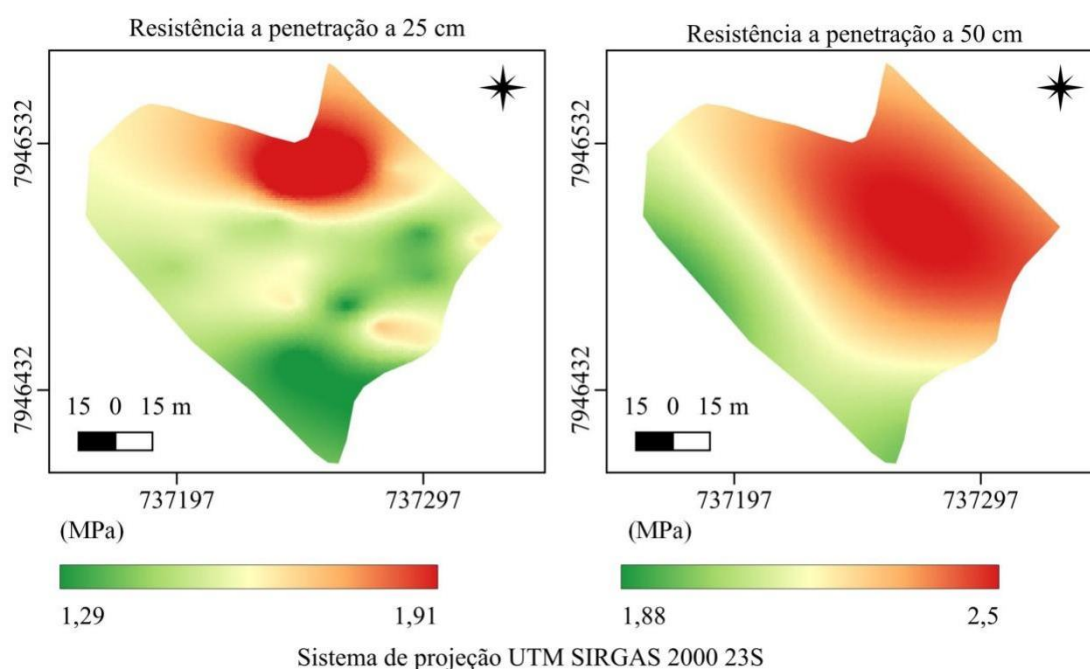
Em relação à estrutura de dependência espacial, o alcance de 79,29 metros delimita o raio de correlação espacial entre as amostras, fornecendo um parâmetro quantitativo essencial para o dimensionamento das UGDs. Estudos sobre a variabilidade de atributos físico-hídricos em lavouras cafeeiras corroboram que o conhecimento do alcance é determinante para definir a densidade amostral e o tamanho das zonas de manejo, garantindo que as intervenções agrônômicas respeitem a continuidade espacial dos atributos do solo (CARVALHO *et al.*, 2013).

Sob a ótica do manejo da irrigação, esse alcance de 79,29 metros representa a distância máxima dentro da qual dois pontos da lavoura tendem a apresentar comportamento hidrológico semelhante. Na prática, isso significa que um setor de irrigação dimensionado com extensão maior do que esse valor passaria a reunir, sob uma mesma unidade de manejo, subáreas com capacidades de retenção de água distintas algumas mais úmidas, outras mais secas, que responderiam de forma desigual a uma lâmina de irrigação aplicada uniformemente. A literatura destaca que a umidade na zona radicular possui forte correlação com o vigor da planta e que desconsiderar essa variabilidade pode comprometer a eficiência do uso da água (SANTOS *et al.*, 2014). Portanto, o raio de aproximadamente 79 metros define a escala máxima de homogeneidade para este atributo: setores hidráulicos dimensionados dentro desse limite tendem a reunir plantas com necessidades hídricas semelhantes, minimizando a ocorrência simultânea de déficit hídrico em subáreas mais secas e percolação profunda em subáreas mais úmidas dentro de um mesmo setor, otimizando a relação água-solo-planta e a produtividade da cultura (FERRAZ *et al.*, 2012).

4.1.3 Resistência do solo à penetração

A caracterização da RSP indicou que a área experimental situa-se fora dos limiares de compactação crítica, não impondo restrições físicas severas ao sistema radicular do cafeeiro (Figura 12). Ao confrontar os dados observados com a literatura especializada, verifica-se que os valores médios permanecem dentro de faixas fisiologicamente aceitáveis. Segundo MORAES *et al.* (2014), solos com resistência de até 3,5 MPa não são considerados críticos para o crescimento vegetal. Sob uma ótica mais conservadora, Canarache (1990) estabelece o limiar de 2,5 MPa, valor que, embora mais restritivo, não foi extrapolado de maneira generalizada na área avaliada.

Figura 12. Distribuição interpolada da Resistência do Solo à Penetração (RSP) nas camadas de 0-25 cm e 25-50 cm



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A análise da distribuição vertical da resistência revelou uma nítida estratificação no perfil do solo. A camada superficial (0 a 0,25 m) exibiu valores de RSP consistentemente inferiores em comparação à camada subsuperficial (0,25 a 0,50 m). Conforme (ROS *et al.* 2011), a menor coesão na camada arável é frequentemente atribuída aos maiores teores de matéria orgânica, que favorecem a estruturação, a agregação e a macroporosidade do solo, facilitando o desenvolvimento radicular. Cabe ressaltar, contudo, que essa interpretação

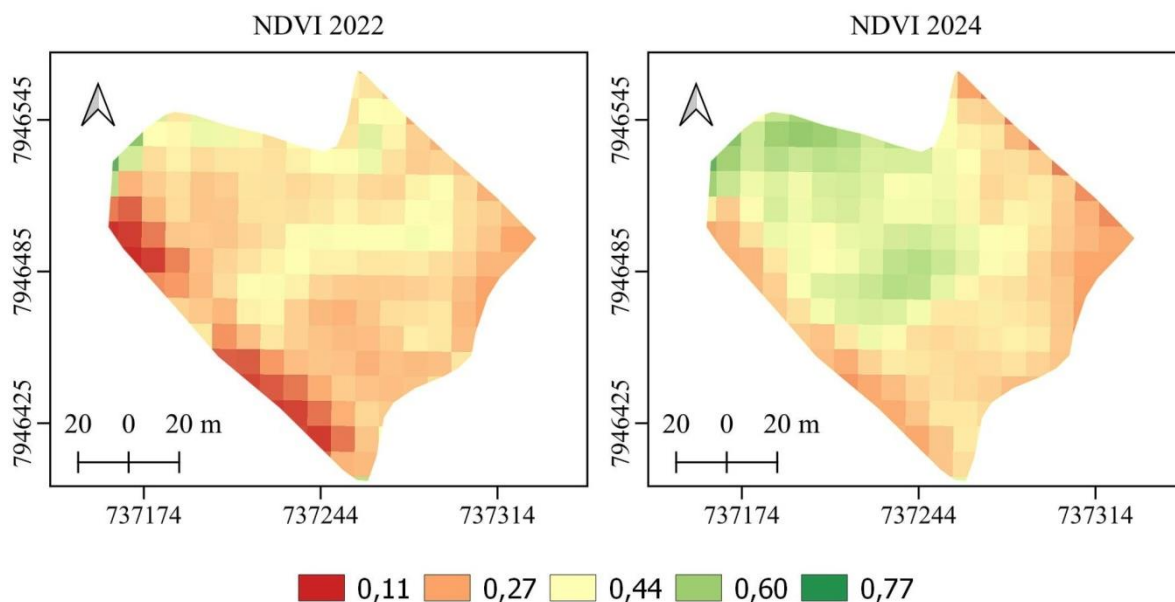
baseia-se na relação já estabelecida pela literatura, uma vez que não foram realizadas, no presente estudo, análises químicas do solo ou de teor de matéria orgânica que permitissem confirmar diretamente essa hipótese para a área experimental. Adicionalmente, como a coleta de dados de RSP foi realizada no mês de novembro, período de maior precipitação na região (item 3.1), a umidade do solo constitui um fator de confusão relevante para a interpretação dos resultados: é amplamente documentado que a resistência à penetração decresce com o aumento do teor de água do solo, podendo essa relação, por si só, explicar parte da menor resistência observada na camada superficial (TORMENA *et al.*, 2002). Recomenda-se que estudos futuros incluam a determinação da umidade gravimétrica no momento da coleta, bem como a caracterização química e granulométrica do solo, de modo a permitir a distinção entre os efeitos da umidade e os da matéria orgânica sobre a resistência à penetração.

Em contrapartida, o incremento da resistência em profundidade corrobora os resultados de (EFFGEN *et al.* 2012). Ao estudarem as propriedades físicas do solo sob diferentes manejos na cafeicultura, os autores também constatarem maior impedimento mecânico na camada de 0,20–0,40 m, sugerindo um padrão pedológico ou antrópico comum a esses sistemas de produção. É relevante destacar que, embora haja maior resistência em profundidade, a camada superficial (0–0,30 m) concentra a maior parte do sistema radicular absorvente do cafeeiro, responsável pela extração de água e nutrientes, conforme apontado por SILVA *et al.* (2009) e RONCHI *et al.* (2015). Portanto, a condição física favorável na superfície mitiga os potenciais impactos negativos da camada subsuperficial sobre a produtividade da lavoura.

4.2 Análise temporal do NDVI

A análise temporal do NDVI revelou um contraste significativo no comportamento espectral da área entre os anos avaliados (Figura 13). Na safra de 2022, observou-se uma predominância de valores de NDVI inferiores a 0,40, indicativo de uma cobertura vegetal com baixo desenvolvimento ou vigor fotossintético reduzido. Segundo VOLPATO *et al.* (2013), valores de NDVI abaixo de 0,70 em cafeeiros podem sinalizar condições de estresse hídrico ou baixa densidade foliar. O cenário de 2022, portanto, reflete uma resposta espectral fortemente influenciada pelo comportamento do solo exposto ou pela vegetação senescente, uma vez que a ausência de tratos culturais no cafeeiro limitou a expansão da área foliar da cultura principal.

Figura 13. NDVI Sentinel 2 no mês de setembro para os anos 2022 e 2024



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Em contrapartida, no ano de 2024, verificou-se uma elevação generalizada nos índices, com valores predominantes acima de 0,40, mesmo sem a retomada dos tratos culturais no cafeeiro. Este incremento no NDVI não deve ser interpretado isoladamente como uma recuperação do vigor do cafeeiro, mas sim analisado sob a ótica da mistura espectral (*spectral mixture*). Como o cafeeiro é uma cultura perene cultivada em linhas, a resposta espectral captada pelo sensor orbital (Sentinel-2) é composta pela integração da reflectância do dossel da cultura, do solo e da vegetação presente nas entrelinhas.

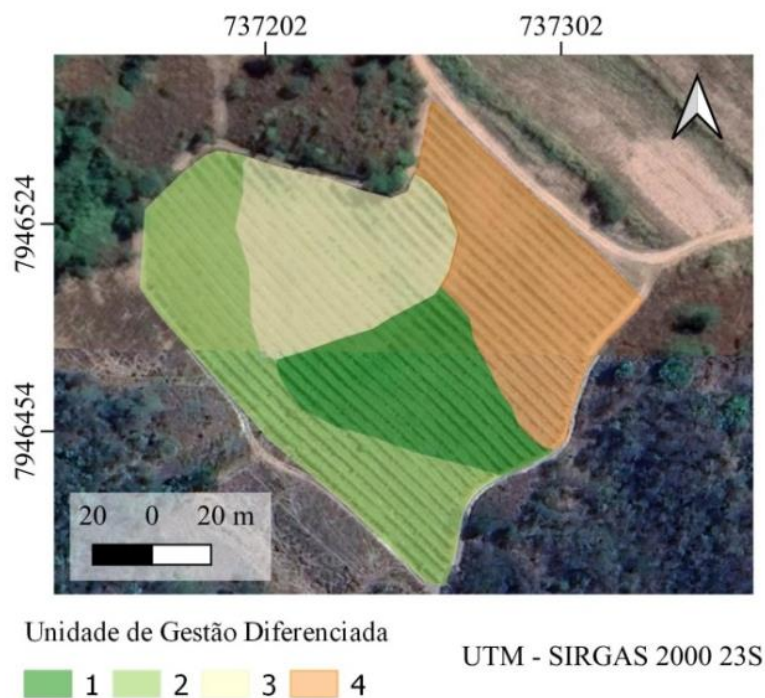
A hipótese de que o aumento do NDVI em 2024 está atrelado ao manejo (ou falta de manejo) das entrelinhas é corroborada pela literatura. Moreira, Adami e Rudorff (2004) alertam que em lavouras com menor densidade de dossel ou espaçamentos mais largos, a interferência do "alvo de fundo" (solo ou plantas daninhas) é determinante na composição do pixel. No caso estudado, a proliferação de vegetação espontânea (como *Urochloa* sp.) nas entrelinhas durante 2024 gerou um aporte de biomassa fotossinteticamente ativa que elevou a resposta na banda do infravermelho próximo (NIR).

4.3 Agrupamento de classes (UGDs)

A segmentação da área experimental através da análise de agrupamento (*K-means*) delineou quatro ambientes de produção com dinâmicas edafoclimáticas distintas,

fundamentando a necessidade de adoção de estratégias de manejo sítio-específicas (Figura 14).

Figura 14. Delineamento das quatro UGDs após o processo de agrupamento (K-means)



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A avaliação conjunta dos atributos físico-hídricos do solo e da posição topográfica evidenciou diferenças estruturais significativas entre as Unidades de Gestão Diferenciada (UGDs), confirmando a heterogeneidade funcional do talhão (Tabela 2). Este diagnóstico corrobora os princípios da Agricultura de Precisão, no qual a identificação da variabilidade espacial dos fatores de produção é premissa para a adoção de práticas de manejo localizado, visando a otimização do uso de insumos e a sustentabilidade do sistema produtivo (ALVES; QUEIROZ; PINTO, 2006; MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

Tabela 2 – Média e desvio das variáveis de Capacidade de Campo, Altitude e Resistência nas UGDs

UGD	Capacidade de campo (%)		Altitude (m)		Resistência 25 cm (Mpa)		Resistência 50 cm (Mpa)	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
1	29,33	8,02	730,72	1,17	1,53	0,06	2,34	0,10
2	37,26	10,22	734,56	1,47	1,41	0,10	2,01	0,11
3	61,97	8,14	730,81	1,90	1,48	0,06	2,37	0,11
4	39,73	7,14	727,16	1,56	1,71	0,17	2,45	0,06

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A Capacidade de Campo (CC) apresentou elevada amplitude de variação espacial, atuando como um indicador determinante para o zoneamento. A UGD 3 destacou-se com média significativamente superior (61,97%), configurando-se como a principal zona de armazenamento hídrico. Conforme a literatura, a retenção de água está intimamente associada à textura e à estrutura do solo, sendo que maiores teores de argila e silte, aliados a uma melhor agregação, favorecem a retenção matricial (ARRUDA; ZULLO JUNIOR; OLIVEIRA, 1987). Ressalta-se que essa explicação decorre da relação estabelecida pela literatura consultada, já que a caracterização granulométrica (teores de argila, silte e areia) do solo da área experimental não foi determinada neste estudo; recomenda-se sua realização em trabalhos futuros para validar diretamente essa hipótese. Em contraste, a UGD 1 apresentou o menor valor médio (29,33%), indicando maior vulnerabilidade ao déficit hídrico e rápido esgotamento da água disponível na zona radicular, o que exige um manejo de irrigação diferenciado para evitar o estresse fisiológico da planta, especialmente em períodos de alta demanda atmosférica (SANTOS *et al.*, 2014).

No que tange à topografia, embora as diferenças altimétricas entre as UGDs sejam de pequena magnitude, elas mostraram-se suficientes para influenciar a dinâmica hidrológica. A UGD 2, situada na posição topográfica mais elevada, favorece a drenagem natural, reduzindo riscos de hipóxia radicular por saturação (IORI *et al.*, 2014). Inversamente, a UGD 4 ocupa a cota mais baixa, estando sujeita à convergência de fluxos superficiais e subsuperficiais. Estudos indicam que a posição no relevo e a declividade exercem influência direta sobre a variabilidade dos atributos físicos do solo, afetando a infiltração e o acúmulo de sedimentos (IORI *et al.*, 2014).

Quanto à Resistência do Solo à Penetração (RSP), a análise estratificada revelou interações importantes com o desenvolvimento radicular. Na camada superficial (0-0,25 m), a

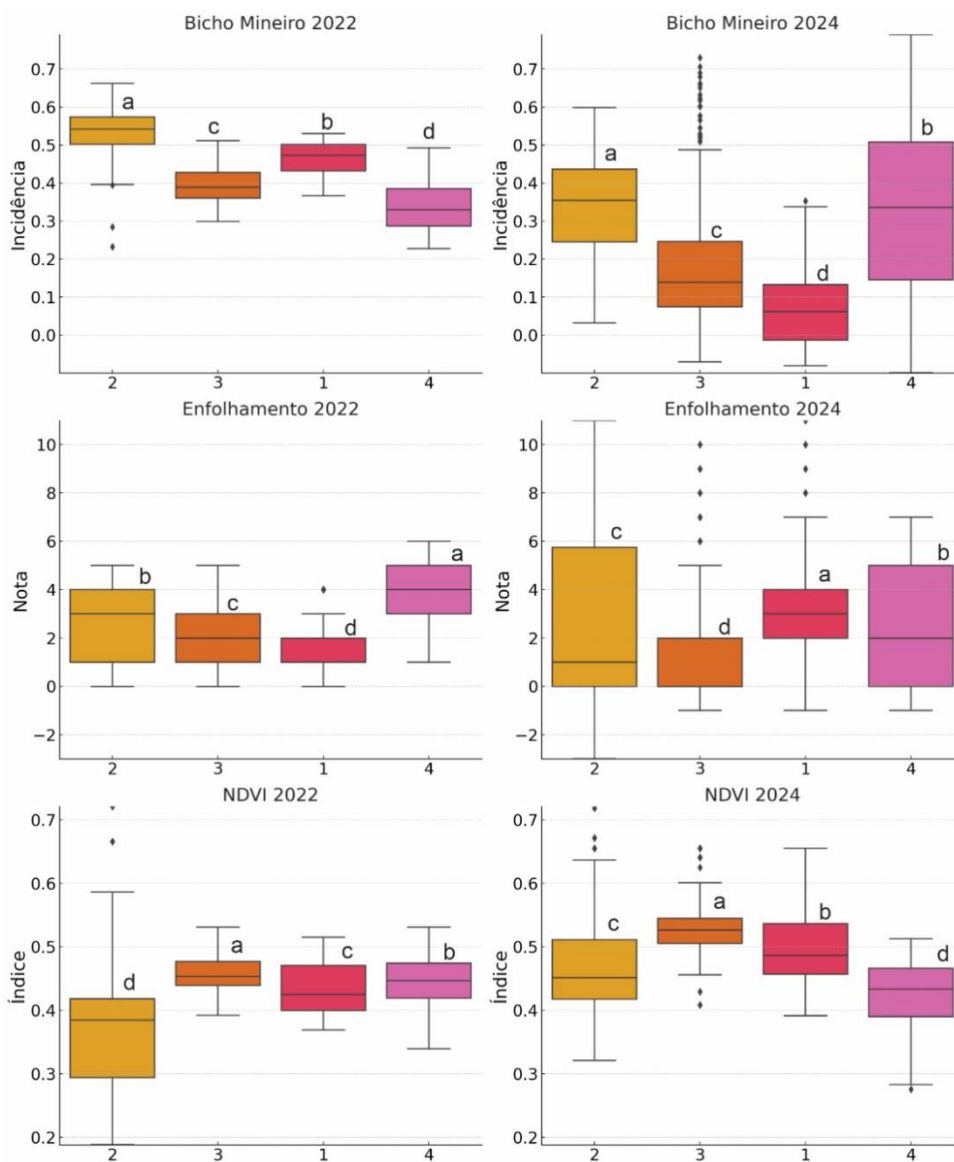
UGD 2 apresentou os menores valores (1,41 MPa), proporcionando condições físicas ideais para a exploração do solo pelo sistema radicular, que nesta profundidade concentra a maior parte da absorção de água e nutrientes (SILVA *et al.*, 2009). A UGD 4, por sua vez, registrou a maior resistência média nesta camada (1,71 MPa), sugerindo maior coesão estrutural.

Em profundidade (0,25-0,50 m), observou-se um incremento generalizado da resistência em todas as UGDs, com destaque para a UGD 4 (2,45 MPa) e UGD 3 (2,37 MPa). Este padrão de adensamento subsuperficial corrobora os achados de Effgen *et al.* (2012) e Ros *et al.* (2011), que atribuem a menor resistência superficial ao maior teor de matéria orgânica e atividade biológica, enquanto as camadas inferiores tendem a apresentar maior densidade natural ou pedogenética. Contudo, é fundamental ressaltar que, mesmo os maiores valores observados na UGD 4 não ultrapassaram os limiares críticos de impedimento radicular estabelecidos por Canarache (1990) (2,5 MPa) e Moraes *et al.* (2014) (3,5 MPa), indicando que a limitação física não é, no momento, o fator restritivo primário à produtividade nestas unidades.

4.4 Interações Espectrais e Fitossanitárias nas UGDs

A análise estatística confirmou a existência de diferenças significativas entre as Unidades de Gestão Diferenciada (UGD), evidenciando que a variabilidade espacial dos atributos agronômicos e fitossanitários no talhão não ocorre de maneira aleatória, mas estruturada (Figura 15). Este diagnóstico corrobora os preceitos da Cafeicultura de Precisão, que preconiza a identificação de zonas de manejo específicas para otimizar a tomada de decisão e o uso de insumos (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

Figura 15. Boxplot das variáveis e teste de media para diferentes UGDs



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Ao examinar a interação entre os indicadores de vigor e a incidência de pragas, observou-se um comportamento heterogêneo que desafia correlações lineares simplistas. Na UGD 2, verificou-se uma maior pressão de Bicho-Mineiro (*Leucoptera coffeella*) tanto na safra de 2022 quanto na de 2024, consistentemente associada a menores valores de NDVI. Esta relação inversa sugere que a redução do vigor espectral é uma resposta fisiológica direta à perda de área foliar funcional e à necrose dos tecidos. Estudos recentes, como o de Santos *et al.* (2022) e Vilela *et al.* (2023), validam essa observação ao demonstrarem que plantas infestadas apresentam reflectância significativamente menor na região do infravermelho

próximo (NIR) em comparação a plantas saudáveis, devido à destruição do parênquima foliar pelas larvas, o que reduz os valores de índices de vegetação como o NDVI.

Entretanto, as UGDs 3 e 4 apresentaram dinâmicas espectrais que exigem uma interpretação dissociada da avaliação visual imediata, influenciada por fatores de mistura espectral. A UGD 3, caracterizada por baixa incidência da praga e reduzido enfolhamento do cafeeiro, exibiu paradoxalmente valores elevados de NDVI. Este fenômeno atribui-se à interferência do sinal de fundo gerado pela vegetação espontânea nas entrelinhas (*Urochloa* sp.). Conforme alertado por Moreira, Adami e Rudorff (2004), em lavouras com menor densidade de dossel, a resposta espectral é fortemente contaminada pelo alvo "solo" ou "plantas daninhas", gerando ruídos que podem mascarar o real estado do cafeeiro e configurar um "falso positivo" de sanidade nos índices de vegetação.

Em contraste, a UGD 4 demonstrou um cenário oposto: elevados níveis de enfolhamento visual coexistindo com maior presença de bicho-mineiro e baixos valores de NDVI. Este resultado reforça a distinção crítica entre a quantidade de folhas e a sua qualidade fisiológica. Embora a planta mantenha a estrutura foliar, o dano celular provocado pela minação compromete a eficiência fotossintética e a estrutura interna da folha. Segundo Orlando (2025), a reflectância no infravermelho é altamente sensível a alterações no mesófilo foliar; portanto, mesmo sem desfolha total, a necrose interna reduz a resposta espectral. Tal constatação evidencia que a avaliação visual isolada pode subestimar o impacto fisiológico da praga, enquanto os sensores remotos captam o estresse "invisível" a olho nu (CHEMURA; MUTANGA; DUBE, 2017).

5 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou a viabilidade de utilizar dados de solo e sensoriamento remoto para o delineamento de Unidades de Gestão Diferenciada (UGDs) em lavouras cafeeiras.

A capacidade de campo foi determinante na segmentação das UGDs, evidenciando a necessidade de manejo hídrico adequado para evitar estresse nas plantas e reduzir a incidência de bicho-mineiro.

A análise do NDVI destacou seu potencial preditivo para o monitoramento de pragas e saúde vegetal, reforçando o papel do sensoriamento remoto na agricultura de precisão.

Como perspectivas futuras, sugere-se a ampliação do estudo para outras regiões cafeeiras e a integração de modelos climáticos, visando aprimorar as práticas de manejo diante de cenários de mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- AHAMED, T. *et al.* A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 2455–2469, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.028>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- ALVES, E. A.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C. **Cafeicultura de precisão**. 1. ed. UFLA: Editora UFLA, 2006.
- ALVES, M. C. *et al.* Geostatistical analysis of the spatial variation of the berry borer and leaf miner in a coffee agroecosystem. **Precision Agriculture**, v. 12, n. 1, p. 18–31, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-010-9156-4>. Acesso em: 05 fev. 2025.
- ALVES, M. C. *et al.* Modeling spatial variability and pattern of rust and brown eye spot in coffee agroecosystem. **Journal of Pest Science**, v. 82, n. 2, p. 137–148, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10340-008-0232-4>. Acesso em: 18 mar. 2025.
- ARRUDA, F. B.; ZULLO JUNIOR, J.; OLIVEIRA, J. B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, n. 1, p. 11–15, 1987. Disponível em: <https://www.rbcsonline.org.br>. Acesso em: 22 abr. 2025.
- BERNARDES, T. *et al.* Monitoring biennial bearing effect on coffee yield using MODIS remote sensing imagery. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2012, [S. l.]. **Proceedings [...]**. [S. l.]: IEEE, 2012. v. 4, n. 9, p. 3760–3763. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6350580>. Acesso em: 10 mai. 2025.
- CANARACHE, A. PENETR - a generalized semi-empirical estimating soil resistance to penetration. **Soil and Tillage Research**, v. 16, n. 1–2, p. 51–70, 1990. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(90\)90022-3](https://doi.org/10.1016/0167-1987(90)90022-3). Acesso em: 01 jun. 2025.
- CARVALHO, L. C. C. *et al.* Geostatistical analysis of Arabic coffee yield in two crop seasons. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 6, p. 410–414, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n6p410-414>. Acesso em: 14 jun. 2024.
- CARVALHO, L. C. C. *et al.* Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agronômicas da cultura do café. **Coffee Science**, v. 8, n. 3, p. 265–275, 2013. Disponível em: <http://www.coffeescience.ufla.br>. Acesso em: 29 jun. 2024.
- CHEMURA, A.; MUTANGA, O.; DUBE, T. Separability of coffee leaf rust infection levels with machine learning methods at Sentinel-2 MSI spectral resolutions. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 5, p. 859–881, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9495-0>. Acesso em: 02 jul. 2025.
- CHEMURA, A. *et al.* Mapping spatial variability of foliar nitrogen in coffee (*Coffea arabica* L.) plantations with multispectral Sentinel-2 MSI data. **ISPRS Journal of Photogrammetry**

and Remote Sensing, v. 138, n. 1, p. 1–11, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.004>. Acesso em: 15 jul. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de café**. Brasília, DF, v. 12, n. 4, 4º levantamento, dez. 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 20 jul. 2024.

DANTAS, J. *et al.* A comprehensive review of the coffee leaf miner *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae). **Insects**, v. 12, n. 12, p. 1130, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/insects12121130>. Acesso em: 11 jan. 2025.

DIAS, P. *et al.* Crescimento e alocação de biomassa em duas progênies de café submetidas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 31., 2005, Guarapari. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: MAA/PROCAFÉ, 2005. p. 1–5. Disponível em: <http://www.cbpc.com.br>. Acesso em: 23 fev. 2024.

EFFGEN, T. A. M. *et al.* Physical soil properties as a function of management in crops of conilon coffee. **Revista Ceres**, v. 59, n. 3, p. 414–421, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000300018>. Acesso em: 17 mar. 2025.

FERNANDES, M. I. S. *et al.* Parâmetros produtivos e de qualidade de cultivares de cafeeiros na região do Alto Paranaíba, Minas Gerais, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e147996681, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i9.6681>. Acesso em: 08 abr. 2024.

FERRAZ, G. A. S. *et al.* Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 1, p. 140–150, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000100015>. Acesso em: 19 mai. 2024.

IORI, P. *et al.* Influence of field slope and coffee plantation age on the physical properties of a Red-Yellow Latosol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 107–117, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100010>. Acesso em: 03 jun. 2026.

MALLICK, J. *et al.* Analysing the trend of rainfall in Asir region of Saudi Arabia using the family of Mann-Kendall tests, innovative trend analysis, and detrended fluctuation analysis. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 143, n. 1–2, p. 823–841, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03453-1>. Acesso em: 25 jun. 2025.

MARIN, D. B. *et al.* Multispectral remote sensing in the identification and mapping of biotic and abiotic coffee tree variables. **Revista Ceres**, v. 66, n. 2, p. 142–153, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201966020008>. Acesso em: 09 jul. 2025.

MARTINS, F. B. *et al.* Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, p. 1–20, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v23i0.58280>. Acesso em: 18 jul. 2025.

MBWAMBO, S. G.; MOURICE, S. K.; TARIMO, A. J. P. Climate change perceptions by smallholder coffee farmers in the northern and southern highlands of Tanzania. **Climate**, v. 9,

n. 6, p. 90, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cli9060090>. Acesso em: 14 jan. 2025.

MEIRELES, D. D.; CARVALHO, J. D. A.; MORAES, J. C. Avaliação da infestação do bicho-mineiro e do crescimento do cafeeiro submetido a diferentes níveis de déficit hídrico. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 25, n. 2, p. 371–374, 2001. Disponível em: <http://www.editora.ufla.br>. Acesso em: 28 fev. 2025.

MIRANDA, J. R. *et al.* Detection of coffee berry necrosis by digital image processing of Landsat 8 OLI satellite imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 85, p. 101983, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101983>. Acesso em: 11 mar. 2025.

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

MORAES, M. T. *et al.* Physical properties of a Latosol under no-tillage and conventional tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 107–117, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100010>. Acesso em: 16 abr. 2024.

MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Análise spectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 3, p. 223–231, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000300003>. Acesso em: 27 mai. 2024.

NESTEL, D.; DICKSCHEN, F.; ALTIERI, M. A. Seasonal and spatial population loads of a tropical insect: the case of the coffee leaf-miner in Mexico. **Ecological Entomology**, v. 19, n. 2, p. 159–167, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2311.1994.tb00405.x>. Acesso em: 08 jun. 2024.

ORLANDO, V. S. W. **Deteção dos sintomas de infestação do bicho-mineiro do cafeeiro (*Leucoptera coffeella*) por meio de sensoriamento remoto em múltiplas escalas**. 2025. Tese (Doutorado em Cartografia) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2025. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br>. Acesso em: 21 jun. 2025.

PIAS, O. H. C. *et al.* Soil penetration resistance mapping quality: effect of the number of subsamples. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 40, p. e35280, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v40i1.35280>. Acesso em: 05 jul. 2024.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação. **Biologia**, v. 16, n. 1, p. 127, 2009. Disponível em: <http://www.inpe.br>. Acesso em: 12 jul. 2024.

RONCHI, C. P. *et al.* Morfologia radicular de cultivares de café arábica submetidas a diferentes arranjos espaciais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 3, p. 187–195, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000300002>. Acesso em: 19 jul. 2024.

ROS, V. D. V. *et al.* Oxisol resistance to penetration in no-till system after sowing. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 6, p. 1104–1114, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000600007>. Acesso em: 03 fev. 2025.

SANTOS, L. M. *et al.* Vegetation indices applied to suborbital multispectral images of healthy coffee and coffee infested with coffee leaf miner. **AgriEngineering**, v. 4, n. 1, p. 311–319, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriengineering4010021>. Acesso em: 14 mar. 2025.

SANTOS, W. J. R. *et al.* Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale. **Geoderma**, v. 221-222, p. 91–95, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.011>. Acesso em: 22 abr. 2025.

SCALON, J. D.; MATEUS, A. L. S. S.; ZACARIAS, M. S. Análise espaço-temporal do nível de infestação do bicho-mineiro *Leucoptera coffeella* em cafezal orgânico. **Coffee Science**, v. 8, n. 3, p. 343–353, 2013. Disponível em: <http://www.coffeescience.ufla.br>. Acesso em: 30 mai. 2025.

SILVA, A. L. *et al.* Soil water extraction by roots and Kc for the coffee crop. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 257–261, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000300003>. Acesso em: 11 jun. 2025.

SILVA, F. M. *et al.* Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 1, p. 231–241, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000100033>. Acesso em: 24 jun. 2025.

SOARES, A. R. *et al.* Efeito do déficit hídrico sobre a quebra da dormência na floração de um cultivar de café arábica irrigado por gotejamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 27., 2001, Uberaba. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: MAA/PROCAFÊ, 2001. p. 15–18. Disponível em: <http://www.cbpc.com.br>. Acesso em: 07 jul. 2025.

SOUZA, J. C.; REIS, P. R.; RIGITANO, R. L. O. **Bicho-mineiro do cafeeiro: biologia, danos e manejo integrado**. Belo Horizonte: EPAMIG, 1998.

TORMENA, C. A. *et al.* Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agrícola**, v. 59, n. 4, p. 795–801, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000400026>. Acesso em: 16 jul. 2025.

VIANA, A. B. G. A. *et al.* **Balanco do agronegócio 2021**. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais, 2022. Disponível em: <http://www.agricultura.mg.gov.br>. Acesso em: 20 jul. 2025.

VILELA, E. F. *et al.* New spectral index and machine learning models for detecting coffee leaf miner infestation using Sentinel-2 multispectral imagery. **Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 388, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture13020388>. Acesso em: 18 jan. 2025.

VOLPATO, M. M. L. *et al.* MODIS images for agrometeorological monitoring of coffee areas. **Coffee Science**, v. 8, n. 2, p. 168–175, 2013. Disponível em: <http://www.coffeescience.ufla.br>. Acesso em: 09 fev. 2025.

ZHAO, D. *et al.* Sugarcane response to water deficit stress during early growth on organic and sand soils. **American Journal of Agricultural and Biological Sciences**, v. 5, n. 3, p. 403–414, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2010.403.414>. Acesso em: 26 mar. 2025.