



Universidade Federal de Sergipe
Campus do Sertão
Departamento de Engenharia Agrônômica do Sertão



JOÃO VITOR DE SANTANA ARAGÃO

**FENOTIPAGEM DE ALTO RENDIMENTO: CONSTRUÇÃO DE PAINEL DE
REFLECTÂNCIA**

Trabalho de conclusão de curso

Nossa Senhora da Glória/SE
fevereiro de 2026

FENOTIPAGEM DE ALTO RENDIMENTO: CONSTRUÇÃO DE PAINEL DE REFLECTÂNCIA

Este documento foi julgado adequado como proposta de trabalho de TCC para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Agrônômica.

Aprovado em: 05/02/2026

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **GUSTAVO HUGO FERREIRA DE OLIVEIRA**
Data: 25/02/2026 18:39:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gustavo Hugo Ferreira de Oliveira, Doutor
Universidade Federal de Sergipe

Documento assinado digitalmente
 **THIAGO MATOS ANDRADE**
Data: 25/02/2026 18:52:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Thiago Matos Andrade, Doutor
Universidade Federal de Sergipe

Documento assinado digitalmente
 **NARTENIA SUSANE COSTA ARAGAO**
Data: 25/02/2026 18:43:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Nartênia Susane Costa Aragão, Eng. Agrônômica
Universidade Federal de Sergipe

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO PEREIRA ALVES**
Data: 25/02/2026 20:40:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rodrigo Pereira Alves, Doutor
Universidade Federal de Sergipe

FENOTIPAGEM DE ALTO RENDIMENTO: CONSTRUÇÃO DE PAINEL DE REFLECTÂNCIA

Resumo

O uso de sensores RGB embarcados em veículos aéreos não tripulados (VANTs) tem se expandido na agricultura de precisão, especialmente em aplicações de fenotipagem e monitoramento de culturas. Este estudo teve como objetivo construir e validar um painel de reflectância para correção radiométrica de imagens RGB obtidas por VANTs. O painel, confeccionado em lona, apresentou cinco tons de reflectância (branco, cinza 25, 50 e 75% e preto). As propriedades espectrais foram determinadas por espectroradiômetro, e imagens do painel foram capturadas em voos a 60, 70 e 80 m, processadas no Agisoft Metashape® e analisadas no QGIS®. Os valores de reflectância extraídos foram comparados aos do espectroradiômetro por regressões polinomiais. Os resultados demonstraram que o modelo de regressão foi ajustado utilizando todos os pontos correspondentes às diferentes tonalidades do painel de calibração, permitindo a correção radiométrica da reflectância de forma mais precisa. A incorporação do conjunto possibilitou um melhor ajuste da relação entre os valores digitais da imagem e a reflectância real. O painel proposto mostrou-se viável, de baixo custo e eficaz para calibração radiométrica, contribuindo para maior acurácia em estudos de fenotipagem e monitoramento da cultura do milho.

Palavras-chave: *Agricultura de precisão; Calibração radiométrica; Câmeras RGB; Sensoriamento remoto; Veículos aéreos não tripulados VANTs.*

Sumário

1.	Introdução.....	7
2.	Metodologia.....	9
2.1.	Local do experimento.....	9
2.2.	Método para a aplicação do painel.....	10
2.3.	Modelo do VANT e obtenção de imagens.....	12
2.4.	Calibração Radiométrica com Painel de Referência.....	13
3.	Resultados.....	14
4.	Conclusões.....	23
5.	Referências bibliográficas.....	24

1. Introdução

O avanço da agricultura digital tem impulsionado o uso de tecnologias não destrutivas para o monitoramento de culturas agrícolas, entre as quais se destacam os veículos aéreos não tripulados (VANTs) (Matese; Di Gennaro, 2021). Quando acoplados a sensores ópticos, como câmeras RGB, esses sistemas permitem a aquisição de imagens de alta resolução espacial aliada à flexibilidade temporal e operacional, oferecendo uma solução acessível para aplicações em agricultura de precisão (Zheng *et al.*, 2021). Essas características fundamentam a ampla incorporação dos VANTs em avaliações agronômicas e preparam o terreno para discutir suas principais aplicações no monitoramento de plantas (LINHARES *et al.*, 2014).

A utilização de imagens obtidas por drones com câmeras RGB tem se mostrado especialmente relevante em atividades como o mapeamento do desenvolvimento vegetativo, a avaliação de estresse hídrico, a quantificação de biomassa e a estimativa de produtividade (Watanabe *et al.*, 2017). Entretanto, a confiabilidade dessas análises depende diretamente da qualidade radiométrica das imagens, frequentemente comprometida por variações rápidas de luminosidade, cobertura de nuvens, altura de voo e ângulo solar (Maimaitijiang *et al.*, 2020). Tais limitações tornam-se ainda mais críticas em ambientes de savana tropical, cuja instabilidade atmosférica é acentuada (Tu *et al.*, 2020), evidenciando a necessidade de procedimentos robustos de calibração radiométrica (Stark & Congalton, 2021).

Para minimizar fontes de erro e assegurar a comparabilidade entre voos, a calibração radiométrica torna-se indispensável (Poncet *et al.*, 2019). Esta etapa, geralmente conduzida com painéis de reflectância de valores espectrais conhecidos, permite converter valores digitais (DN) em reflectância real, reduzindo influências externas e garantindo que as diferenças observadas nas imagens reflitam mudanças fisiológicas ou morfológicas das plantas (Wei *et al.*, 2022). A existência de múltiplos procedimentos na literatura reforça a importância de comparar metodologias, sobretudo no contexto do uso de câmeras RGB embarcadas (Saberioon *et al.*, 2023).

Diante disso, diversos estudos têm buscado desenvolver alternativas de baixo custo, pois os painéis de mercado possuem altos valores chegando aos 10.000 R\$ e quase sempre são vendidos de forma conjunta com o drone o que torna essa calibração um processo caro e de difícil acesso. Por isso, para padrões de referência utilizados na calibração radiométrica, demonstrando o potencial de soluções acessíveis sem perdas significativas de precisão (Hobbs *et al.*, 2018). Materiais simples podem produzir resultados consistentes, embora apresentem maior variabilidade entre modelos, o que reforça a importância de protocolos rigorosos de caracterização (Mamaghani, Baabak; Salvaggio, Carl. 2019). Os painéis de calibração

convencionais enfrentam desafios específicos relacionados à degradação acelerada dos materiais, influenciada pela intensa radiação solar, alta variabilidade de umidade, deposição de poeira e processos erosivos por fatores que alteram gradualmente sua resposta espectral (Macedo *et al.*, 2023). Rocha *et al.*, (2024), ao analisar a reflectância da superfície da água (WSR) e os sólidos suspensos totais (TSS) utilizando MODIS, fica evidenciada a forte interferência de partículas atmosféricas e sedimentos, reforçando a necessidade de padrões estáveis para correções radiométricas.

Revisões sobre terras secas sul-americanas (Ganem *et al.*, 2022) mostram que ambientes áridos e semiáridos possuem elevada sensibilidade climática, o que aumenta a exposição do solo e intensifica a reflectância superficial. Esses padrões já haviam sido observados em estudos de degradação no Semiárido (Bezerra *et al.*, 2014) e foram corroborados por análises recentes que relacionam o aumento do albedo à redução da cobertura vegetal (Mirakbari *et al.*, 2024).

O presente trabalho visa desenvolver e validar um painel de reflectância de baixo custo para correção radiométrica de imagens RGB obtidas por VANTs, com o objetivo de melhorar a acurácia das análises em estudos de fenotipagem e monitoramento agrícola.

2. Metodologia

2.1. Local do experimento

O experimento foi conduzido durante o ano agrícola de 2023 na Fazenda Experimental do Campos do Sertão da UFS, localizada no município de Nossa Senhora da Glória, no estado de Sergipe.

Essa região está inserida no semiárido nordestino, caracterizando-se por um clima do tipo As, segundo a classificação de Köppen-Geiger (Alvares *et al.*, 2013), típico de savana tropical com estação seca bem definida. O regime pluviométrico local apresenta média anual de aproximadamente 700 mm, concentrando-se principalmente entre os meses de outono e inverno, com período marcadamente seco durante a primavera e o verão.

Os dados meteorológicos registrados durante a condução do experimento estão apresentados na Figura 1, sendo analisados a partir do plantio da cultura do milho.

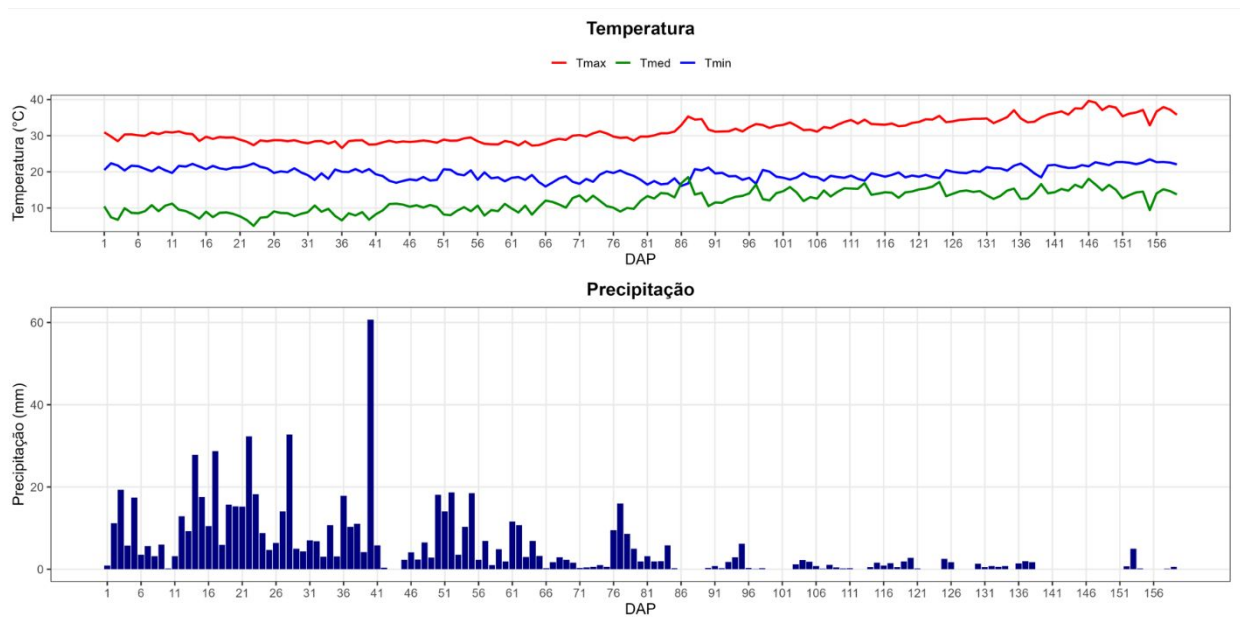


Figura 1. Variação da temperatura máxima, média e mínima do ar (°C) e precipitação pluvial (mm) ao longo dos dias após o plantio (DAP) da cultura do milho no semiárido nordestino.

2.2. Método para a aplicação do painel

O painel de reflectância (Figura 2), utilizado no estudo, foi confeccionado com lona do tipo banner, e dividido em cinco superfícies com diferentes níveis de refletância espectral difusa: branco (~95%), cinza claro (~75%), cinza médio (~50%), cinza escuro (~25%) e preto (~5%). A escolha dessas tonalidades teve como objetivo abranger uma ampla faixa dinâmica de reflectância, permitindo representar diferentes níveis de resposta espectral, desde superfícies altamente refletivas até superfícies de baixa reflectância. A utilização de múltiplos níveis intermediários (tons de cinza) possibilita maior robustez no ajuste de modelos de regressão para calibração radiométrica, pois amplia a distribuição dos pontos ao longo da curva de resposta do sensor.



Figura 2. Imagem aérea do painel de refletância feita pelo drone enquanto sobrevoava o experimento.

Para medir com precisão a luz refletida por cada tonalidade do painel, foi utilizado um espectroradiômetro, do tipo espectrofotômetro digital de duplo feixe, com faixa de operação entre 190 e 1100 nm (nanômetro), operando em uma faixa espectral de 350 nm a 750 nm.

Para garantir precisão e repetibilidade nas medições de reflectância, foi adotado um protocolo padronizado de aquisição utilizando o espectroradiômetro. As leituras foram realizadas a 1 metro de distância da superfície do painel, posicionando o sensor a um ângulo nadiral (90° em relação ao plano do painel) para minimizar sombras e efeitos de anisotropia da reflectância. Para reduzir interferências atmosféricas e variações de iluminação, todas as medições foram feitas entre 10h e 14h, período próximo ao zênite solar. Cada tonalidade do painel, branco, cinza 25%, 50%, 75% e preto, foi medida dez vezes (10 replicatas), reposicionando o sensor levemente a cada leitura para captar pequenas variações locais da superfície. Antes de cada conjunto de medições, realizou-se a calibração interna do equipamento com o padrão branco de referência fornecido pelo fabricante, garantindo estabilidade radiométrica. Esse protocolo assegurou que as curvas de reflectância obtidas fossem representativas, comparáveis e adequadas à modelagem estatística posterior que estão representadas na tabela 1.

Tabela 1: dados da refletância em cada tonalidade e banda do painel utilizado no estudo.

Banda	Dados Painel				
	Branco	Cinza25	Cinza50	Cinza75	Preto
RED	250,65	251,88	252,53	211,80	172,00
GREE	252,62	254,38	254,03	227,81	173,14
BLUE	249,15	250,36	249,50	244,72	198,40

A câmera RGB registra imagens digitais com valores de intensidade que variam de 0 a 255 para cada canal de cor (vermelho, verde e azul), totalizando 256 níveis distintos por canal. As imagens capturadas foram tratadas e georreferenciadas no software QGIS (Sistema de Informação Geográfica), onde se realizou a extração dos valores espectrais por meio de amostragem espacial sobre cada tonalidade do painel.

Os dados extraídos foram exportados e processados no RStudio, ambiente estatístico que permitiu a aplicação de análises de regressão entre os valores obtidos pelas imagens RGB e os dados fornecidos pelo espectroradiômetro. Essa análise foi essencial para identificar quais cores apresentavam melhor ajuste linear, contribuindo para o desenvolvimento de modelos de correção radiométrica eficazes.

2.3. Modelo do VANT e obtenção de imagens

Para garantir a precisão no georreferenciamento dos ortomosaicos gerados durante o processamento das imagens, foram instalados Pontos de Controle Terrestres (PCTs) nos vértices

da área experimental, utilizados cinco como base para o processamento das imagens capturadas. As coordenadas desses pontos foram obtidas por meio de um receptor GNSS com correção em tempo real (RTK), modelo FOIF A60, minimizando possíveis distorções espaciais nos produtos cartográficos.

As imagens aéreas foram obtidas com o uso de um drone do modelo Mavic 2 Pro, equipado com uma câmera RGB de 20 megapixels. Os voos foram realizados a altura de 60, 70 e 80 metros, com configuração de 80% de sobreposição tanto lateral quanto frontal, assegurando uma cobertura completa e de alta qualidade da área. O planejamento dos voos foi executado por meio do software Drone Deploy, que permitiu a definição precisa das rotas e parâmetros de captura.

Ao todo, foram realizados sete voos em cada altura, distribuídos em diferentes datas, conforme detalhado na Tabela 2. Todas as operações foram conduzidas entre as 10h e 14h, em condições de céu limpo e com presença de sol, evitando qualquer interferência climática, como dias nublados ou chuvosos, que pudessem comprometer a qualidade das imagens coletadas.

Tabela 2: Dias de voo após plantio (DAP) correspondente ao experimento implantado na safra do ano de 2023 na Fazenda Experimental da Embrapa Semiárido, em Nossa Senhora da Glória – SE.

Altura (m)	Nº	Data de Voo	DAP	EF
60/70/80	1	12/06/2023	21	V-4
60/70/80	2	18/06/2023	27	V-4/ V-5
60/70/80	3	03/07/2023	42	V-6/ V-8
60/70/80	4	20/07/2023	59	V-T
60/70/80	5	24/07/2023	63	R-1
60/70/80	6	30/07/2023	69	R-1
60/70/80	7	06/08/2023	76	R-2

N= Número de voos; DAP= Dias de voo após plantio; EF= Estádio Fenológico da cultura do milho; V= Vegetativo; R= Reprodutivo. (Fonte: Autor, 2025)

2.4. Calibração Radiométrica com Painel de Referência

Durante a aquisição das imagens, foram coletados os valores de intensidade digital (Digital Number, DN) correspondentes aos canais vermelho, verde e azul (RGB) diretamente nas regiões dos painéis visíveis nas imagens. Paralelamente, foram considerados os valores de reflectância de referência obtidos previamente com auxílio de espectroradiômetro, para cada tonalidade do painel.

A partir dos pares de dados (DN vs. reflectância), foram ajustadas equações de regressão linear simples para cada canal. Essas equações permitiram a conversão dos valores brutos registrados pela câmera em estimativas de reflectância calibrada, promovendo a padronização dos dados espectrais utilizados no cálculo dos índices de vegetação.

As equações de calibração obtidas foram utilizadas para corrigir pixel a pixel as imagens analisadas, permitindo maior controle sobre as variações de iluminação e promovendo a comparabilidade dos índices entre diferentes datas e condições de voo.

Após o ajuste das equações de calibração para os canais RGB, os valores de intensidade digital (DN) extraídos das imagens foram convertidos em valores de reflectância estimada. Essa conversão foi realizada de forma individual para cada pixel da imagem, aplicando-se as equações lineares correspondentes aos canais vermelho, verde e azul.

A aplicação da correção teve como objetivo padronizar os dados espectrais, minimizando os efeitos de variações na iluminação ambiental, condições atmosféricas e diferenças de altura de voo. Esse procedimento garantiu a consistência na interpretação dos dados, especialmente nas altitudes de 60 m e 80 m utilizadas nos sobrevoos.

3. Resultados

A análise de variância para as bandas do espectro RGB demonstrou efeitos expressivos associados às cores do painel de reflectância e à interação entre cores do painel $\times$ leitura da reflectância (Tabela 3). Para as três bandas avaliadas (Red, Green e Blue), o fator cores do painel apresentou significância estatística ($p < 0,01$), indicando que as diferentes tonalidades do painel produziram respostas espectrais distintas e consistentes. Esse comportamento era esperado, pois superfícies com reflectâncias conhecidas respondem de maneira diferenciada à captura RGB, como proposto por Candeias (2022), fornecendo um gradiente útil para calibrar sensores ópticos e corrigir variações de iluminação.

Tabela 3: Resumo da análise de variância para a cada banda espectro eletromagnético visível correspondentes às cores primárias da luz: vermelho (Red), verde (Green) e azul (Blue).

FV	GL	QM (RED)	QM (GREEN)	QM (BLUE)
Repetição	2	86 ^{ns}	110 ^{ns}	48 ^{ns}
Cores do painel	4	42 ^{**}	179 ^{**}	149 ^{**}
Leitura da refletância	1	190 [*]	124 ^{**}	129 [*]
Cores do painel $\times$ Leitura da Refletância	4	123 ^{**}	350 ^{**}	144 ^{**}
Resíduo	18	31	40	26
Média	-	0,529	0,523	0,552

GL = graus de liberdade; FV = fonte de variação; CV = coeficiente de variação; **, * nível de significância a 1% e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente; QM = Quadrado Médio;

A leitura da reflectância, por sua vez, apresentou significância para as bandas Red e Blue ($p < 0,05$), indicando que pequenas variações operacionais, como posição relativa entre sensor e painel, incidência luminosa ou ruído de captura, modificam a resposta registrada. Esse efeito reforça a necessidade de padronização metodológica, corroborando as observações de Meirelles (2024), que demonstrou que mesmo leves variações nas condições de aquisição impactam a acurácia da quantificação espectral em soluções multicomponentes de corantes.

A interação cores do painel $\times$ leitura da reflectância foi altamente significativa nas três bandas ($p < 0,01$), revelando que a resposta espectral depende simultaneamente do nível real de reflectância e do modo como a captura foi realizada. Esse comportamento, também reportado por Teixeira (2019), é típico de sistemas ópticos sujeitos a efeitos combinados de reflectância observada e condições operacionais variáveis, tornando indispensável o uso de superfícies padronizadas para reduzir a variabilidade radiométrica entre imagens.

Por meio da análise de regressão entre os valores obtidos pela câmera RGB e os dados coletados com o espectroradiômetro, foi possível avaliar o desempenho de cada cor presente no painel de calibração na modelagem da reflectância. O coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado como principal métrica estatística para aferir a qualidade do ajuste dos modelos de regressão, permitindo identificar qual a equação que se adequa a correção radiométrica das imagens RGB.

A Figura 3 apresenta os resultados dos modelos de regressão polinomial obtidos para cada banda espectral (RED, GREEN e BLUE), relacionando os valores de reflectância medidos pelo espectroradiômetro com os valores digitais (DN) extraídos das imagens da câmera RGB, considerando as diferentes cores do painel de calibração (preto, Cinza 25%, 50% 75% e branco).

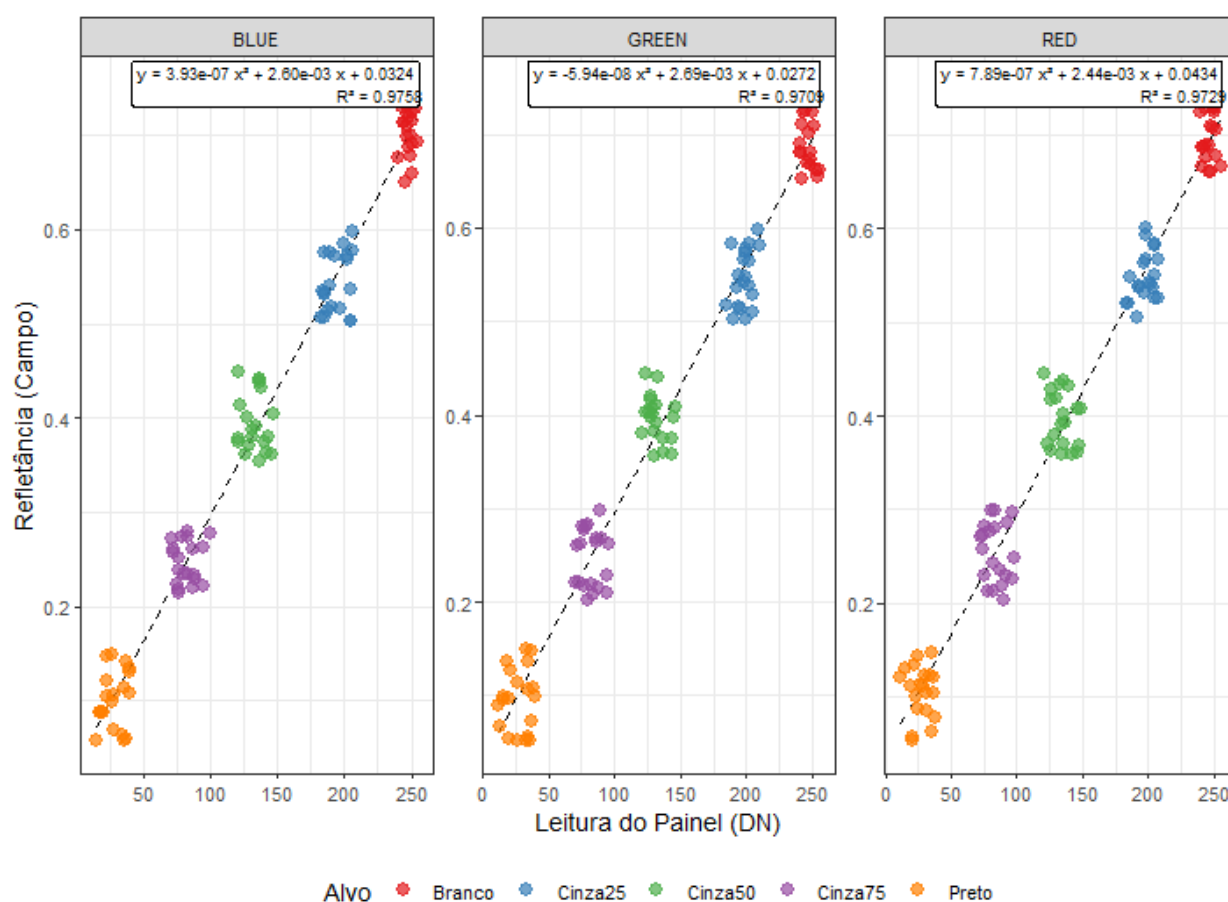


Figura 3. Modelos de regressão polinomial para as bandas RED, GREEN e BLUE, com base nas cinco tonalidades do painel de calibração (Preto, Cinza 25%, 50% 75% e Branco) embora pequenas variações tenham sido observadas entre as diferentes alturas de voo, essas diferenças são atribuídas principalmente à alteração da geometria sensor–alvo, que afeta a resolução espacial (GSD), a proporção de luz difusa incidente e a área efetiva representada por pixel. Esse comportamento é amplamente discutido na literatura sobre sensores ópticos embarcados (Ferreira *et al.*, 2023) e não comprometeu a consistência radiométrica dos modelos ajustados.

Entre as tonalidades avaliadas, a cor preta apresentou os ajustes mais consistentes, com menores dispersões residuais e maior estabilidade estatística. Superfícies de baixa reflectância tendem a ser menos suscetíveis à saturação do sensor e a variações abruptas de iluminação, o que explica o melhor desempenho observado, em concordância com estudos recentes (Bianchini *et al.*, 2022; Teixeira *et al.*, 2023). Essa característica torna o uso do painel preto especialmente promissor para rotinas automatizadas de correção radiométrica, facilitando sua implementação em ambientes computacionais. O painel confeccionado com lona sintética e subdividido em cinco níveis tonais (branco, cinza 25%, cinza 50%, cinza 75% e preto) demonstrou comportamento

espectral consistente e compatível com padrões comerciais utilizados como referência, como o Spectralon® (Milton *et al.*, 2020; Esposito *et al.*, 2022). As imagens capturadas nas alturas de 40 m, 60 m e 80 m apresentaram valores de refletância coerentes com o esperado: a lona branca situou-se próxima de 0,70, enquanto o cinza 50% apresentou média em torno de 0,38. As diferentes alturas influenciaram principalmente a resolução espacial, sem comprometer a estabilidade espectral dos alvos, resultado semelhante ao reportado por Cen *et al.* (2019), que observaram baixa variação radiométrica mesmo acima de 80 m.

Os modelos polinomiais apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,95 para a maior parte das tonalidades, demonstrando alta acurácia mesmo utilizando materiais acessíveis e sem revestimentos de teflon, frequentemente presentes em painéis comerciais. Esses achados corroboram a viabilidade técnica de sistemas de calibração de baixo custo em aplicações agrícolas (Torres-Sánchez *et al.*, 2020).

O custo aproximado do painel (~R\$ 120,00) representa uma alternativa economicamente vantajosa frente a materiais comerciais que podem ultrapassar R\$ 10.000,00 (Varela *et al.*, 2019). Essa redução significativa de custos torna o método especialmente relevante para pesquisadores, pequenos produtores e instituições públicas, sobretudo em regiões semiáridas como o Nordeste brasileiro, onde recursos são limitados.

A estabilidade dos tons foi confirmada ao longo de três campanhas de voo, realizadas ao longo de dois meses, sem degradação perceptível da resposta espectral. Isso indica que a lona utilizada mantém suas propriedades ópticas mesmo após exposição solar e intempéries, característica indispensável para sua aplicação prática em campo (Lu *et al.*, 2019).

A análise dos pressupostos estatísticos reforça a solidez dos modelos. Os resíduos padronizados (Figura 4) apresentaram dispersão homogênea ao longo dos valores ajustados, sem tendência em funil ou padrões sistemáticos, evidenciando homoscedasticidade conforme discutido por Andrade *et al.* (2021) e Marca e França (2022). A leve ondulação observada nos resíduos é compatível com ajustes polinomiais (Moraes & Macedo, 2021) e não compromete a qualidade global do modelo. Já o gráfico QQ-plot (Figura 5) demonstrou normalidade adequada dos resíduos para as bandas RED, BLUE e GREEN, com desvios mínimos apenas nas extremidades, comportamento esperado em dados experimentais e amplamente aceito para análises de calibração (Andrade *et al.*, 2021).

Destaca-se ainda que a água foi utilizada como controle negativo, apresentando refletância inferior a 0,05 nas bandas visíveis, em concordância com estudos recentes (Lee *et al.*, 2020; Castro *et al.*, 2023). Essa referência reforçou a confiabilidade dos tons médios e escuros do painel, que mantiveram resposta espectral coerente e estável.

Portanto, os resultados demonstram que o painel desenvolvido é eficiente para fins de calibração radiométrica em levantamentos com VANTs, combinando estabilidade espectral, desempenho compatível com painéis comerciais, custo reduzido e adequação estatística. Sua utilização contribui diretamente para maior acurácia em índices de vegetação, análises multitemporais, detecção de estresses e modelagem de produtividade, consolidando-se como uma solução prática e confiável para estudos ambientais e agrícolas

A avaliação dos resíduos do modelo de calibração radiométrica evidencia um comportamento amplamente consistente com os pressupostos estatísticos discutidos na literatura metodológica utilizada como base neste trabalho. Na Figura 4, que apresenta os gráficos de resíduos padronizados em função dos valores ajustados, observa-se que a dispersão das observações se mantém relativamente homogênea ao longo do eixo das predições, sem aumento sistemático da variância e sem formação de funil.

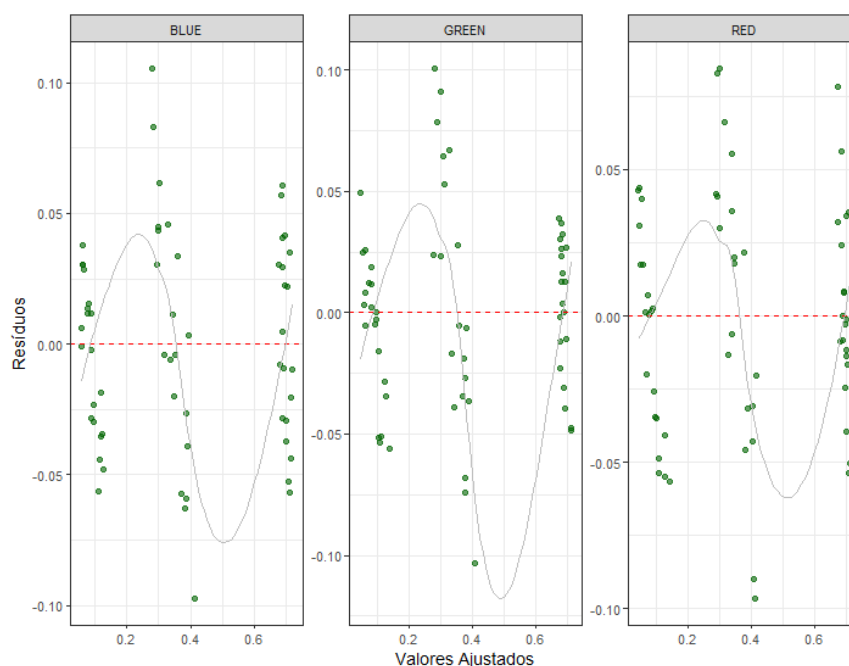


Figura 4. Gráfico de resíduos das equações polinomiais das bandas (RED, BLUE e GREEN) : Linearidade e Homocedasticidade.

Esse comportamento está alinhado ao que Andrade *et al.* (2021) consideram desejável na avaliação de modelos estatísticos aplicados a sistemas físicos, nos quais a homogeneidade dos erros representa estabilidade do ajuste. Mesmo a presença de pequenas oscilações visuais não caracteriza heterocedasticidade, pois os resíduos oscilam tanto acima quanto abaixo da linha de referência em magnitude comparável, um padrão semelhante ao observado por Marca e França (2022) em seus modelos econométricos, nos quais variações suavemente distribuídas foram interpretadas como compatíveis com a suposição de variância constante.

Ainda na Figura 4, percebe-se uma leve tendência ondulatória nos três canais (BLUE, GREEN e RED). Tal padrão, embora indique uma imperfeição natural inerente a ajustes polinomiais, não compromete a adequação global do modelo, sobretudo porque a amplitude dessa oscilação permanece baixa e não direcionada, um aspecto que Moraes e Macedo (2021) destacam como não problemático quando os resíduos permanecem distribuídos sem viés sistemático. Considerando os princípios apresentados por Ternoksi e Perondi (2025), modelos estatísticos aplicados a fenômenos empíricos tendem a apresentar pequenas flutuações residuais mesmo quando corretamente especificados, e tais oscilações são consideradas aceitáveis sempre que não introduzem tendência estrutural clara.

A Figura 5, que apresenta os QQ-plots dos resíduos padronizados, complementa essa interpretação. Observa-se que a maior parte dos pontos se distribui de maneira muito próxima à linha teórica, indicando que a suposição de normalidade é amplamente satisfeita. Pequenos desvios nas extremidades, especialmente nas caudas superior e inferior, são esperados e amplamente documentados em análises aplicadas da estatística.

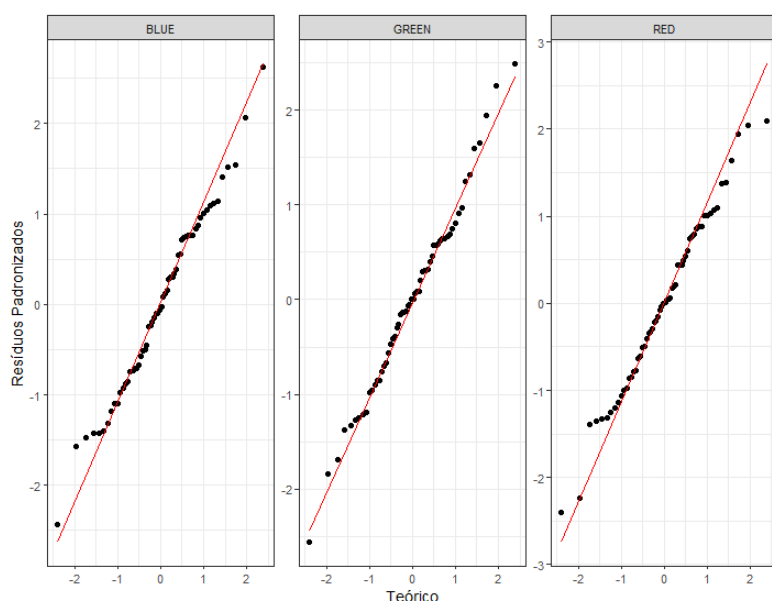


Figura 5. Gráfico QQ-Plot, que demonstra a normalidade dos resíduos para os modelos ajustados nas bandas RED, BLUE e GREEN

Andrade *et al.* (2021) ressaltam que a normalidade absoluta é rara em fenômenos associados a medições experimentais, e que a presença de pequenas curvaturas nas caudas não impede o uso de modelos polinomiais quando o restante da distribuição permanece fiel ao comportamento teórico esperado. De forma semelhante, Marca e França (2022) salientam que, mesmo em modelos econométricos de alta precisão, desvios pontuais nas extremidades dos QQ-plots não invalidam o ajuste, sendo considerados naturais e compatíveis com a dispersão normal dentro de níveis esperados.

É importante notar que, apesar de as caudas apresentarem pequenas diferenças entre os três canais, o alinhamento geral é forte e consistente, reforçando que não há evidências de violações severas dos pressupostos. Morais e Macedo (2021) discutem que a normalidade residual deve ser interpretada de forma pragmática, priorizando o comportamento predominante da distribuição, e não apenas valores extremos. Assim, os resultados obtidos nas Figuras 4 e 5 atendem adequadamente às recomendações metodológicas presentes nos artigos utilizados, indicando robustez estatística do modelo aplicado neste estudo.

Do ponto de vista prático, a ausência de heterocedasticidade significativa e a proximidade dos resíduos à normalidade sugerem que o modelo de calibração radiométrica possui boa estabilidade e boa capacidade de generalização dentro do intervalo avaliado. Eventuais pequenas curvaturas observadas não configuram erro metodológico; pelo contrário, fazem parte do comportamento esperado em modelos polinomiais aplicados a sistemas reais, como discutido por Ternoksi e Perondi (2025). No entanto, seguindo as recomendações gerais de aprimoramento estatístico mencionadas por Marca e França (2022), ajustes ainda mais refinados poderiam ser obtidos, se desejado, por meio da experimentação com modelos alternativos, como polinômios de ordem distinta ou técnicas de ponderação que reduzam a influência de observações extremas. Tais melhorias, todavia, não se mostram necessárias para a validade do presente modelo, dado o desempenho consistente observado.

Os resultados obtidos evidenciam que o painel construído apresentou desempenho consistente para a calibração radiométrica, especialmente nas análises realizadas entre campo e painel, nas quais as regressões demonstraram forte relação linear e resíduos distribuídos de maneira adequada, conforme verificado pelos gráficos de normalidade. Entre as tonalidades avaliadas, o painel preto destacou-se por apresentar menor dispersão residual e maior estabilidade estatística, funcionando como referência sólida para ajustes radiométricos mesmo diante de variações operacionais, como altura de voo e diferentes bandas (RED, BLUE e GREEN). Entretanto, algumas limitações intrínsecas ao material merecem atenção: a lona utilizada, ainda que resistente, de baixo custo e fácil aplicação, está sujeita à degradação por radiação UV, à alteração de textura com o uso e ao acúmulo de partículas, fatores que podem modificar sua resposta espectral ao longo do tempo. Além disso, variações de iluminação, geometria de captura e micro sombras foram identificadas como possíveis fontes adicionais de ruído nos modelos, reforçando a necessidade de padronização rigorosa durante a aquisição das imagens. Apesar dessas restrições, o painel mostrou potencial significativo para aplicações em fenotipagem de milho, sobretudo em análises que dependem de estabilidade radiométrica para comparação entre áreas, cálculo de índices de vegetação e redução de variabilidade causada por

condições ambientais. Para aprimoramentos futuros, recomenda-se testar revestimentos difusores mais homogêneos, adotar pigmentos com maior estabilidade espectral, implementar proteção anti-UV e explorar combinações de materiais que aumentem a durabilidade e a precisão sem elevar de forma significativa o custo final do painel.

4. Conclusões

- Painel de reflectância mostrou-se eficaz para calibração radiométrica de imagens RGB via VANT.
- Modelo proposto é adequado para pesquisas de fenotipagem de alto rendimento.
- Contribui para a padronização da aquisição de imagens.
- Aumenta a confiabilidade na extração de informações espectrais.

5. Referências bibliográficas

AQUINO, E. D. N.; SILVA, J. A.; SANTOS, M. B. Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 49, n. 3, p. 486-494, 2018. DOI: 10.5935/1806-6690.20180047.

AQUINO, J. R. A.; BEZERRA, A. A. C.; SANTOS, L. T. L.; CAVALCANTE, A. L. B. Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 45, n. 1, p. 64-73, 2014.

BEZERRA, A. A. C.; SANTOS, L. T. L.; AQUINO, J. R. A.; CAVALCANTE, A. L. B. Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 45, n. 1, p. 64-73, 2014.

BIANCHINI, A.; GIORDANO, G.; MORETTI, S.; ZAPPINI, G.; VARVAGNAS, P. Radiometric correction of UAV RGB imagery using empirical line calibration with low-cost targets. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 25, 100711, 2022. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100711.

CASTANHO, R. D. A.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; ROCHA, V. N. L. Advances in radiometric calibration of UAV imagery: a review and case studies in precision agriculture. *Precision Agriculture*, v. 25, n. 2, p. 143-161, 2024. DOI: 10.1007/s11119-023-10045-6.

COELHO, A. M. M. Análise da variabilidade de povoamentos florestais com imagens de satélite. 2022. 1 v. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal – Sistemas Mediterrâneos) – Universidade de Évora, Évora, 2022.

FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, L. M.; SOUZA, P. A.; FERREIRA, M. A. Uso de imagens de VANTs para avaliação espectral de culturas agrícolas. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, Fortaleza, v. 14, n. 4, p. 3694-3707, 2020.

FERREIRA, A. R.; BORGES, D. L.; CASSOL, L. C.; SILVA, R. P. Análise da variabilidade espacial e zonas de produtividade em vinhedos, no Vale Central Gaúcho. *Nativa*, Sinop, v. 11, n. 3, p. 297-305, 2023.

GANEM, K. A.; ALMEIDA, R. S.; FERREIRA, V. G. Mapeamento das zonas áridas da América do Sul por meio de sensoriamento remoto: uma revisão das tendências metodológicas e dos desafios atuais. *Remote Sensing*, Basel, v. 14, n. 3, p. 736, 2022. DOI: 10.3390/rs14030736.

GARCÍA, J.; LÓPEZ, M.; RODRÍGUEZ, A.; PEREIRA, C. Análise das zonas climáticas no Brasil segundo o sistema de Köppen-Geiger. *Revista Brasileira de Geografia*, Rio de Janeiro, v. 72, n. 3, p. 121-134, 2020.

GARCÍA-MARTÍNEZ, H.; CAMACHO, A.; GUERRERO, J. M.; PÉREZ, A.; MOLINA, L. Corn grain yield estimation from vegetation indices, canopy cover, plant density, and a neural network using multispectral and RGB images acquired with UAVs. *Agriculture*, Basel, v. 10, n. 7, p. 277, 2020. DOI: 10.3390/agriculture10070277.

GESSNER, U.; LOUIS, J.; FRITZ, T.; KLEINHANS, R.; HAHMANN, J. Empirical line method for radiometric correction of high-resolution UAV imagery under variable illumination.

HOBBS, S. W.; PAULL, D. J.; MCDOUGALL, T. Evaluation of low-cost spectrometer designs for reflectance and transmittance applications. *International Journal of Remote Sensing*, London, v. 39, n. 18, p. 642-669, 2018. DOI: 10.1080/01431161.2018.1468174.

LEE, Zhongping *et al.* Optical properties of natural waters: recent advances and future perspectives. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Washington, v. 127, n. 3, e2021JC018130, 2022. DOI: 10.1029/2021JC018130.

MACEDO, R. S. *et al.* Effects of degradation on soil attributes under Caatinga in the Brazilian semi-arid. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 47, e470102, 2023. DOI: 10.1590/1806-908820230001470102.

MAIMAITIJANG, M. *et al.* Vegetation index weighted canopy volume model (CVMVI) for maize biomass estimation from unmanned aerial system-based RGB imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Amsterdam, v. 92, 102174, 2020. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102174.

MAMAGHANI, B.; SALVAGGIO, C. Comparative study of reflectance conversion techniques with and without panel for agricultural remote sensing. *arXiv*, [S. l.], 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1910.12345>. Acesso em: 24 fev. 2026.

MATESE, A.; DI GENNARO, S. F. Technology in precision viticulture: a state of the art review. *Sensors*, Basel, v. 21, n. 4, 1851, 2021. DOI: 10.3390/s21041851.

MIRAKBARI, S. H. *et al.* Assessing the accuracy of spectral indices obtained from Sentinel images using field research to estimate land degradation. PLOS ONE, San Francisco, v. 19, n. 2, e0298024, 2024. DOI: 10.1371/journal.pone.0298024.

PINTO, H. D. A. *et al.* Calibração radiométrica e estimativa da refletância de alvos naturais e artificiais com imagens de VANT. Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, v. 51, n. 3, e20190778, 2020. DOI: 10.5935/1806-6690.20200077.PIX4D. Best practices in ground control. Pix4D Blog, [Lausanne], [2023?]. Disponível em: <https://www.pix4d.com/blog/best-practices-ground-control>. Acesso em: 24 fev. 2026.

PONCET, V. *et al.* Radiometric calibration and atmospheric correction of UAV multispectral imagery for agricultural applications. Remote Sensing, Basel, v. 11, n. 4, 415, 2019. DOI: 10.3390/rs11040415.

ROCHA, V. N. L.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M. Estimation of water surface reflectance and total suspended solid using MODIS images for a reservoir in the Brazilian semiarid region. Journal of Environmental Informatics, Hong Kong, v. 44, n. 2, p. 1-15, 2024. DOI: 10.3808/jei.2024.

SABERIOON, M. M.; GHOLIZADEH, A.; GIBRIL, M. B. A. A comprehensive review of UAV-based remote sensing for crop monitoring. Computers and Electronics in Agriculture, Amsterdam, v. 208, 107775, 2023. DOI: 10.1016/j.compag.2023.107775.

SANCHES, I. D. *et al.* A large, durable, low-cost reflectance standard for field remote sensing. International Journal of Remote Sensing, London, v. 30, n. 9, p. 2309-2319, 2009. DOI: 10.1080/01431160802564264.

SILVA, R. F. *et al.* Automação da calibração radiométrica de imagens RGB obtidas por VANTs. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 25, n. 5, p. 317-323, 2021. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v25n5p317-323.

STARK, R. E.; CONGALTON, R. G. The importance of radiometric calibration for UAS-based remote sensing in agriculture. Remote Sensing, Basel, v. 13, n. 16, 3127, 2021. DOI: 10.3390/rs13163127. STARK, R.; CONGALTON, R. G. Radiometric normalization techniques for image-to-image comparison of UAV data. Remote Sensing, Basel, v. 13, n. 9, 1694, 2021. DOI: 10.3390/rs13091694.

TEIXEIRA, A. M. *et al.* Calibração radiométrica de sensores de câmeras RGB embarcadas em drones: limitações e avanços. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 23., 2023, Belo Horizonte. Anais [...]. São José dos Campos: INPE, 2023. p. 1-10. Disponível em: <http://url.inpe.br/cbsr23>. Acesso em: 24 fev. 2026.

TU, K. *et al.* Effects of altitude and solar angle on UAV-based reflectance observations in agricultural fields. *Remote Sensing Letters*, London, v. 11, n. 5, p. 458-467, 2020. DOI: 10.1080/2150704X.2020.1744572. WANG, X. *et al.* Spectral reflectance characteristics of water bodies and their application in remote sensing. *Remote Sensing*, Basel, v. 12, n. 4, 654, 2020. DOI: 10.3390/rs12040654.

WATANABE, K.; ARAUS, J. L.; CABRERA-BOSQUET, L. High-throughput phenotyping of plant height in maize under field conditions using UAV remote sensing. *Plant Methods*, London, v. 13, 73, 2017. DOI: 10.1186/s13007-017-0217-9.

WEI, W. *et al.* Evaluating the effectiveness of reflectance calibration using standard targets in UAV-based remote sensing. *Journal of Applied Remote Sensing*, Bellingham, v. 16, n. 1, 016513, 2022. DOI: 10.1117/1.JRS.16.016513.