



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA

BRUNO SANTANA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NO MONITORAMENTO DA
CULTURA DO MILHO (*Zea mays* L.) COM ARP's EM DIFERENTES ALTURAS
DE VOO**

AREIA
2025

BRUNO SANTANA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NO MONITORAMENTO DA
CULTURA DO MILHO (*Zea mays* L.) COM ARP's EM DIFERENTES ALTURAS
DE VOO**

Trabalho de Conclusão de Curso em
Agronomia da Universidade Federal da
Paraíba, como requisito parcial à obtenção do
título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Guttemberg da Silva
Silvino.

Coorientador(a): Dra. Maria Cristina dos
Santos Pereira.

AREIA

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586a Silva, Bruno Santana da.

Avaliação de índices de vegetação no monitoramento da cultura do milho (*Zea mays* L.) com ARP's em diferentes alturas de voo / Bruno Santana da Silva. - Areia:UFPB/CCA, 2025.

37 f. : il.

Orientação: Guttemberg da Silva Silvino.

Coorientação: Maria Cristina dos Santos Pereira.
TCC (Graduação) - UFPB/CCA.

1. Agronomia. 2. Sensoriamento remoto. 3. Índices de vegetação. 4. Agricultura de precisão. I. Silvino, Guttemberg da Silva. II. Pereira, Maria Cristina dos Santos. III. Título.

UFPB/CCA-AREIA

CDU 631/635(02)



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE AGRONOMIA

DEFESA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aprovada em 09/10/2025

**“AVALIAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NO MONITORAMENTO DA
CULTURA DO MILHO (*Zea mays* L.) COM ARPS EM DIFERENTES ALTURAS
DE VOO.”**

Autor: **BRUNO SANTANA DA SILVA**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Guttemberg da Silva Silvino
Orientador (a) – UFPB

Dr. Ricardo da Cunha Correia Lima
Examinador (a) – INSA

Msc. Haile Silvino Guimarães
Examinador (a) – JAPUNGU AGROINDUSTRIAL

A Deus, por ter me dado forças para alcançar meus objetivos. A meus pais, por terem me educado e feito o impossível para que os seus 3 filhos pudessem ser alguém na vida, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a **Deus** por me permitir chegar tão longe, e nunca ter fraquejado a ponto de desistir dos meus objetivos, mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, **Ana Paula Santana Silva** e **Ailton Maria da Silva**, por sempre insistirem nos meus estudos, mesmo quando eu não queria. Os senhores são a base de todas as conquistas alcançadas, e de todos os projetos que virão.

Aos meus irmãos, **José Roberto Santana da Silva** e **José Pedro Santana da Silva**, por sempre me ensinarem algo, muitas das vezes sem dizer uma palavra.

A minha avó **Otília Santana**, por todas as bençãos deferidas a mim. Assim, como a **tia Rita** (In memoria), que sempre orou por mim, e aos seus filhos, pelos conselhos e pelo carinho de sempre.

A **Marcos André, Roberto Ítalo** e **Antenor Neto**, por terem me acolhido logo no início da graduação, e por se tornarem pessoas em que confio e admiro. Espero ter sempre a amizade de vocês.

A **Elnatan Alves, Leandro Alves** e **Carlos Wanderson**, que entres as brincadeiras e os momentos de reflexão, firmamos uma boa amizade. Assim como aos colegas e amigos **Thiago Leandro, Manoel Monteiro, Jonas Fortunato, Jheison Yan, João Pedro, Luiz Nunes** e **Wellington Torres**.

A **Ediele Rodrigues**, pelos conselhos e brincadeiras. A **Sara Rafaela**, por mostrar que os objetivos se alcançam com perseverança e foco. Ao mestre **Fiorete**, pela amizade e parceria empresarial.

Ao meu orientador Dr. **Guttemberg da Silva Silvino**, pela paciência em me ensinar e me apresentar a Topografia que os livros não retratam. A minha coorientadora Dra. **Maria Cristina dos Santos Pereira**, por ter ensinado a ter foco naquilo que estou buscando, e sempre tratar os problemas com positividade.

Ao **Centro de Ciências Agrárias**, e a todos que fazem parte desse ambiente de ensino, meu mais sincero obrigado, é por conta de todos que estou alcançando o tão sonhado título de Engenheiro Agrônomo.

RESUMO

A crescente demanda por práticas agrícolas sustentáveis tem impulsionado o uso de drones (ARP's) para monitoramento de lavouras, permitindo gestão mais precisa do desenvolvimento das culturas. No Brasil, o milho híbrido Robusto é destacado por sua rusticidade e adaptabilidade. Sensores ópticos RGB permitem calcular índices de vegetação como RGBVI e VARI, estimando densidade e vigor das plantas sem necessidade de infravermelho, reduzindo custos operacionais. Entretanto, a acurácia desses índices depende da altura de voo, estágio fenológico e resolução das imagens. Com isso, objetivou-se avaliar os índices de vegetação na faixa do visível no monitoramento da cultura do milho (*Zea mays* L.), utilizando imagens derivadas de ARP's em diferentes alturas de voo e fases fenológicas na área experimental da Chã do Jardim, Areia, Paraíba. O experimento começou com roçagem, aração e gradagem do solo, seguidas da demarcação das cabeceiras para o plantio do milho híbrido Robusto em 01/08/2024, com espaçamento de 0,10 m x 1 m. O desenvolvimento da cultura foi limitado pela falta de chuva e pela tecnologia antiga da plantadeira. As coletas de dados foram realizadas em 02/09/2024 e 09/10/2024, entre 11h e 13h, utilizando um drone DJI Air 2S com o aplicativo *Drone Harmony*, realizando três voos por dia em alturas de 20, 40 e 60 m. Problemas como vento e nuvens foram controlados manualmente. As imagens capturadas foram processadas no Agisoft PhotoScan, gerando ortomosaicos, e analisadas no QGIS para calcular os índices RGBVI e VARI. As ortoimagens foram subdivididas em 400 partes, sendo cinco amostras exportadas para .csv e organizadas no *Excel*. Resultados mostraram que a altura de 20 m proporcionou maior concentração de pixels e maior precisão. O índice VARI apresentou maior amplitude, enquanto o RGBVI foi mais estável, acompanhando melhor o crescimento vegetativo do milho. A resposta dos índices de vegetação VARI e RGBVI varia conforme a altura de voo e o estágio fenológico do milho. Voos a 20 m proporcionaram maior detalhamento da cobertura vegetal, com o VARI mostrando maior sensibilidade às variações do dossel e o RGBVI mantendo estabilidade. Alturas maiores (40 e 60 m) reduziram a precisão, especialmente do RGBVI, devido à menor resolução espacial. Os resultados indicam que não existe uma altura ideal única; é necessário equilibrar resolução e fase da cultura para minimizar erros, sendo o VARI mais sensível e o RGBVI mais consistente ao longo do desenvolvimento do milho. Portanto, o monitoramento do milho com drones RGB é eficaz, com maior precisão a 20 m devido à alta resolução. O VARI é mais sensível a variações locais, enquanto o RGBVI é mais estável, perdendo detalhes em altitudes maiores. Assim, voos baixos são ideais para estágios iniciais, usando VARI para detectar variações sutis e RGBVI para acompanhar o crescimento geral.

Palavras-Chave: sensoriamento remoto; índices de vegetação; agricultura de precisão.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable agricultural practices has driven the use of drones (UAVs) for crop monitoring, enabling more precise management of crop development. In Brazil, the Robusto hybrid maize stands out for its hardiness and adaptability. RGB optical sensors allow the calculation of vegetation indices such as RGBVI and VARI, estimating plant density and vigor without the need for infrared, thus reducing operational costs. However, the accuracy of these indices depends on flight altitude, phenological stage, and image resolution. Therefore, this study aimed to evaluate visible-range vegetation indices for monitoring maize (*Zea mays* L.) using UAV-derived images at different flight altitudes and phenological stages at the experimental site of Chã do Jardim, Areia, Paraíba. The experiment began with mowing, plowing, and harrowing the soil, followed by marking the field heads for planting Robusto hybrid maize on 08/01/2024, with a spacing of 0.10 m × 1 m. Crop development was limited by lack of rainfall and the use of an older planter. Data collection occurred on 09/02/2024 and 10/09/2024, between 11:00 a.m. and 1:00 p.m., using a DJI Air 2S drone with the Drone Harmony app, performing three flights per day at altitudes of 20, 40, and 60 m. Issues such as wind and clouds were manually controlled. Captured images were processed in Agisoft PhotoScan to generate orthomosaics and analyzed in QGIS to calculate RGBVI and VARI indices. The orthomosaics were divided into 400 parts, and five samples were exported to .csv and organized in Excel. Results showed that a 20 m flight altitude provided higher pixel concentration and greater precision. The VARI index exhibited greater amplitude, while RGBVI was more stable, better tracking maize vegetative growth. The response of VARI and RGBVI vegetation indices varied according to flight altitude and maize phenological stage. Flights at 20 m provided greater detail of canopy cover, with VARI showing higher sensitivity to local variations and RGBVI maintaining stability. Higher altitudes (40 and 60 m) reduced precision, especially for RGBVI, due to lower spatial resolution. Results indicate that there is no single ideal flight altitude; it is necessary to balance resolution and crop stage to minimize errors, with VARI being more sensitive and RGBVI more consistent throughout maize development. Therefore, RGB drone monitoring of maize is effective, with the highest accuracy at 20 m due to high resolution. VARI is more sensitive to local variations, while RGBVI is more stable but loses detail at higher altitudes. Thus, low-altitude flights are ideal in early stages, using VARI to detect subtle variations and RGBVI to track overall growth.

Keywords: remote sensing; vegetation indices; precision agriculture.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Fenologia do milho: estádios de desenvolvimento.....	12
Figura 02 – ARP da DJI, modelo Air 2S, e ao lado o seu rádio controle.....	14
Figura 03 – Índice de vegetação RGBVI, calculado a partir de uma ortoimagem obtida por um ARP a 20 metros de altura. A paleta de cores escolhida serve apenas para fins de diferenciação, onde o amarelo é o ápice fisiológico vegetal, e o azul representa o solo exposto.....	16
Figura 04 – Índice de vegetação VARI, calculado a partir de uma ortoimagem obtida por um ARP a 20 metros de altura. A paleta de cores escolhida serve apenas para fins de diferenciação, onde o verde é o ápice fisiológico vegetal, e o vermelho representa o solo exposto.....	18
Figura 05 – Processamento digital da imagem de plantas de milho, para uma imagem binária, resultando em apenas dois valores, 0 (preto) e 1 (branco).....	19
Figura 06 – Localização da área de pesquisa.....	20
Figura 07 – Análise Física, Química e Fertilidade para a área experimental, seguindo os parâmetros estabelecidos nacionalmente para a coleta de solo a uma profundidade de 0 a 20 cm, em 15 pontos aleatórios.....	21
Figura 08 – Gráfico climático comparativo, para os meses de julho a outubro de 2024.....	21
Figura 09 – Aração da área de pesquisa.....	22
Figura 10 – Plantio mecanizado do milho Robusto.....	23
Figura 11 – Plano de voo programado no Drone Harmony.....	24
Figura 12 – Nas imagens A1, A2, A3 B1, B2 e B3, mostra a diferença visual dos índices de vegetação VARI e RGBVI, coletados na fase V2 da cultura, nas alturas de 20, 40 e 60 metros, respectivamente. Já nas imagens C1, C2, C3 D1, D2 e D3, mostra a diferença visual dos índices de vegetação VARI e RGBVI, coletados na fase V6 da cultura, nas alturas de 20, 40 e 60 metros, respectivamente.....	25
Figura 13 – Seleção das 5 amostras aleatórias (em vermelho), dentre os 400 recortes de mesmo tamanho.....	26
Figura 14 – Variação da cobertura percentual estimada pelos índices de vegetação RGBVI (verde) e VARI (roxo) em diferentes alturas de voo (20, 40 e 60 metros) realizadas em duas datas (02/09/2024 e 09/10/2024). Os gráficos apresentam a resposta dos índices em cinco amostras, mostrando diferenças na detecção da cobertura conforme a altitude e o período de aquisição das imagens.....	29
Figura 15 – Cobertura média estimada (m ²) pelos índices de vegetação RGBVI (verde) e VARI (roxo) em diferentes alturas de voo (20, 40 e 60 metros), nos dois períodos de coleta (02/09/2024 e 09/10/2024). As linhas tracejadas representam as tendências lineares de cada índice, apresentando variações na resposta espectral em função da altitude e da fase vegetativa da planta na aquisição das imagens.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
RGBVI	Red-Green-Blue Vegetation Index
VARI	Visible Atmospherically Resistant Index
RGB	Red, Green, Blue
M.O.	Matéria Orgânica
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
GPS	Global Positioning System
GCS	Ground Control Station
AP	Agricultura de Precisão
IV	Índices de Vegetação
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near-Infrared
ExG	Excess Green Index
GRVI	Green-Red Vegetation Index
DSEN	Departamento de Solos e Engenharia Rural
CCA	Centro de Ciências Agrárias
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
UTM	Universal Transverse Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

®	Marca registrada
mm	Milímetro
ha	Hectare
°C	Graus Celsius
%	Porcentagem
m	Metros
m ²	Metros quadrados
GHz	Gigahertz

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	12
2.1	MILHO (<i>Zea mays</i> L.).....	12
2.2	AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS (ARP's).....	14
2.3	ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA FAIXA DO VISÍVEL	15
2.3.1	Red-green-blue vegetation index (RGBVI)	15
2.3.2	Visible atmospherically resistant index (VARI)	17
2.4	LIMIARIZAÇÃO BINÁRIA	18
3	MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	20
3.2	IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO	22
3.3	COLETA DOS DADOS.....	23
3.4	PROCESSAMENTO DOS DADOS	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5	CONCLUSÕES.....	33
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A crescente busca por práticas agrícolas sustentáveis com alta eficiência tem impulsionado o uso de tecnologias de sensoriamento remoto, especialmente pelas Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP's), como ferramentas de monitoramento de lavouras. Estas tecnologias permitem acompanhamento em tempo real do desenvolvimento das culturas agrícolas, viabilizando uma gestão mais precisa e integrada dos sistemas produtivos (Zhang *et al.*, 2024).

No Brasil, o milho (*Zea mays* L.) é uma das principais commodities cultivadas, abrangendo todas as regiões do país. A cultivar de milho híbrido comercial Robusto®, devido à sua rusticidade e elevada adaptabilidade edafoclimática, tem se mostrado uma excelente opção para agricultores que atuam em ambientes com restrições hídricas ou de fertilidade (Costa *et al.*, 2021).

Com o avanço de sensores ópticos acoplados a drones, tornou-se possível o uso de índices de vegetação baseados apenas em bandas do espectro visível, como o RGBVI (*Red-Green-Blue Vegetation Index*) e o VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*). Tais índices têm sido utilizados com sucesso na estimativa da densidade vegetativa assim como vigor das plantas, mesmo sem sensores infravermelhos, o que reduz significativamente os custos operacionais (Colovic *et al.*, 2024).

Contudo, a acurácia desses índices pode ser influenciada por diversos fatores, entre eles a altura de voo da aeronave, estágio fenológico da cultura e a resolução espacial das imagens capturadas. Estudos recentes indicam que a variação da altura de voo pode alterar significativamente a qualidade da imagem, interferindo na sensibilidade dos índices para detectar diferenças no desenvolvimento vegetal (Li *et al.*, 2025).

O objetivo geral da pesquisa consiste em avaliar os índices de vegetação na faixa do visível no monitoramento da cultura do milho (*Zea mays* L.), utilizando imagens derivadas de ARP's em diferentes alturas de voo e fases fenológicas. Aliado aos objetivos específicos, processar e calcular os índices de vegetação RGBVI e VARI a partir das imagens coletadas; identificar a altitude que proporciona maior precisão e consistência na análise da vegetação; discutir as implicações dos resultados para o uso de ARP's em monitoramento agrícola com sensores ópticos RGB (*Red, Green, Blue*).

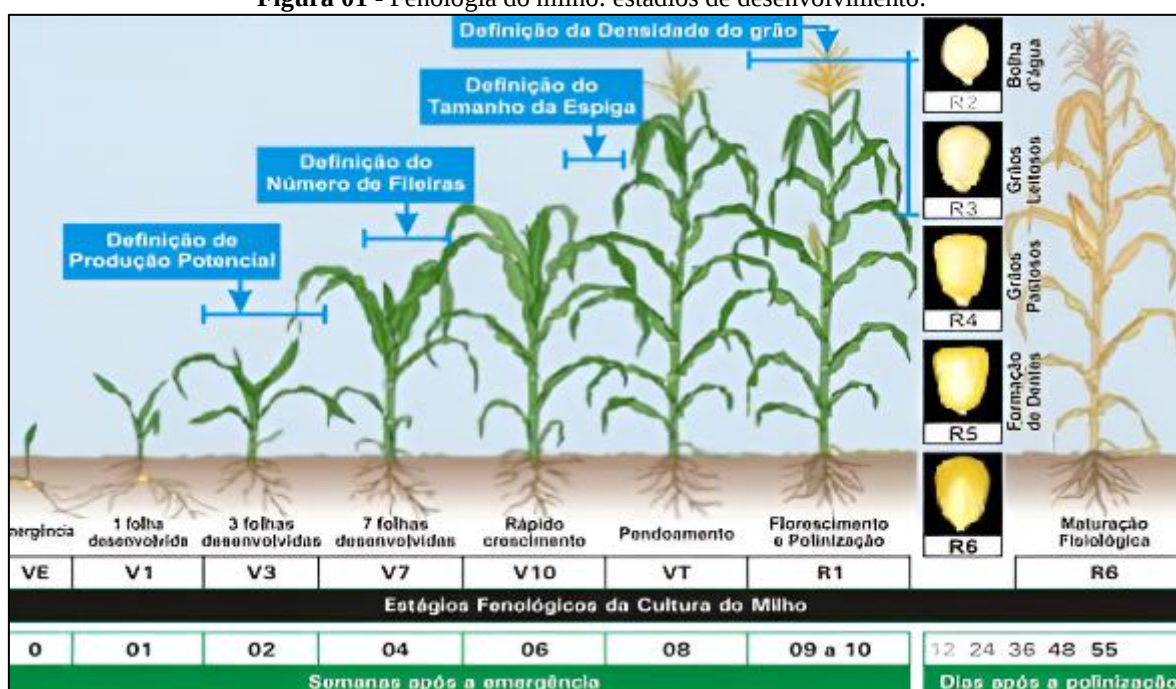
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MILHO (*Zea mays* L.)

O milho (*Zea mays* L.) é uma gramínea pertencente à família Poaceae, espécie *Zea mays* L., que fazem parte da tribo Maydeae (Magalhães; Souza, 2022). Originário da América Latina, região central do México, cultivado por povos indígenas há milhares de anos (Souza *et al.* 2019). Cultura entre as mais importantes da história, utilizada como fonte de alimento para dietas humanas e animais (Crispin; Sartori; Alencar, 2019).

É uma planta com germinação hipógea, ereta, com único colmo principal, monoica com flores imperfeitas, fotossíntese C4 com bom desenvolvimento em climas quentes e subúmidos, com exigências hídricas por ciclo de 500 a 700 mm, com estágio de crescimento dividido em duas fases: vegetativa e reprodutiva (Figura 01) (Canada, 2021). Cereal mais produzido, mundialmente (Chaves *et al.*, 2020).

Figura 01 - Fenologia do milho: estádios de desenvolvimento.



Fonte: Fancelli (1986) e Iowa State University Extension (1993).

No Brasil, seu cultivo ocorre em larga escala, ocupando o terceiro como maior produtor global (CNA, 2021). Apresenta alto valor nutricional, utilizado sob diferentes formas de matéria prima, desde biocombustíveis, óleos, espessantes e colantes (Maulana *et al.*, 2022).

Na safra 2024/25, dados apontam uma produção estimada de milho no país algo entorno de 137 milhões de toneladas, 18,6% ou 21,5 milhões de toneladas acima da produzida na safra 2023/24 que foi de 115,5 milhões de toneladas em uma área de 21.679,7 mil ha, dentre essa produção 134,5 milhões de toneladas produzidas serão divididas entre primeira, segunda e terceira safra, estimando-se que a primeira corresponda uma produção de 24,9, a segunda 109,6 e a terceira 2,5 milhões de toneladas, respectivamente (CONAB, 2025).

Vale ressaltar que, embora o país apresente destaque na produção mundial, ainda existem limitações no cultivo que comprometem a produtividade, principalmente devido ao ataque de insetos-praga, à ocorrência de doenças, aos déficits hídricos, entre outros fatores (Pinho; Silva; Oliveira, 2022). Pensando na resolução de partes desses problemas, Crispin, Sartori e Alencar (2019) relatam que a demanda por novas tecnologias em híbridos tem aumentado significativamente.

Ora, o trabalho com melhoramento genético vegetal tem se tornado uma das principais estratégias para obtenção no aumento do potencial produtivo de forma sustentável e ecologicamente equilibrada, associada a adoção de algumas práticas culturais (Almeida *et al.*, 2024). Bem como as formas de monitoramento durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho.

Entre as tecnologias adotadas na Agricultura de Precisão (AP) é possível destacar o uso do sensoriamento remoto, esse por sua vez, possibilita aquisição de imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre e de objetos, a partir da captação e registro da energia refletida (reflectância) ou emitida por sua superfície (radiância) (Sishodia; Ray; Singh, 2020).

O uso de ARPs acondicionadas a sensores RGB e multiespectrais para captação de imagens áreas, permite redução substancial nos custos relacionados à operação de campo, fornecimento de resolução espacial das imagens, tempo de revisita flexível e alta versatilidade em condições climáticas desfavoráveis (Olson; Anderson, 2021).

Essa área do conhecimento possibilita através da refletância das folhas, fornecer informações relacionadas a composição química, estrutura celular e propriedades metabólicas das plantas por meio de diagnósticos prévios e de forma não destrutiva, além de eficiência e rapidez na informação (Kovar *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2019).

A partir desse contexto, os Índices de Vegetação (IV) surgiram com intuito de caracterizar a vegetação nas imagens, atualmente, utilizados na geração de modelos direcionados para estimativa e produtividade, bem como na geração de outros parâmetros biofísicos em culturas agrícolas (Abreu Júnior, 2022).

2.2 AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS (ARP's)

As Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP's), popularmente conhecidas como drones, constituem sistemas aéreos não tripulados controlados remotamente (Figura 02), compostos pela plataforma aérea, pelo sistema de controle em solo (GCS) e pelos sensores embarcados (Cedeño; Arévalo, 2024).

Figura 02 - ARP da DJI, modelo Air 2S, e ao lado o seu rádio controle.



Fonte: Adam Juniper, 2023.

Esses sistemas permitem a aquisição de dados de forma rápida, precisa e não destrutiva, sendo amplamente utilizados em agricultura de precisão, topografia, inspeção industrial e monitoramento ambiental (Teixeira *et al.*, 2023). A utilização de ARP's viabiliza levantamentos detalhados e contínuos, com potencial para gerar informações essenciais para a tomada de decisão em diferentes escalas e contextos.

As ARP's podem ser classificadas quanto ao tipo de plataforma, destacam-se as aeronaves de asa fixa, que oferecem maior autonomia e cobertura de grandes áreas, ideais para mapeamento e fotogrametria em larga escala, e os multirrotores, que apresentam maior manobrabilidade, capacidade de pairar sobre pontos específicos e estabilidade para inspeções detalhadas (Soares *et al.*, 2024).

A operação das ARP's envolve parâmetros críticos que influenciam a qualidade das medições, como altura e velocidade de voo, estabilidade e autonomia, fornecendo informações detalhadas que orientam práticas de manejo, irrigação e aplicação de insumos de forma mais

eficiente, reduzindo custos e aumentando a sustentabilidade da produção agrícola (Santos *et al.*, 2025).

2.3 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA FAIXA DO VISÍVEL

A sensibilidade e a precisão dos índices de vegetação na faixa do visível dependem diretamente de fatores operacionais e ambientais que afetam a qualidade da imagem capturada pelos sensores RGB (Huang *et al.*, 2022). Entre os principais fatores, destaca-se a altura de voo (H) da ARP, que influencia diretamente a resolução espacial (GSD, Ground Sample Distance) das imagens, definida pela equação:

$$GSD = (H * S)/(f * I) \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

H, é a altura de voo;

S, é o tamanho do sensor;

f , é a distância focal da lente;

I, é a resolução do detector em pixels.

Altitudes maiores proporcionam cobertura de área mais extensa, porém com menor resolução espacial, podendo reduzir a capacidade dos índices visíveis de detectar diferenças sutis no vigor ou na cobertura foliar, especialmente em plantas de pequeno porte ou áreas com variabilidade intra-parcelar elevada (Fortelli *et al.*, 2021). Por outro lado, altitudes mais baixas aumentam a resolução, permitindo análise detalhada do dossel e detecção de pequenas áreas de estresse, mas podem exigir múltiplos voos para cobrir grandes áreas.

Outro fator crítico é o ângulo solar, que influencia a intensidade e direção da radiação incidente sobre o dossel vegetal, afetando diretamente a refletância capturada pelas câmeras RGB (Ortiz *et al.*, 2021). Por isso, recomenda-se a aquisição de imagens em horários próximos ao meio-dia solar, quando a iluminação é mais uniforme, minimizando efeitos de sombra e permitindo comparações consistentes entre diferentes áreas ou datas de coleta.

2.3.1 Red-green-blue vegetation index (RGBVI)

O Red-Green-Blue Vegetation Index (RGBVI) é um índice de vegetação baseado exclusivamente nas bandas do espectro visível, vermelho (R), verde (G) e azul (B),

desenvolvido para avaliar a presença e o vigor da vegetação em imagens capturadas por câmeras RGB convencionais (Wang *et al.*, 2025).

Diferente dos índices que incorporam a faixa do infravermelho próximo (NIR), como o NDVI, o RGBVI oferece uma alternativa de baixo custo e ampla aplicabilidade em plataformas como drones equipados apenas com sensores comerciais, tornando-o especialmente útil em projetos de agricultura de precisão e monitoramento ambiental com recursos limitados, sendo definido pela equação:

$$\text{RGBVI} = ((G \times G) - (B \times R)) / ((G \times G) + (B \times R)) \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que,

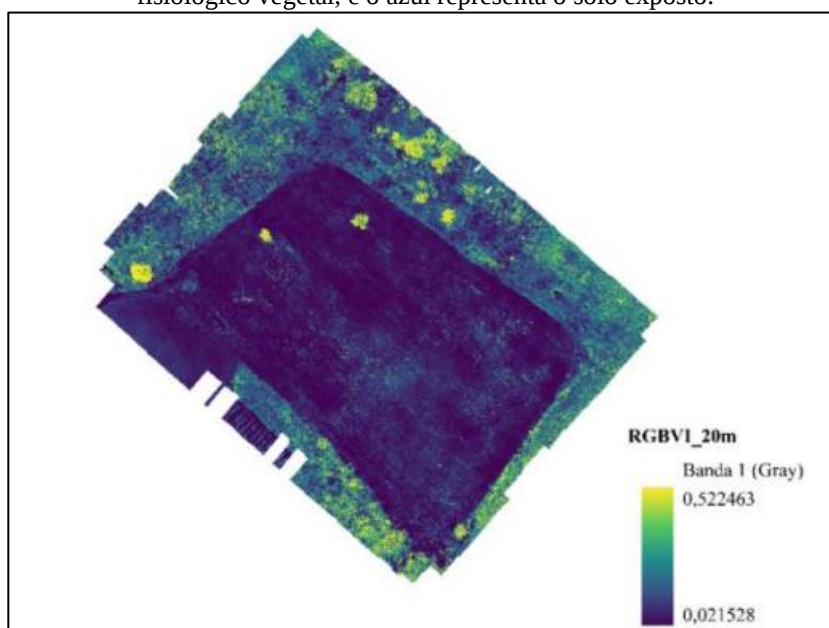
R= Red.

G = Green.

B= Blue.

Valores positivos do RGBVI (Figura 03) indicam maior presença de vegetação e maior vigor, enquanto valores próximos de zero ou negativos refletem áreas com baixa cobertura vegetal ou predominância de solo (Starý *et al.*, 2020).

Figura 03 - Índice de vegetação RGBVI, calculado a partir de uma ortoimagem obtida por um ARP a 20 metros de altura. A paleta de cores escolhida serve apenas para fins de diferenciação, onde o amarelo é o ápice fisiológico vegetal, e o azul representa o solo exposto.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

O cálculo do índice explora a predominância da componente verde em relação à combinação das componentes vermelho e azul, permitindo destacar áreas vegetadas em imagens RGB e reduzir a interferência de solo exposto ou materiais não vegetais (Lee *et al.*, 2021).

2.3.2 Visible atmospherically resistant index (VARI)

O Visible Atmospherically Resistant Index (VARI), foi desenvolvido para ser utilizado com imagens adquiridas na faixa do espectro visível, sendo especialmente eficiente na mitigação de efeitos atmosféricos e variações de iluminação, comuns em condições de campo não controladas (Roth *et al.*, 2023).

Diferente de índices tradicionais baseados apenas na razão entre bandas, como o ExG ou o GRVI, o VARI incorpora uma fórmula que reduz a influência de sombras, nuvens finas e diferenças de luminosidade, permitindo análises mais consistentes da vegetação a partir de câmeras RGB convencionais, expressa pela equação:

$$\text{VARI} = (G - R)/(G + R - B) \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que,

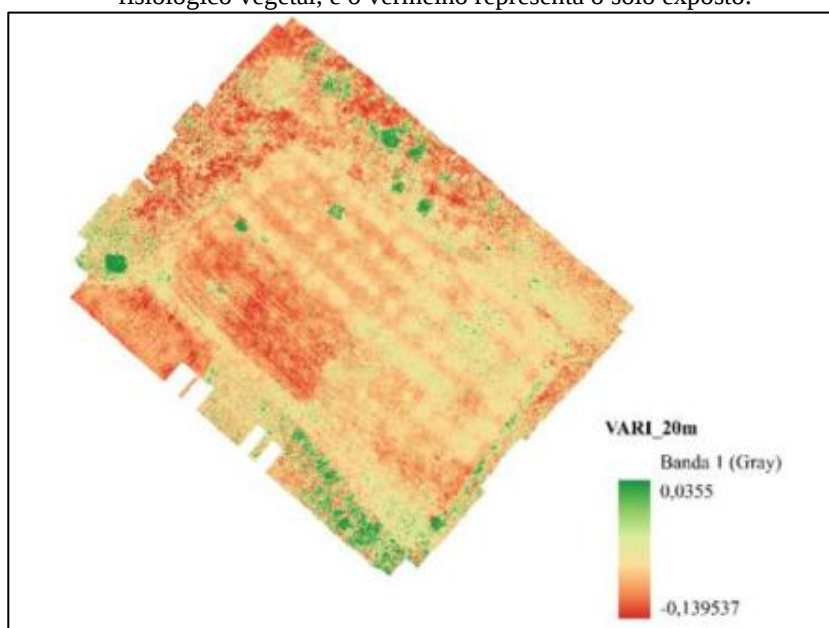
R= Red.

G = Green.

B= Blue.

Nesta formulação, a diferença entre verde e vermelho no numerador destaca a vegetação, enquanto o denominador, atua como fator de normalização que reduz o impacto de variações de iluminação e de elementos não vegetativos na cena (Suprojo; Rosyidi, 2025). Valores mais altos de VARI indicam maior presença e vigor da vegetação, enquanto valores próximos a zero ou negativos refletem predominância de solo exposto, sombras ou áreas não vegetadas (Figura 04).

Figura 04 - Índice de vegetação VARI, calculado a partir de uma ortoimagem obtida por um ARP a 20 metros de altura. A paleta de cores escolhida serve apenas para fins de diferenciação, onde o verde é o ápice fisiológico vegetal, e o vermelho representa o solo exposto.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

O VARI apresenta forte correlação com parâmetros fisiológicos de plantas, como área foliar, biomassa e índice de clorofila, tornando-o amplamente aplicável em diferentes culturas. Além disso, sua simplicidade computacional permite integração direta em fluxos de processamento de imagens RGB, seja em ortomosaicos, mapas de vigor ou sistemas de monitoramento automatizado (Barbosa *et al.*, 2021).

2.4 LIMIAIRIZAÇÃO BINÁRIA

A limiarização binária, consiste em uma técnica do processamento digital de imagens que transforma uma imagem em tons de cinza em binária, atribuindo 0 (preto) ao fundo e 1 (branco) aos objetos de interesse (Figura 05), conforme os níveis de intensidade dos pixels (Niño-Rondon *et al.*, 2021). Essa técnica é amplamente empregada em aplicações de visão computacional, análise de imagens médicas, reconhecimento de padrões e monitoramento agrícola.

Figura 05 - Processamento digital da imagem de plantas de milho, para uma imagem binária, resultando em apenas dois valores, 0 (preto) e 1 (branco).



Fonte: Martins, 2017.

Do ponto de vista matemático, a limiarização binária pode ser definida da seguinte forma: dado um pixel $p(x,y)$, com intensidade $I(x,y)$ em uma imagem de tons de cinza, aplica-se um valor de limiar T , de modo que:

$$B(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{se } I(x,y) > T \\ 0, & \text{se } I(x,y) \leq T \end{cases} \quad (\text{Eq. 4})$$

No entanto, em imagens com variações de iluminação ou contraste, é preferível utilizar limiarização adaptativa, que calcula valores de limiar localmente em regiões da imagem. Entre os métodos automáticos, destaca-se o método de Otsu, que determina o limiar ótimo minimizando a variância intra-classe e maximizando a separação entre fundo e objeto (Tawfeeq; Al-Sudani, 2020).

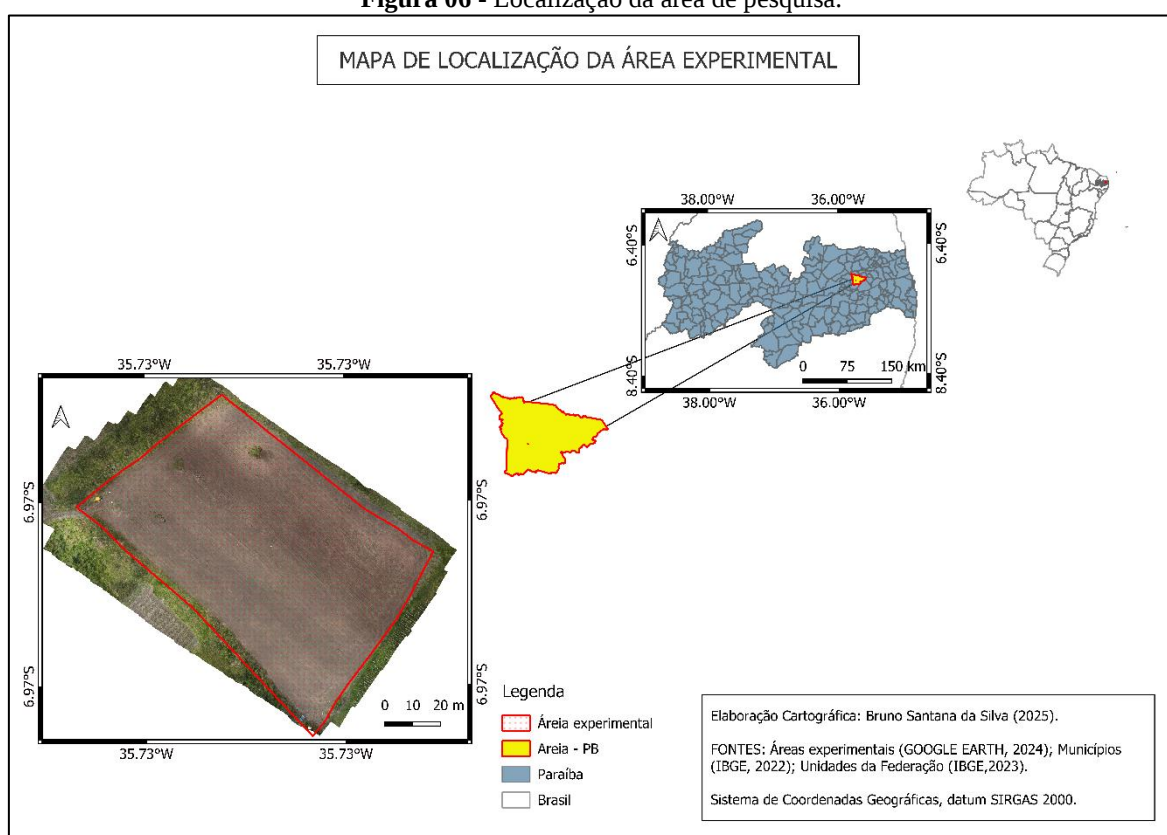
Na prática, a limiarização binária é amplamente utilizada em segmentação de áreas de interesse, como detecção de folhas em imagens de drones na agricultura de precisão, identificação de células em imagens microscópicas e detecção de bordas e formas em sistemas de visão computacional. A técnica é geralmente combinada com filtros de pré-processamento, como suavização e equalização de histograma, para reduzir ruído e melhorar a uniformidade da imagem antes da binarização (Pattnaik *et al.*, 2024).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido entre os meses de julho e outubro de 2024, na área de pesquisas do Departamento de Solos e Engenharia Rural (DSENR), da Fazenda Experimental Chã do Jardim, pertencente ao Centro de Ciências Agrárias (CCA), Campus II – UFPB, Areia, Paraíba (Figura 06).

Figura 06 - Localização da área de pesquisa.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

A área possui aproximadamente 0,7 ha, sendo o solo composto por 57% de areia, 5% de silte e 38% de argila, resultando em um solo da classe textural argila arenosa, informações obtidas pela análise de Química e Fertilidade realizada no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo/CCA/UFPB (Figura 07).

Figura 07 - Análise Física, Química e Fertilidade para a área experimental, seguindo os parâmetros estabelecidos nacionalmente para a coleta de solo a uma profundidade de 0 a 20 cm, em 15 pontos aleatórios.

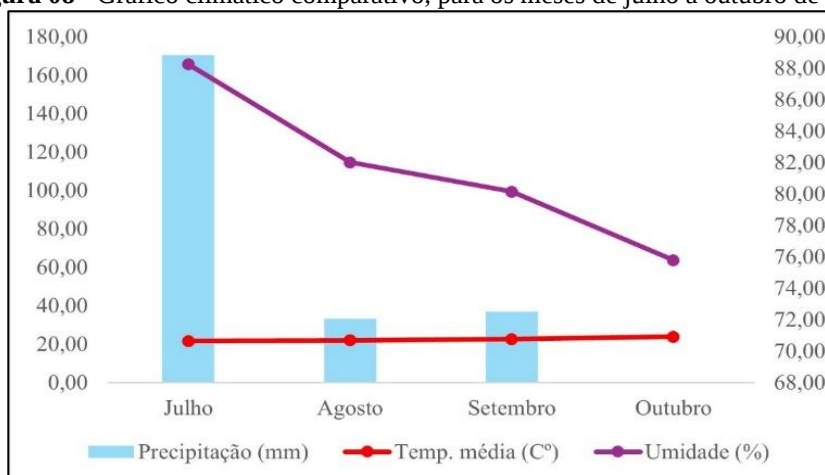
Resultados da Análise de Solo												
Química e Fertilidade												
Nº LAB	pH H ₂ O (1:2,5)	P ----- mg/dm³	S ----- mg/dm³	K ⁺	Na ⁺	H ⁺ + Al ⁺³	Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SB	CTC	MO --- g/kg ---
43497	5,4	2,29	-	19,51	0,03	8,76	0,90	1,09	0,70	1,87	10,63	54,31
P, K, Na: Extrator Mehlich 1 H + Al: Extrator Acetato de Cálcio 0,5 M, pH 7,0 Al, Ca, Mg: Extrator KCl 1 M					SB: Soma de Bases Trocáveis CTC: Capacidade de Troca Catiônica				M.O.: Matéria Orgânica – Walkley-Black S: Extrator Ca(H ₂ PO ₄) ₂ ·H ₂ O 0,01 M			
Física												
Nº	Areia 2 - 0,05 mm	Silte 0,05 - 0,002 mm	Argila < 0,002 mm	Argila dispersa	Grau de floculação	Densidade do solo	Densidade de partícula	Porosidade total	Umidade 0,01 0,03 1,50 MPa	CLASSE TEXTURAL		
	----- g/kg	----- g/kg	----- g/kg	- g/kg -	- g/kg -	- g/cm³ -	- g/cm³ -	- m³/m³ -	---- g/kg ----			
43497	570	51	379	-	-					Argila Arenosa		

Fonte: Laboratório de Solos do DSENR, CCA, 2025.

Com base na análise Química e de Fertilidade, no dia da coleta esse solo tinha um elevado teor de matéria orgânica (M.O.), justificado pelo elevado acúmulo de biomassa presente no local, resultado de anos de repouso. Além disso, o solo apresentou pH ácido, acidez potencial elevada, e capacidade de troca catiônica (CTC) de baixa a moderada, de acordo com o livro, Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação.

O clima da localidade apresenta-se ameno na maior parte do ano, justificável pela sua altitude de 617,56 metros acima do nível do mar. As incidências de chuvas são bem distribuídas, porém com volumes consideráveis entre os meses de abril a julho (quadra chuvosa) (AESAPB, 2025). Para evitar que a alta precipitação atrapalhasse os voos de coleta dos dados, foi preferível realizar a pesquisa fora desse período, com o plantio feito no mês de agosto, e as coletas realizadas nos meses de setembro e outubro (Figura 08), resultando em sérios problemas fitossanitários e hídricos.

Figura 08 - Gráfico climático comparativo, para os meses de julho a outubro de 2024.



Fonte: AESAPB, 2025.

Durante a pesquisa, os meses de agosto e setembro tiveram uma precipitação média de aproximadamente 36 mm, muito abaixo do último mês da quadra chuvosa, que se aproximou dos 180 mm acumulados. A temperatura média manteve-se na faixa dos 21°C, e a umidade declinou-se com a proximidade da primavera.

3.2 IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO

Na fase inicial do experimento foi realizada uma roçagem mecanizada no local, para facilitar a secagem e a incorporação da matéria orgânica ao solo. No segundo dia, deram início os processos de aração e gradagem do solo (Figura 09). Ao todo foram três arações e duas gradagens, sendo cada processo perpendicular ao anterior, aumentando a eficiência no revolvimento e quebra dos torrões.

Figura 09 - Aração da área de pesquisa.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Posteriormente, com o auxílio de piquetes, um GPS (*Global Positioning System*) de mão (Garmin GPSmap76CSx) e uma trena, iniciou-se as demarcações das cabeceiras, para que o plantio ocorresse da melhor forma possível, levando em consideração o espaço de giro com referência ao comprimento do trator mais implemento. Esse procedimento se faz necessário para que o conjunto mecânico não manobre sobre as linhas já plantadas.

As sementes de milho híbrido comercial Robusto® da Empresa Selegrãos, foram doadas pelo Laboratório de Entomologia/CCA/UFPB. O plantio foi realizado no dia 01/08/2024, utilizando uma plantadeira de 3 linhas acoplada no levante hidráulico do trator, com um espaçamento de 0,10 m x 1 m, resultando em uma densidade de 100 mil plantas/ha (Figura 10).

Figura 10 - Plantio mecanizado do milho Robusto.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Vale ressaltar que, o híbrido Robusto® mesmo sendo resistente a déficit hídricos e ataques de algumas pragas, observou-se dificuldades em seu desenvolvimento, pois o experimento foi realizado em regime de sequeiro. Além disso, a plantadeira utilizada possui uma idade considerável e sem opções de tecnologias atuais, tais como plantio georreferenciado.

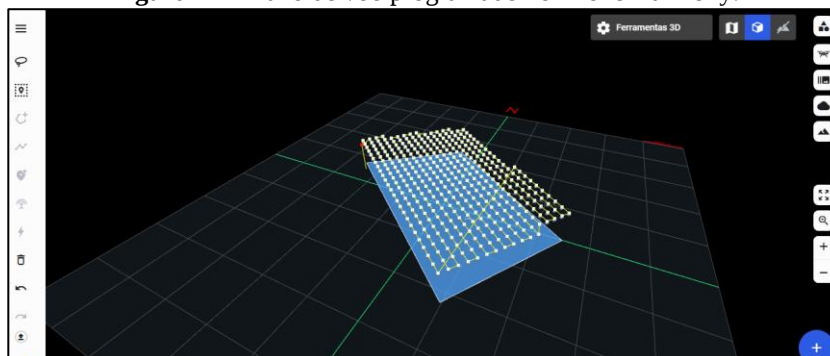
3.3 COLETA DOS DADOS

Para as coletas, foi utilizada uma ARP fabricada pela empresa Shenzhen DJI Sciences and Technologies Ltd., modelo Air 2S fly more combo¹. Em conjunto com o drone, foi utilizado o aplicativo *Drone Harmony* na versão 1.18 Legacy (Figura 11), desenvolvido e distribuído pela Drone Harmony AG. A tecnologia embarcada no app possibilita diversos

¹ Para informações técnicas do equipamento, acessar: <<https://www.dji.com/br/support/product/air-2s>>.

ajustes técnicos, tais como, plano de voo customizável, ajustes do sensor óptico, e ajuste fino na velocidade de voo.

Figura 11 - Plano de voo programado no Drone Harmony.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Ao total foram 3 voos por dia de coleta, contudo as alturas variaram em 20, 40 e 60 metros, respectivamente. Alturas maiores foram desconsideradas, tanto pela limitação do sensor óptico RGB do drone, quanto pelo tamanho da cultura analisada.

A primeira coleta de dados foi realizada no dia 02/09/2024, e a segunda no dia 09/10/2024, no intervalo entre as 11:00 e às 13:00 horas, aproveitando uma maior luminosidade solar.

Durante a coleta desses dados, houve alguns problemas relacionados a intensidade de ventos em alguns momentos, além do excesso de nuvens, podendo prejudicar a acurácia das informações obtidas. Para contornar tais problemas, se fez uso de técnicas de controle manual da câmera e da velocidade da ARP.

3.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS

As imagens de cada coleta, passaram por um pré-processamento no *software* Agisoft PhotoScan 1.4.5, desenvolvido pela Agisoft LLC, onde cada conjunto de fotos por altura de voo, deu origem a um ortomosaico devidamente calibrado. Posteriormente, foi utilizado o *software* de código aberto QGIS 3.34.6 Prizren², para processar as ortofotografias.

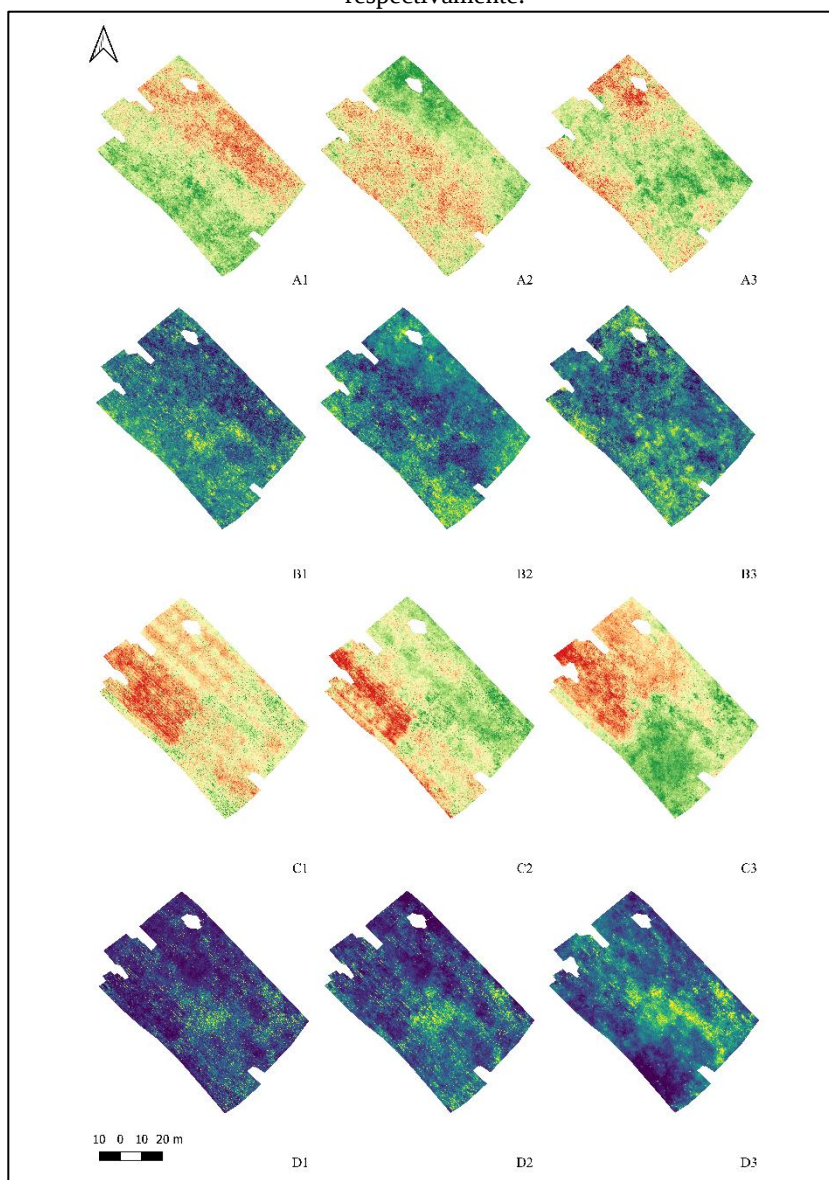
De início foram feitas correções no sistema de coordenadas geográficas dos arquivos raster, colocando-os no sistema SIRGAS 2000/UTM zona 25S, sistema de referência da região da pesquisa.

² Para saber mais sobre esse projeto grandioso, acessar: <<https://qgis.org>>.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos índices RGBVI e VARI relativos ao milharal foram obtidos por meio das fórmulas (Eq. 2, e Eq. 3), resultando em 12 subprodutos (Figura 12). Posteriormente, foi realizado o processo de limiarização binária, usando o cálculo limiar Quantil (2% a 98%), com o auxílio do plugin LF Tools, pertencente a GeoOne – *Innovation and Training in Free GIS Softwares* LTDA.

Figura 12 - Nas imagens A1, A2, A3 B1, B2 e B3, mostra a diferença visual dos índices de vegetação VARI e RGBVI, coletados na fase V2 da cultura, nas alturas de 20, 40 e 60 metros, respectivamente. Já nas imagens C1, C2, C3 D1, D2 e D3, mostra a diferença visual dos índices de vegetação VARI e RGBVI, coletados na fase V6 da cultura, nas alturas de 20, 40 e 60 metros, respectivamente.

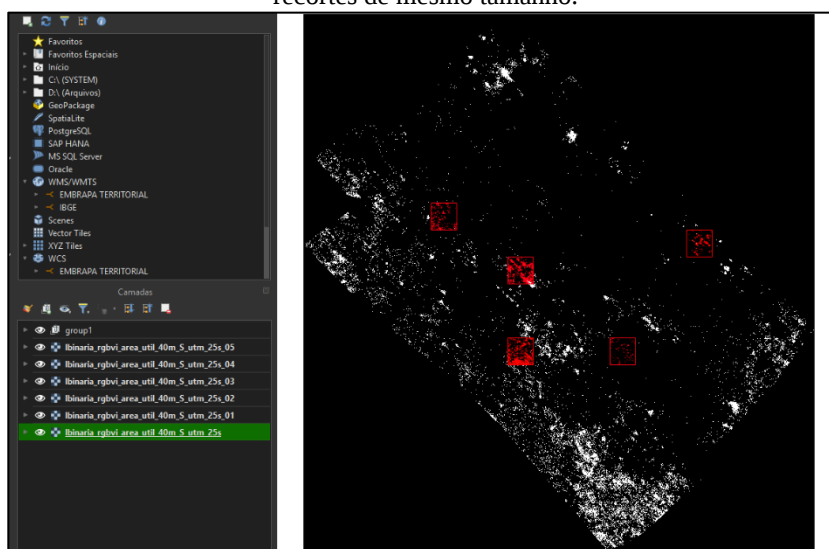


Fonte: Elaboração própria, 2025.

As imagens calculadas pela fórmula VARI, estão sendo representadas pelas sequências alfanuméricas nas alturas de, 20 metros (A1 e C1), 40 metros (A2 e C2) e 60 metros (A3 e C3). Já as imagens RGBVI, são representadas pelas sequências de, 20 metros (B1 e D1), 40 metros (B2 e D2) e 60 metros (B3 e D3).

Subsequentemente, as ortoimagens foram divididas em 400 partes iguais de 26 m² aproximadamente (Figura 13). Esse procedimento se fez necessário para diminuir o volume de dados, uma vez que o *Hardware* utilizado possuía um processador Intel Celeron® N3060 de 1.6 GHz, e memória RAM de 4 GB, impossibilitando o uso massivo de todos os dados coletados.

Figura 13 - Seleção das 5 amostras aleatórias (em vermelho), dentre os 400 recortes de mesmo tamanho.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Dentre as 400 partes, foram escolhidas 5 amostras, tendo como critério não escolher amostras sem vegetação e amostras com muita densidade de vegetação, onde passaram pela ferramenta *gdal2xyz* para que os valores binários pudessem ser exportados em formato .csv.

Esses dados foram importados no *Microsoft® Excel®* para filtragem e organização dos dados obtidos, resultando em duas tabelas, sendo a primeira, voltada para a porcentagem de cobertura dos valores binários, de acordo com a quantidade de pixels nas amostras, alinhadas as alturas de voos praticados (Tabela 01).

Tabela 01 - Quantidade de pixels validos (1 binário), representando os valores de “cobertura (%)”, e o somatório de pixels nulos (0 binário) e pixels validos, representando a “área (pixels³)” total de cada amostra.

VOO 02/09/2024						
Altura de voo	RGBVI			VARI		
	Amostras	Área (pixels)	Cobertura (%)	Amostras	Área (pixels)	Cobertura (%)
20 metros	1	539.825	0,77	1	539.825	8,31
	2	539.825	6,30	2	539.825	20,90
	3	539.825	0,48	3	539.825	7,28
	4	539.825	2,22	4	539.825	2,83
	5	539.825	0,57	5	539.825	53,93
Altura de voo	RGBVI			VARI		
	Amostras	Área (pixels)	Cobertura (%)	Amostras	Área (pixels)	Cobertura (%)
40 metros	1	129.870	0,64	1	129.870	0,14
	2	129.870	6,65	2	129.870	2,61
	3	129.870	0,17	3	129.870	0,05
	4	129.870	0,73	4	129.870	5,38
	5	129.870	3,41	5	129.870	2,39
Altura de voo	RGBVI			VARI		
	Amostras	Área (pixels)	Cobertura (%)	Amostras	Área (pixels)	Cobertura (%)
60 metros	1	58.764	0,47	1	58.764	4,29
	2	58.764	4,78	2	58.764	17,30
	3	58.764	0,92	3	58.764	24,05
	4	58.764	1,43	4	58.764	26,03
	5	58.764	1,28	5	58.764	3,84
VOO 09/10/2024						
Altura de voo	RGBVI			VARI		
	Amostras	Área (pixels)	Cobertura (%)	Amostras	Área (pixels)	Cobertura (%)
20 metros	1	629.952	1,74	1	629.952	0,65
	2	629.952	11,98	2	629.952	6,12
	3	629.952	4,29	3	629.952	2,51
	4	629.952	8,40	4	629.952	8,14
	5	629.952	6,56	5	629.952	6,67
Altura de voo	RGBVI			VARI		
	Amostras	Área (pixels)	Cobertura (%)	Amostras	Área (pixels)	Cobertura (%)
40 metros	1	151.979	0,61	1	151.979	0,19
	2	151.979	7,38	2	151.979	8,66
	3	151.979	1,51	3	151.979	4,80
	4	151.979	3,49	4	151.979	12,60
	5	151.979	4,80	5	151.979	5,15
Altura de voo	RGBVI			VARI		
	Amostras	Área (pixels)	Cobertura (%)	Amostras	Área (pixels)	Cobertura (%)
60 metros	1	55.418	0,92	1	55.418	0,01
	2	55.418	20,91	2	55.418	18,82
	3	55.418	0,82	3	55.418	58,15
	4	55.418	2,47	4	55.418	9,36
	5	55.418	0,03	5	55.418	14,20

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Conforme a altura de voo aumenta a densidade de pixels na área das amostras diminuem, onde os voos de 20 metros possuem a maior concentração de pixels, permitindo uma melhor acurácia dos cálculos de índice de vegetação.

³ Para saber o tamanho de apenas 1 pixel, basta fazer a seguinte divisão: pixel = 26 / Área (pixels).

Já na segunda tabela, os valores da área total e da cobertura detectada pelas fórmulas de RGBVI e VARI, são apresentados em metros quadrados, melhorando a interpretação, e discussão dos dados (Tabela 02).

Tabela 02 - Tamanho da área de cobertura vegetal, em relação a área total das amostras, nas alturas de 20, 40 e 60 metros, para as duas coletas realizadas.

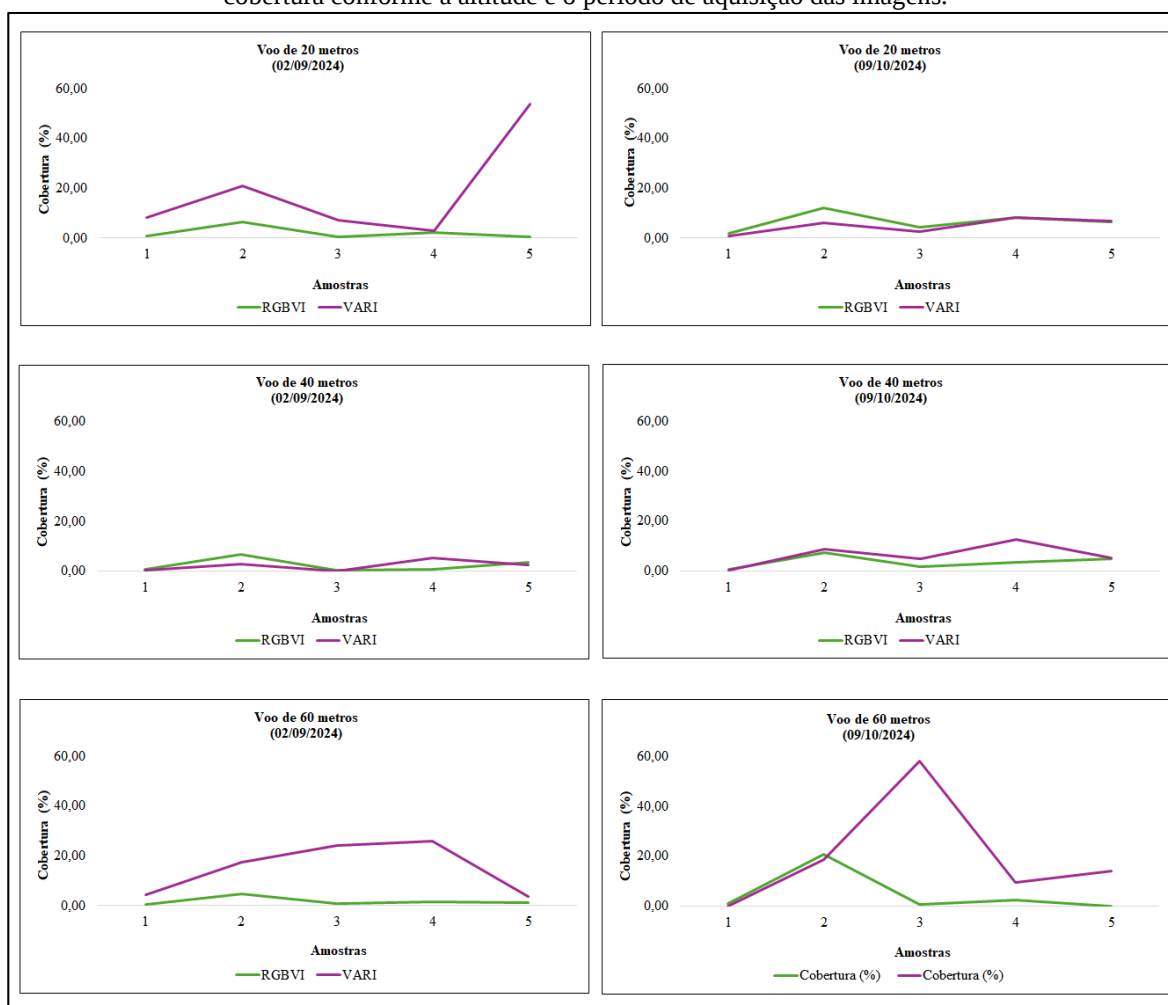
VOO 02/09/2024						
Altura de voo	RGBVI			VARI		
	Amostras	Área (m²)	Cobertura (m²)	Amostras	Área (m²)	Cobertura (m²)
20 metros	1	26,00	0,20	1	26,00	2,16
	2	26,00	1,64	2	26,00	5,43
	3	26,00	0,12	3	26,00	1,89
	4	26,00	0,58	4	26,00	0,74
	5	26,00	0,15	5	26,00	14,02
Altura de voo	RGBVI			VARI		
	Amostras	Área (m²)	Cobertura (m²)	Amostras	Área (m²)	Cobertura (m²)
40 metros	1	26,00	0,17	1	26,00	0,04
	2	26,00	1,73	2	26,00	0,68
	3	26,00	0,04	3	26,00	0,01
	4	26,00	0,19	4	26,00	1,40
	5	26,00	0,89	5	26,00	0,62
Altura de voo	RGBVI			VARI		
	Amostras	Área (m²)	Cobertura (m²)	Amostras	Área (m²)	Cobertura (m²)
60 metros	1	26,00	0,12	1	26,00	1,11
	2	26,00	1,24	2	26,00	4,50
	3	26,00	0,24	3	26,00	6,25
	4	26,00	0,37	4	26,00	6,77
	5	26,00	0,33	5	26,00	1,00
VOO 09/10/2024						
Altura de voo	RGBVI			VARI		
	Amostras	Área (m²)	Cobertura (m²)	Amostras	Área (m²)	Cobertura (m²)
20 metros	1	26,00	0,45	1	26,00	0,17
	2	26,00	3,11	2	26,00	1,59
	3	26,00	1,12	3	26,00	0,65
	4	26,00	2,19	4	26,00	2,12
	5	26,00	1,70	5	26,00	1,73
Altura de voo	RGBVI			VARI		
	Amostras	Área (m²)	Cobertura (m²)	Amostras	Área (m²)	Cobertura (m²)
40 metros	1	26,00	0,04	1	26,00	0,01
	2	26,00	0,45	2	26,00	0,18
	3	26,00	0,01	3	26,00	0,00
	4	26,00	0,05	4	26,00	0,36
	5	26,00	0,23	5	26,00	0,16
Altura de voo	RGBVI			VARI		
	Amostras	Área (m²)	Cobertura (m²)	Amostras	Área (m²)	Cobertura (m²)
60 metros	1	26,00	0,03	1	26,00	0,29
	2	26,00	0,32	2	26,00	1,17
	3	26,00	0,06	3	26,00	1,63
	4	26,00	0,10	4	26,00	1,76
	5	26,00	0,09	5	26,00	0,26

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Observa-se que a altura de 20 m gerou resultados mais consistentes da cobertura, enquanto as demais alturas mostraram perda de precisão devido à menor resolução das imagens. Entre os índices, o VARI apresentou maior amplitude de valores, enquanto o RGBVI foi mais estável entre as amostras, acompanhando melhor o crescimento vegetativo do milho ao longo do período.

A resposta dos índices de acordo com a altura de aquisição das imagens sofre alterações em seus resultados (Figura 14). Essa abordagem evidencia o impacto tanto da resolução espacial, relacionada à altura de voo, quanto das condições ambientais, como iluminação solar e estado fenológico das plantas, na sensibilidade dos índices de vegetação baseados no espectro visível (Galvão *et al.*, 2024).

Figura 14 - Variação da cobertura percentual estimada pelos índices de vegetação RGBVI (verde) e VARI (roxo) em diferentes alturas de voo (20, 40 e 60 metros) realizadas em duas datas (02/09/2024 e 09/10/2024). Os gráficos apresentam a resposta dos índices em cinco amostras, mostrando diferenças na detecção da cobertura conforme a altitude e o período de aquisição das imagens.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Os gráficos mostram que, no voo a 20 metros realizado em setembro, o índice VARI apresentou valores de cobertura mais elevados e com maior variação entre as amostras, enquanto o RGBVI se manteve mais estável e com menor amplitude. Essa diferença sugere que o VARI possui uma maior sensibilidade às variações locais do dossel, enquanto o RGBVI tende a suavizar essas flutuações. Em outubro, ainda a 20 metros, ambos os índices apresentaram comportamento semelhante, indicando maior consistência entre eles à medida que a cultura se desenvolve.

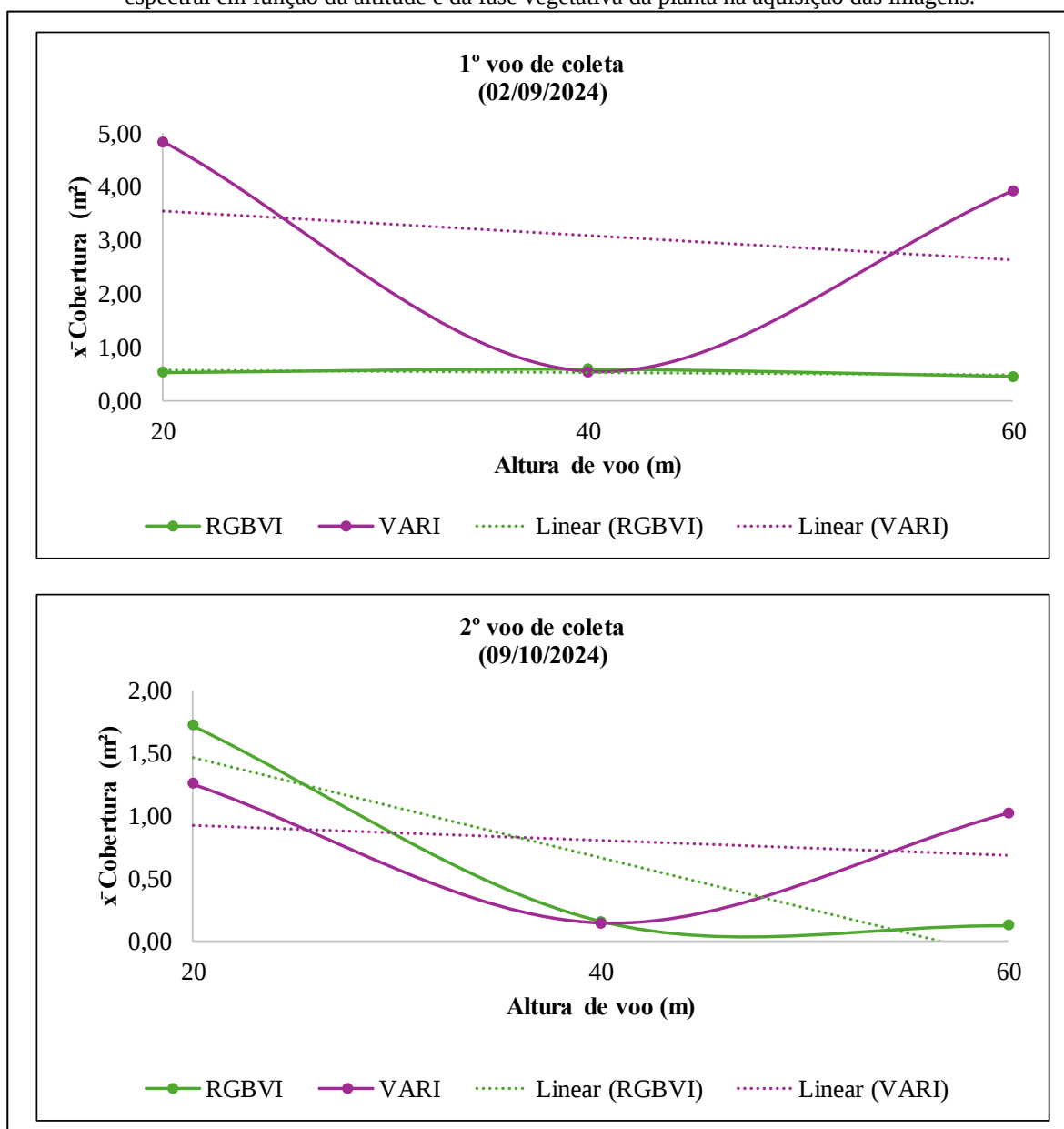
Posteriormente, os gráficos de 40 metros, mostram uma redução na precisão, com oscilações mais acentuadas entre as amostras em setembro, principalmente o RGBVI, que apresentou valores próximos de zero na terceira amostra. Já em outubro, os dois índices se aproximaram em magnitude, embora o VARI ainda tenha mantido maior amplitude. Essa tendência reforça a influência da altura de voo na qualidade das estimativas, visto que maiores altitudes reduzem a resolução espacial das imagens e, consequentemente, a capacidade de detecção de detalhes da cobertura vegetal.

Consequentemente, nos voos de 60 metros as diferenças entre os índices ficaram ainda mais evidentes. Em setembro, o VARI apresentou valores significativamente altos comparando-o com o RGBVI, que manteve padrões de baixa cobertura ao longo de todas as amostras. Esse comportamento se manteve em outubro, com o VARI apresentando picos expressivos em algumas amostras, enquanto o RGBVI continuou registrando valores menores e uniformes.

Tal discrepância pode estar relacionada à maior suscetibilidade do RGBVI à perda de detalhes em imagens de menor resolução, ao passo que o VARI, por sua formulação espectral, manteve maior sensibilidade às variações no dossel mesmo em condições menos favoráveis (Morgan; Wang; Morris, 2021).

Quando relacionamos esses resultados com o tamanho da área em m² (Figura 15), percebe-se uma convergência importante, de que não há uma altura única ideal, e sim um equilíbrio a ser buscado entre a resolução espacial e a fase fisiológica em que a cultura será analisada, de modo a minimizar erros de interpretação (He *et al.*, 2022).

Figura 15 - Cobertura média estimada (m^2) pelos índices de vegetação RGBVI (verde) e VARI (roxo) em diferentes alturas de voo (20, 40 e 60 metros), nos dois períodos de coleta (02/09/2024 e 09/10/2024). As linhas tracejadas representam as tendências lineares de cada índice, apresentando variações na resposta espectral em função da altitude e da fase vegetativa da planta na aquisição das imagens.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

No primeiro voo, o índice VARI apresentou elevada variação em função da altura, com maior cobertura registrada a 20 m, queda acentuada a 40 m e um novo aumento a 60 m, evidenciando sua maior sensibilidade às mudanças na resolução espacial. Já o RGBVI manteve-se estável em todas as altitudes, indicando maior consistência para esse estágio fenológico da cultura. As tendências lineares reforçam esses comportamentos, com o VARI apresentando declínio suave e o RGBVI praticamente sem variação.

No segundo voo, realizado em 09/10/2024, a resposta dos índices mostrou-se distinta. O RGBVI apresentou valores mais elevados a 20 m, decrescendo progressivamente nas maiores altitudes, o que evidencia que a proximidade do sensor ao dossel favoreceu a detecção da cobertura vegetal. O VARI, por sua vez, também iniciou com valores relativamente altos a 20 m, mas apresentou uma curva mais oscilante, com queda acentuada a 40 m e leve recuperação a 60 m. Esse comportamento sugere que, em estágios mais avançados do desenvolvimento da cultura, a resolução espacial passa a influenciar de forma mais expressiva a acurácia do índice.

De maneira geral, observa-se que o voo a 20 m tende a proporcionar maior detalhamento da cobertura, com alta sensibilidade dos índices à variação da estrutura do dossel, sobretudo do VARI. O RGBVI, por outro lado, apresentou-se mais estável entre as diferentes alturas de voo, o que sugere um comportamento consistente para análises comparativas ao longo das fases fenológicas da cultura do milho. Essas diferenças evidenciam como a escolha da altura de voo e do índice de vegetação empregado pode influenciar os resultados, especialmente quando relacionados ao estágio fenológico da cultura e ao nível de detalhamento desejado na análise (Kior *et al.*, 2024).

5 CONCLUSÕES

O monitoramento do milho (*Zea mays* L.) com ARPs equipadas com sensores RGB é viável, mas a sua precisão depende da altura de voo e do estágio fenológico da cultura.

A 20 m obteve-se maior acurácia devido à alta resolução das imagens, enquanto voos a 40 m e 60 m reduziram a precisão e dificultaram a detecção de detalhes.

O VARI mostrou maior sensibilidade às variações locais, sobretudo em baixas altitudes, enquanto o RGBVI foi mais estável ao longo do ciclo, mas perdeu detalhes em maiores alturas.

Consequentemente, voos baixos são mais adequados em estágios iniciais, sendo o VARI indicado para detectar variações sutis no vigor e o RGBVI para acompanhar o desenvolvimento geral a longo prazo.

REFERÊNCIAS

ABREU JÚNIOR, C. A. M. **Estimativa de produtividade da cultura do milho a partir de imagens multiespectrais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais, Monte Carmelo – MG, 2022. 70p.

AESA. **Agência Executiva de Gestão das Águas**. Governo da Paraíba. 2025. João Pessoa/PB. Disponível em: < <http://www.aesa.pb.gov.br/chuvas/>>. Acesso em: 11 out. 2025.

ALMEIDA, P. H. S.; VILELA, V. J. B.; TORRES, I. Y.; UBERTI, A.; LIMA, R. O.; REIS, E. F. Genetic potential of maize populations derived from commercial hybrids for interpopulation breeding. **Revista Caatinga**, v. 37, p. e11736, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1983-21252024v3711736rc>>. Acesso em: 23 set. 2025.

BARBOSA, B. D. S.; FERRAZ, G. A. S.; SANTOS, L. M.; SANTANA, L. S.; BEDIN MARIN, D. B.; ROSSI, G.; CONTI, L. Application of rgb images obtained by uav in coffee farming. **Remote Sensing**, v. 13, n. 12, p. 2397, 2021.

CANADA. **Gouvernement of Canada**. The biology of Zea mays L. (maize). 2021. Disponível em: <<https://inspection.canada.ca/en/plant-varieties/plants-novel-traits/applicants/directive-94-08/biology-documents/zea-mays-maize>>. Acesso em: 23 set. 2025.

CEDEÑO, K. A. R.; ARÉVALO, M. L. C. **Uso de sistemas de aeronaves remotamente pilotadas (RPAS) en el monitoreo de plantaciones forestales**. Editorial Grupo AEA, 2024. Disponível em: <<https://www.editorialgrupoaea.com/index.php/EditorialGrupoAEA/catalog/book/87>>. Acesso em: 23 set. 2025.

CHAVES, M. H. M.; DUDEK, G.; LIMA, B. C.; MARTINS, A. G.; MISSIO, V. C.; MISSIO, R. F. Caracterização morfológica e agrônômica de acessos de milho crioulo do Banco de Germoplasma da UFPR. **Baz. J. of Develop.**, Curitiba, v.6, n.10, p. 82646-82667, 2020. DOI:10.34117/bjdv6n10-626.

CNA. **Confederação Nacional do Agronegócio**. Panorama do Agro. 2021. Brasília/DF. Disponível em: <<https://cnabrasil.org.br/cna/panorama-do-agro>>. Acesso em: 23 set. 2025.

COLOVIC, M.; STELLACCI, A.M.; MZID, N.; DI VENOSA, M.; TODOROVIC, M.; CANTORE, V.; ALBRIZIO, R. Comparative Performance of Aerial RGB vs. Ground Hyperspectral Indices for Evaluating Water and Nitrogen Status in Sweet Maize. **Agronomy**, v. 14, p. 562, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agronomy14030562>>. Acesso em: 22 set. 2025.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Acompanhamento da safra brasileira grãos, v. 12, n. 11, safra 2024/25 – Décimo primeiro levantamento, Brasília, p. 1-123, agosto 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/11o-levantamento-safra-2024-25/e-book_boletim-de-safras-11o-levantamento-2025.pdf>. Acesso em: 23 set. 2025.

COSTA, T. R. S.; AZEVEDO, M. C.; COSTA, J. E.; SOUSA, V. F. O.; SILVA, A. V.; MIELEZRSKI, F. Índices vegetais fotogramétricos no milho em sucessão a plantas de cobertura do solo em Areia, Paraíba (Brasil). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e7510716403-e7510716403, 2021.

CRISPIN, E. F.; SARTORI, T. S.; ALENCAR, J. R. C. C. Interação entre manejo fitossanitário e genético da cultura do milho sobre o complexo de mollicutes e viroses. **Revista Foco**, v. 18, n.8, pp. 01-19, 2019. DOI: 10.54751/revistafoco.v18n8-117.

FANCELLI, A. L. **Plantas Alimentícias: guia para aula, estudo e discussão**. Piracicaba: USP/ ESALQ, 1986. 131 p.

FORTELLI, A.; FEDELE, A.; NATALE, G.; MATANO, F.; SACCHI, M.; TROISE, C.; SOMMA, R. Analysis of Sea Storm Events in the Mediterranean Sea: The Case Study of 28 December 2020 Sea Storm in the Gulf of Naples, Italy. **Applied Sciences**, v. 11, n. 23, p. 11460, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app112311460>>. Acesso em: 05 out 2025.

GALVÃO, L. S.; PETRI, C. A.; DALAGNOL, R. Coupled effects of solar illumination and phenology on vegetation index determination: an analysis over the Amazonian forests using the SuperDove satellite constellation. **GIScience & Remote Sensing**, v. 61, n. 1, p. 2290354, 2024.

HE, Y., DU, X., ZHENG, L., ZHU, J., CEN, H., & XU, L. Effects of UAV flight height on estimated fractional vegetation cover and vegetation index. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, v. 38, p. 63-72, 2022. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.24.007.

HUANG, H.; YE, Z.; ZHANG, C.; YUE, Y.; CUI, C.; HAMMAD, A. Adaptive Cloud-to-Cloud (AC2C) Comparison Method for Photogrammetric Point Cloud Error Estimation Considering Theoretical Error Space. **Remote Sensing**, v. 14, n. 17, p. 4289, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs14174289>>. Acesso em 22 set 2025.

KIOR, A.; YUDINA, L.; ZOLIN, Y.; SUKHOV, V.; SUKHOVA, E. RGB Imaging as a Tool for Remote Sensing of Characteristics of Terrestrial Plants: A Review. **Plants (Basel, Switzerland)**, v. 13, n. 9, p. 1262, 2024. Disponível em:<<https://doi.org/10.3390/plants13091262>>.

KOVAR, M.; BRESTIC, M.; SYTAR, O.; BAREK, V.; HAUPTVOGEL, P.; ZIVCAK, M. Evaluation of hyperspectral reflectance parameters to assess the leafwater content in soybean. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 3, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11030443>.

LEE, G.; HWANG, J.; CHO, S. A novel index to detect vegetation in urban areas using UAV-based multispectral images. **Applied sciences**, v. 11, n. 8, p. 3472, 2021.

LI, Y.; GUO, S.; JIA, S.; YAN, Y.; JIA, H.; ZHANG, W. Quantifying the Effects of UAV Flight Altitude on the Multispectral Monitoring Accuracy of Soil Moisture and Maize Phenotypic Parameters. **Agronomy**, v. 15, p. 2137, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agronomy15092137>>. Acesso em 15 out 2025.

MAGALHÃES, P. C.; SOUZA, T. C. **Cultivo do milho**. Sistema de Produção Embrapa Milho e Sorgo, 9ªed., 2015. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/748755/1/MilhoEcofisiologia.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2025.

MAULANA, MI; LUBIS, M. A. R.; FEBRIANTO, F.; HUA, L. S.; ISWANTO, A. H.; ANTOV, P.; KRISTAK, L.; MARDAWATI, E.; SARI, R. K.; ZAINI, L. H.; HIDAYAT, W.; GIUDICE, V. L.; TODARO, L. Adesivos à base de amido ecologicamente corretos para colagem de compósitos de madeira de alto desempenho: uma revisão. **Florestas**, v. 13, n. 10, p. 1614, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/f13101614>>.

MORGAN, G. R.; WANG, C.; MORRIS, J. T. RGB Indices and Canopy Height Modelling for Mapping Tidal Marsh Biomass from a Small Unmanned Aerial System. **Remote Sensing**, v. 13, n. 17, p. 3406, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs13173406>>.

NIÑO-RONDÓN, C. V.; CASTRO-CASADIEGO, S. A.; MEDINA-DELGADO, B.; GUEVARA-IBARRA D.; L. CAMARGO-ARIZA, L. Comparativa entre la técnica de umbralización binaria y el método de Otsu para la detección de personas. **Revista UIS Ingenierías**, v. 20, n. 2, p. 65-74, 2021. DOI: 10.18273/revuin.v20n2-2021006.

OLSON, D.; ANDERSON, J. Review on unmanned aerial vehicles, remote sensors, imagery processing, and their applications in agriculture. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 2, p. 971-992, 2021. DOI: 10.1002/agj2.20595.

ORTIZ, M. V.; SANGJAN, W.; SELVARAJ, M. G.; MCGEE, R. J.; SANKARAN, S. Efeito dos ângulos zenitais solares em diferentes latitudes nos índices estimados de vegetação agrícola. **Drones**, v. 5, n. 3, p. 80, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/drones5030080>>. Acesso em: 22 set 2025.

PATTNAIK, T.; KANUNGO, P.; SAHOO, P. K.; KAR, T.; JAIN, P.; SOLIMAN, M. S.; ISLAM, M. T. An efficient Low Complex-Functional Link Artificial Neural Network based framework for uneven light image thresholding. **IEEE Access**, v. 12, p. 118315-118338, 2024.

PINHO, R. G. V.; SILVA, E. V. V.; OLIVEIRA, T. L. CHALLENGES OF MAIZE BREEDING UNDER TROPICAL CONDITIONS OF BRAZIL. **REVISTA BRASILEIRA DE MILHO E SORGO**, v. 21, 2022. DOI: 10.18512/rbms2022vol21e1258.

ROTH, R. T.; CHEN, K.; SCOTT, J. R.; JUNG, J.; YANG, Y.; CAMBERATO, J. J.; & ARMSTRONG, S. D. Prediction of cereal rye cover crop biomass and nutrient accumulation using multi-temporal unmanned aerial vehicle based visible-spectrum vegetation indices. **Remote Sensing**, v. 15, n. 3, p. 580, 2023.

SANTOS, D. B.; SOUZA, E. P.; SILVA, M. G.; TEIXEIRA, N. N.; SILVA, T. M.; MICHEL, R. F. M. Avaliação da Acurácia de Mapeamento Planimétrico Executado por Aeronaves Remotamente Pilotadas para Fins de Caracterização de Linhas de Costa. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 16, n. 8, p. e5170, 2025. DOI: 10.7769/gesec.v16i8.5170.

SISHODIA, R. P.; RAY, R. L.; SINGH, S. K. Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. *Remote Sensing*, v. 12, n. 19, p. 3136, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs12193136>>.

SOARES, G. B.; SILVA, H. S.; MATA, J. F. C. REVISÃO ACERCA DA UTILIZAÇÃO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS (RPA) NA INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO. **REVISTA FOCO**, v. 17, n. 8, p. e6015, 2024. DOI: 10.54751/revistafoco.v17n8-132.

SOUZA, E. F. F. S. et al. Avaliação da capacidade adsortiva do sabugo de milho triturado / Assessment of the adsortive capacity of shrimped corncob. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 2, n. 4, p. 1174-1190, 2019.

STARÝ, K.; JELÍNEK, Z.; KUMHÁLOVÁ, J.; CHYBA, J.; BALÁŽOVÁ, K. Comparing RGB-based vegetation indices from UAV imageries to estimate hops canopy area. **Agronomy Research**, v. 18, n. 4, p. 2592-2601, 2020.

SUPROJO, B., & ROSYIDI, F. A. Palm Oil Health Monitoring Based on Vegetation Index through Unmanned Aerial Vehicles (UAV)/Drone Tools. **JGISE: Journal of Geospatial Information Science and Engineering**, v. 8, n. 1, p. 75-90, 2025.

TAWFEEQ, Y. J.; AL-SUDANI, J. A. Digital rock samples porosity analysis by OTSU thresholding technique using MATLAB. **Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering**, v. 21, n. 3, p. 57-66, 2020.

TEIXEIRA, N. N.; LIMA, C. A.; SANTOS, M. S. T.; CRUZ JÚNIOR, D. C.; SANTOS, A. L. O.; SABINO, B. G. M. Avaliação da acurácia altimétrica em levantamentos topográficos urbanos com aeronaves remotamente pilotadas. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 14, n. 12, p. 21403-21430, 2023. DOI: 10.7769/gesec.v14i12.3109.

WANG, M.; ZHANG, Z.; GAO, R.; ZHANG, J.; FENG, W. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery for Plant Communities: Optimizing Visible Light Vegetation Index to Extract Multi-Species Coverage. **Plants**, v. 14, n. 11, p. 1677, 2025.

WU, J.; ROGERS, A.; ALBERT, L. P.; ELY, K.; PROHASKA, N.; WOLFE, B. T.; SERBIN, S. P. Leaf reflectance spectroscopy captures variation in carboxylation capacity across species, canopy environment and leaf age in lowland moist tropical forests. **New Phytologist**, v. 224, n. 2, p. 663–674, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.16029>.

ZHANG, J.; TRAUTMAN, D.; LIU, Y.; BI, C.; CHEN, W.; OU, L.; GOEBEL, R. Achieving the Rewards of Smart Agriculture. **Agronomy**, v. 14, p. 452, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agronomy14030452>>. Acesso em: 22 set. 2025.