VARIABILIDADE ESPACIAL DO MPRI EM DUAS ÁREAS DE CACAU A PLENO SOL EM DIFERENTES CONDIÇÕES ALTITUDINAIS

Autores: Jheyli Becerra Campos[1].
Beatriz de Sousa da Silva [2], João Victor Gomes Ramos[2], Paula Alberti Bonadiman[3], Luis Carlos Cirilo Carvalho[1], Samuel de Assis Silva[2].

[1]Universidade Estadual De Santa Cruz/Programa De Pós-Graduação Em Produção Vegetal, Rodovia Jorge Amado, Km 16, Bairro Salobrinho, CEP 45662-900 - Ilhéus-BA, Brasil, jheylibecerra1999@gmail.com, lcccarvalho@uesc.br.
[2]Universidade Federal do Espírito Santo/Centro de Ciências Agrárias e Engenharias/Departamento de Agronomia, CEP 29500-000 Alegre-ES, Brasil, sousa.beatriz.1002@gmail.com, joaogomesr12@gmail.com, samuel.assilva@gmail.com.
[3]Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, CEP 29052-010 Vitória-ES, Brasil, bonadimanpaula@gmail.com.

Resumo
Este estudo teve como objetivo caracterizar e comparar a distribuição espacial do Índice de Reflectância Fotoquímica Modificado (MPRI) em duas áreas de cacau a pleno sol, localizadas em diferentes condições altitudinais no município de Iconha, Espírito Santo. As imagens RGB foram obtidas por VANT DJI Matrice 350 RTK equipado com sensor Zenmuse L2, processadas no Agisoft Metashape para geração dos ortomosaicos e analisadas no QGIS. O MPRI foi calculado a partir dos canais verde e vermelho e reclassificado em cinco classes. A ferramenta r.report foi utilizada para determinar a área e o percentual correspondente a cada classe. A classe 4 predominou em ambas as áreas, representando 79,57% da Área 1 e 61,59% da Área 2, enquanto a classe 3 apresentou maior participação na Área 2. Os resultados evidenciaram diferenças na distribuição espacial do MPRI entre as lavouras, demonstrando o potencial do índice para caracterização espacial de áreas de cacau a pleno sol, sem atribuir as diferenças observadas exclusivamente às condições altitudinais.
Palavras-chave: Sensoriamento remoto. *Theobroma cacao* L. Imagens RGB. Índice de vegetação. Índice de Reflectância Fotoquímica Modificado.

Área do Conhecimento: Agronomia

Introdução

O cacau (*Theobroma cacao* L.) é uma cultura de grande importância econômica, cultivada principalmente em regiões tropicais e subtropicais (Kongor *et al*., 2024). No Brasil, a produção concentra-se principalmente na Bahia, Espírito Santo e região Amazônica, com forte participação da agricultura familiar (Gama-Rodrigues *et al*., 2021). No Espírito Santo, a cultura apresenta ampla distribuição territorial e relevante importância produtiva. Nesse contexto, Benjamin *et al*. (2025) observaram bom potencial produtivo de clones de cacau cultivados a pleno sol no estado, com respostas influenciadas por fatores ambientais como temperatura, disponibilidade hídrica e radiação (Lahive; Hadley; Daymond, 2019).

Além desses fatores, diferenças topográficas e altitudinais podem estar associadas a condições ambientais distintas e, consequentemente, a variações no desenvolvimento das plantas. Navarrete Espinoza *et al*. (2025), ao avaliarem o desenvolvimento inicial do cacaueiro em diferentes faixas altitudinais, observaram diferenças significativas em características morfológicas e na sobrevivência das plantas, indicando que condições relacionadas ao gradiente altitudinal podem interferir no comportamento da cultura. Nesse contexto, a caracterização de lavouras estabelecidas em diferentes condições ambientais pode contribuir para a compreensão de sua variabilidade e para o desenvolvimento de estratégias de monitoramento aplicadas à agricultura de precisão.

O sensoriamento remoto por veículos aéreos não tripulados (VANTs) possibilita a obtenção de imagens com elevada resolução espacial e tem ampliado as alternativas para o monitoramento da vegetação em escala de lavoura. A partir de imagens no espectro visível, os canais vermelho, verde e azul podem ser combinados matematicamente para geração de índices de vegetação capazes de

realçar diferenças na resposta da cobertura vegetal. Entre esses índices encontra-se o Índice de Reflectância Fotoquímica Modificado (MPRI), calculado pela relação normalizada entre os canais verde e vermelho, MPRI (G-R)/(G+R)). O índice tem sido empregado em análises agrícolas baseadas em imagens obtidas por sistemas aéreos remotamente pilotados, permitindo representar espacialmente diferenças na vegetação utilizando informações do espectro visível (Bento *et al*., 2022; Peticilă *et al*., 2025).

Diante da possibilidade de utilização de imagens RGB para caracterizar a variabilidade da cobertura vegetal, a análise espacial do MPRI pode fornecer informações complementares sobre o comportamento de lavouras de cacau conduzidas sob condições ambientais distintas. Assim, o objetivo deste trabalho foi caracterizar e comparar a distribuição espacial do MPRI em duas áreas de cacau a pleno sol situadas em diferentes condições altitudinais no município de Iconha, Espírito Santo, a partir de imagens RGB obtidas por VANT.

Metodologia

O estudo foi realizado em duas áreas de cultivo de cacau conduzidas a pleno sol, localizadas no município de Iconha, Espírito Santo. Os levantamentos aéreos foram realizados em 16 de julho de 2026, entre 11 h e 13 h, utilizando um DJI Matrice 350 RTK equipado com sensor Zenmuse L2, a uma altura de voo de 100 m. Para este estudo, foram utilizadas exclusivamente as imagens obtidas pela câmera RGB integrada ao equipamento. As principais características das áreas e dos levantamentos são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – caraterização das áreas de estudo.

Característica	**Área 1**	**Área 2**
Município	Iconha, ES	Iconha, ES
Sistema de cultivo	Cacau a pleno sol	Cacau a pleno sol
Altitude	516 m	372 m
Área analisada	0,743 ha	0,922 ha
Data de levantamento	16 de julho de 2026	16 de julho de 2026
Altura de voo	100 m	100 m

Fonte: elaborado pelo próprio autor

As imagens RGB obtidas durante os levantamentos foram processadas no software Agisoft Metashape, para geração dos ortomosaicos das áreas estudadas. Posteriormente, os ortomosaicos foram importados para o software QGIS, no qual foram delimitadas e recortadas as áreas de interesse correspondentes às lavouras de cacau a pleno sol. A partir dos canais vermelho (R) e verde (G) do ortomosaico, foi calculado o Índice de Reflectância Fotoquímica Modificado (MPRI), conforme a (Equação 1), índice baseado na relação normalizada entre os canais verde e vermelho e utilizado em análises de vegetação a partir de imagens RGB (Bento *et al*., 2022).

$$MPRI = \frac{G - R}{G + R} \qquad \text{Eq. (1)}$$

Após o cálculo do MPRI, os valores do raster foram agrupados em cinco classes previamente estabelecidas para padronizar a representação cartográfica e possibilitar a comparação entre as duas áreas. Os mesmos intervalos foram aplicados às duas áreas, e os mapas temáticos foram elaborados no ambiente QGIS. As classes representam exclusivamente intervalos dos valores de MPRI utilizados na análise espacial. Os intervalos adotados para cada classe são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Intervalos utilizados na reclassificação do MPRI.

Classe	Intervalo de MPRI
1	-1,00 a -0,50
2	-0,5 a -0,23
3	-0,23 a 0,03
4	0,03 a 0,3
5	0.3 a 1.0

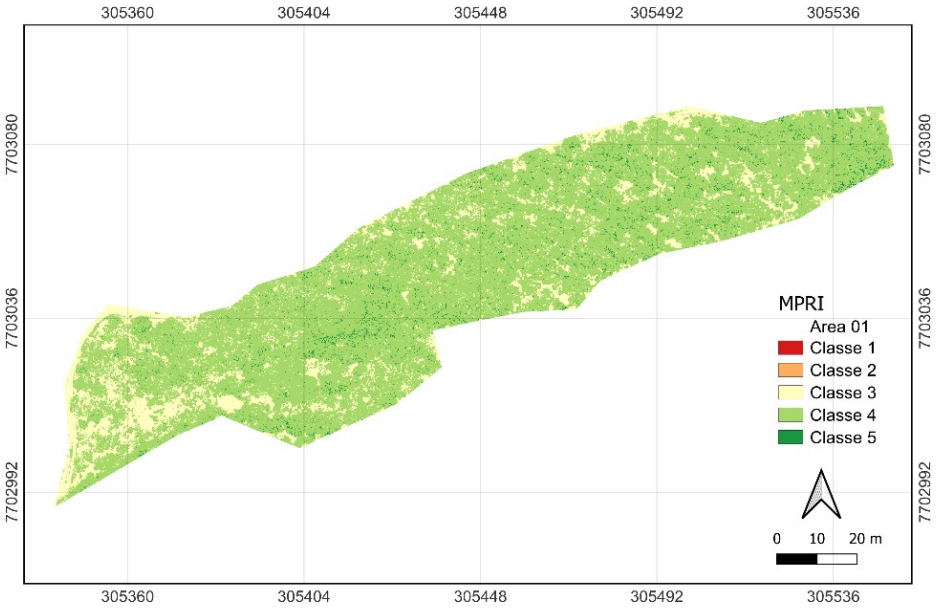
Fonte: elaborado pelo próprio autor

Posteriormente, a ferramenta r.report, do GRASS GIS no QGIS, foi utilizada para determinar a área e o percentual correspondente a cada classe. Os valores obtidos foram utilizados para comparar a distribuição das classes do MPRI entre as duas áreas.

Resultados

A distribuição espacial das classes de MPRI apresentou diferenças entre as duas áreas de cacau a pleno sol (Figuras 1 e 2). Em ambas as áreas se observou predominância da classe 4, distribuída ao longo de grande parte da superfície analisada.

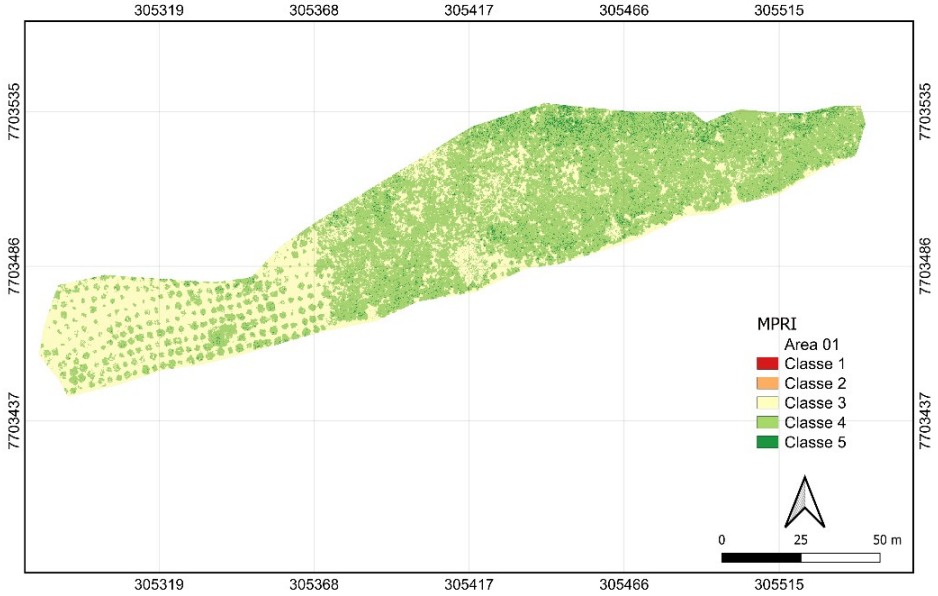
Figura 1 – Distribuição espacial das classes RMPI da área 1.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Área 1, situada a 516 m de altitude, essa classe apresentou distribuição mais contínua, enquanto a classe 3 ocorreu de forma descontínua em diferentes porções da lavoura. A classe 5 apresentou ocorrência pontual e dispersa, enquanto as classes 1 e 2 foram pouco representativas espacialmente.

Figura 2 – Distribuição espacial das classes RMPI da área 1.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Área 2, situada a 372 m de altitude, também houve predominância da classe 4; entretanto, observou-se maior presença espacial da classe 3, especialmente em setores da porção inicial da área e em manchas distribuídas ao longo da lavoura. A classe 5 ocorreu de maneira esparsa, enquanto as classes 1 e 2 apresentaram baixa expressão espacial. Dessa forma, os mapas evidenciam que, embora a classe 4 tenha sido predominante nas duas áreas, a distribuição das classes de MPRI não ocorreu de maneira homogênea entre as lavouras.

Tabela 3 - Área e distribuição percentual das classes de MPRI nas duas áreas.

Classe	Área 1 (ha)	Área 1 (%)	Área 2 (ha)	Área 2 (%)
1	<0,0001	<0,01	<0,0001	<0,01
2	0,0001	0,01	0,0006	0,06
3	0,1311	17,64	0,3203	34,75
4	0,5914	79,57	0,5678	61,59
5	0,0206	2,78	0,0331	3,59
Total	**0,7432**	**100,00**	**0,9218**	**100,00**

Fonte: elaborado pelo próprio autor

A quantificação das áreas ocupadas por cada classe de MPRI confirmou os padrões observados nos mapas temáticos. A classe 4 apresentou a maior participação nas duas áreas, correspondendo a 79,57% da Área 1 e 61,59% da Área 2. A classe 3 apresentou comportamento distinto entre as áreas, ocupando 17,64% da Área 1 e 34,75% da Área 2, representando a principal diferença proporcional observada entre as lavouras. %. A classe 5 apresentou proporções semelhantes entre as áreas, com 2,78% na Área 1 e 3,59% na Área 2, enquanto as classes 1 e 2 apresentaram participação inferior a 0,1% em ambas as áreas.

Discussão

A predominância da classe 4 em ambas as áreas, associada à maior participação da classe 3 na Área 2, evidencia diferenças na distribuição espacial do MPRI entre as lavouras. Como o índice é calculado pela relação normalizada entre os canais verde e vermelho, essas diferenças refletem variações na contribuição relativa desses canais nas imagens analisadas. Barbosa *et al*. (2021), avaliando uma lavoura cafeeira com imagens RGB obtidas por VANT, também verificaram que mapas de MPRI permitiram identificar variabilidade espacial na cultura. Entretanto, o índice deve ser interpretado com cautela, pois sua utilização isolada não permite associar diretamente as classes a

níveis de vigor, estado nutricional ou produtividade. Barbosa *et al*. (2021) observaram relação fraca entre MPRI e índice de área foliar, enquanto Bento *et al*. (2022) não encontraram associação significativa entre os índices avaliados e atributos químicos foliares.

No cacaueiro cultivado a pleno sol, a resposta das plantas pode estar associada à interação entre características da própria lavoura e condições ambientais. Benjamin *et al*. (2025), avaliando clones de cacau sob cultivo a pleno sol, observaram diferenças fisiológicas entre os materiais estudados e destacaram a importância da disponibilidade de água, nutrientes e arquitetura das plantas para sua adaptação às condições de elevada irradiância. Lahive, Hadley e Daymond (2019) também ressaltam que o comportamento fisiológico do cacaueiro é influenciado conjuntamente por fatores como radiação, temperatura, disponibilidade hídrica e variabilidade genética. Nesse sentido, embora as áreas avaliadas no presente estudo estejam localizadas em diferentes condições altitudinais, os padrões observados no MPRI não podem ser atribuídos exclusivamente à altitude, uma vez que diferenças de manejo, solo, genótipo e condições da cobertura vegetal também podem contribuir para a variabilidade registrada entre as lavouras.

Conclusão

O MPRI permitiu caracterizar e comparar a variabilidade espacial das duas áreas de cacau a pleno sol, evidenciando diferenças na distribuição das classes do índice. A classe 4 predominou em ambas as áreas, enquanto a Área 2 apresentou maior participação da classe 3. Os resultados demonstram o potencial do MPRI, obtido a partir de imagens RGB, para representar padrões espaciais em lavouras de cacau. Entretanto, as diferenças observadas não podem ser atribuídas exclusivamente às condições altitudinais, uma vez que outros fatores relacionados às características das lavouras podem influenciar a resposta espectral.

Referências

BARBOSA, B. D. S.; FERRAZ, G. A. S.; SANTOS, L. M.; SANTANA, L. S.; 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. DOI: 10.3390/rs13122397. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/13/12/2397.

BENJAMIN, C. S. *et al*. Unlocking the potential of cacao yield with full sun cultivation. Scientific Reports, v. 15, 4368, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-87793-z. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-025-87793-z.

BENTO, N. L. *et al*. Evaluation of coffee plant attributes by field collection and remotely piloted aircraft system images. Spanish Journal of Agricultural Research, v. 20, n. 3, e0205, 2022. DOI:10.5424/sjar/2022203-18808. Disponível em: https://sjar.revistas.csic.es/index.php/sjar/article/view/18808/6014.

GAMA-RODRIGUES, A. C.; MÜLLER, M. W.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; MENDES, F. A. T. Cacao-based agroforestry systems in the Atlantic Forest and Amazon Biomes: an ecoregional analysis of land use. Agricultural Systems, v. 194, art. 103270, 2021. DOI: 10.1016/j.agsy.2021.103270. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308521X21002237.

KONGOR, J. E.; OWUSU, M.; ODURO-YEBOAH, C. Cocoa production in the 2020s: challenges and solutions. CABI Agriculture and Bioscience, v. 5, art. 102, 2024. DOI: 10.1186/s43170-024-00310-6. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1186/s43170-024-00310-6.

LAHIVE, F.; HADLEY, P.; DAYMOND, A. J. The physiological responses of cacao to the environment and the implications for climate change resilience: a review. Agronomy for Sustainable Development, v. 39, art. 5, 2019. DOI: 10.1007/s13593-018-0552-0. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-018-0552-0.

NAVARRETE ESPINOZA, E.; PEÑA, G.; MILLA ARANEDA, F.; NÚÑEZ ARIAS, J. A. Efecto de la gradiente altitudinal sobre el desarrollo inicial de cacao (Theobroma cacao L.) en la cordillera central de República Dominicana. Revista Bio Ciencias, v. 12, e1682, 2025. DOI: 10.15741/revbio.12.e1682. Disponível em: https://revistabiociencias.uan.edu.mx/index.php/BIOCIENCIAS/article/view/1682.

PETICILĂ, A.; ILIESCU, P. G.; DINCA, L.; POPA, A.-S.; MURARIU, G. Vegetation indices from UAV imagery: emerging tools for precision agriculture and forest management. AgriEngineering, v. 7, n. 12, art. 431, 2025. DOI: 10.3390/agriengineering7120431. Disponível em: https://www.mdpi.com/2624-7402/7/12/431.