

SENSORIAMENTO HIPERESPECTRAL APLICADO À ESTIMATIVA DE CLOROFILA NA CAFEICULTURA

Ygor Inácio Dias Rosa¹, Maria Cecília Lemes Santos¹, Marcos Paulo da Silva Cruz¹,
Lincon Rodrigues Silva¹, Maria Clara Silva Saltori¹

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, MG (ygor_inacio@ufu.br)

RESUMO: A quantificação da clorofila é uma variável-chave no monitoramento da saúde vegetal e no manejo de culturas agrícolas como a *Coffea arabica* L. Este estudo avaliou o potencial de índices hiperespectrais na estimativa indireta da concentração de clorofila em lavoura cafeeira sob diferentes condições de incidência solar. Foram coletadas 30 amostras espectrais com espectrorradiômetro portátil, em condições de alta e baixa luminosidade, e aplicadas análises estatísticas, incluindo correlação, regressão linear e redes neurais do tipo Multilayer Perceptron, com validação cruzada. Os índices avaliados foram NDVI, GLI, CVI e WBI. Os resultados indicaram que a variação na incidência solar não impactou significativamente a acurácia das estimativas, permitindo unificação dos dados. A combinação dos índices CVI e WBI apresentou o melhor desempenho (R^2 ajustado = 9,6%), embora com poder explicativo limitado. A pesquisa destaca que o uso combinado de índices espectrais pode melhorar a robustez da modelagem, sendo promissor para aplicações na agricultura de precisão.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Monitoramento Remoto; Cafeicultura.

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura é uma das atividades agrícolas de maior relevância socioeconômica no Brasil (Conab, 2025), sendo responsável por uma expressiva parcela das exportações do agronegócio e pela geração de milhares de empregos diretos e indiretos (Cecafé, 2025). Diante da crescente demanda por práticas sustentáveis e da necessidade de aumento da produtividade, a adoção de tecnologias de monitoramento e análise das lavouras tornou-se fundamental para a modernização do setor. Nesse contexto, o sensoriamento remoto, especialmente na sua vertente hiperespectral, tem se destacado como uma ferramenta promissora para a agricultura de precisão, por permitir a coleta detalhada de informações biofísicas das plantas sem a necessidade de contato direto.

A estimativa de variáveis fisiológicas, como o teor de clorofila, é essencial para

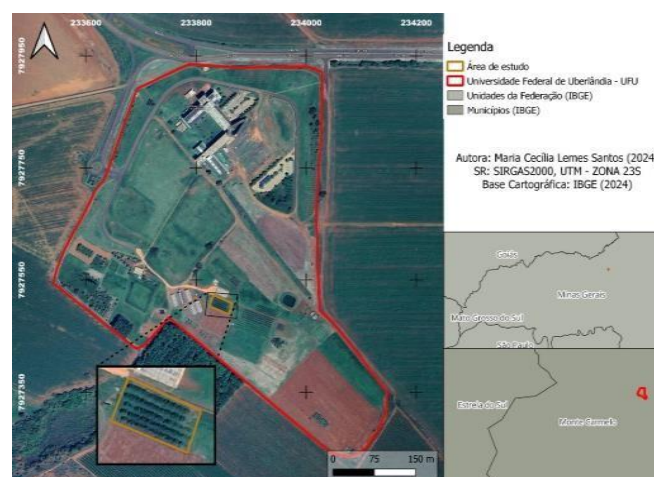
avaliar o estado nutricional e o vigor das culturas, auxiliando na tomada de decisões quanto ao manejo agrícola (EOS Data, 2025). O uso de espectrorradiômetros de baixo custo, associado à análise de índices vegetativos, representa uma alternativa viável e acessível para pequenos e médios produtores, ampliando o acesso a tecnologias de diagnóstico remoto, já que os IV's permitem uma caracterização mais precisa e abrangente da vegetação (Thenkabail et al., 1999).

Este estudo tem como objetivo avaliar o potencial de diferentes índices hiperespectrais na estimativa indireta da concentração de clorofila em plantas de *Coffea arabica* L. dá cultivar *Topázio MG 1190*, sob diferentes condições de incidência solar, através de coletas de dados espectrais *in loco*, utilizando espectrorradiômetro portátil. Os resultados obtidos contribuem para o avanço do uso de ferramentas hiperespectrais no monitoramento de lavouras cafeeiras e oferecem subsídios para o desenvolvimento de metodologias mais robustas e acessíveis no contexto da agricultura de precisão.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho teve como foco a cultura do café, utilizando como objeto central o talhão da cultivar *Coffea arabica* L. Topázio MG-1190 localizado no Campus Araras da Universidade Federal de Uberlândia (Monte Carmelo - MG). O talhão possui 185 plantas dispostas em 5 linhas. (Figura 1).

Figura 1. Área de estudo.



Fonte: Autor

Dessa forma, a coleta de dados foi realizada em 27 de junho de 2025, entre 11:50h e 13:00h, por meio de leituras de reflectância em 30 amostras foliares, sendo 15 sob maior e 15 sob menor incidência solar. As amostras foram obtidas em seis parcelas por linha, com uma

leitura pontual por parcela, a 2 cm de distância do alvo. As medições foram realizadas com um *Green Wave Spectrometer* (350-1150nm), software *Stellapro V2.2.2* e um SPAD-502 Plus, utilizando placa de Spectralon como padrão de referência. A reflectância foi calculada no software *Spectroscopo Pro-Tools 1.2*, pela razão entre a radiação refletida pela amostra e pelo Spectralon, considerando a faixa espectral de 480 a 1050 nm. As análises estatísticas foram conduzidas no software Weka 3.8.6, por meio de rede neural do tipo Multilayer Perceptron (MLP) com validação cruzada 10-Folds, gerando matrizes de confusão e valores de p. Os dados de reflectância foram exportados para .csv e utilizados no cálculo de índices hiperespectrais: NDVI, GLI, CVI e WBI, com ênfase na avaliação da concentração de clorofila e conteúdo relativo de água nas folhas. Para calcular os índices foram utilizadas as fórmulas:

Tabela 1. Índices utilizados.

IV'S	Fórmulas
NDVI	$(735 - 650) / (735 + 650)$
GLI	$(2*550-660-470) / (2*550+660+470)$
CVI	$(800*660) / (550)^2$
WBI	$900 / 970$

Fonte: Autor

Os dados foram analisados no software Minitab 16, por meio de correlação e regressão linear, visando estimar os teores de clorofila com base em diferentes combinações de índices vegetativos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

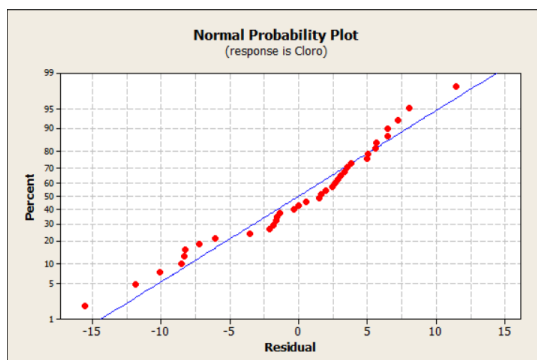
A variação na incidência de radiação solar (alta e baixa) não impactou significativamente a estimativa de clorofila, como modelos apresentando acurácia entre 67% e 70% e coeficiente Kappa entre 0,45 e 0,50, indicando concordância moderada. Diante da consistência dos dados, as amostras foram unificadas em uma base única para fortalecer a robustez estatística. As correlações entre os índices vegetativos e os teores de clorofila foram, em sua maioria, fracas e não significativas, exceto para o CVI ($r = 0,326$; $P \approx 0,05$), que indicou relação marginal, e GLI, com P-value relativamente baixo (0,213). Os modelos mais promissões incluíram os índices CVI, WBI e GLI, que apresentaram melhor desempenho na estimativa da clorofila, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados da estimativa de clorofila.

Clorofila Prevista	Clorofila Estimada		
	CVI; WBI GLI	CVI; WBI	CVI
57,9	56,7368	56,7137	57,1894

O primeiro modelo analisado foi combinando todos os índices. Este apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 14,9%, com R^2 ajustado de 6,9% e erro padrão da estimativa (S) de 6,45531, evidenciando uma capacidade limitada de explicação da variabilidade dos dados.

Gráfico 1 – Análise de Regressão: Clorofila vs. CVI; WBI; GLI.



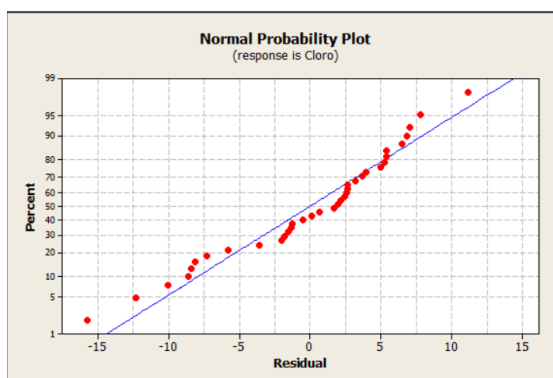
Fonte: Autor

A equação ajustada para este modelo foi:

$$\text{Clorofila} = 25,3 + 3,24 \text{ CVI} + 23,4 \text{ WBI} + 1,50 \text{ GLI}$$

No Gráfico 2, a análise combinada de CVI e WBI apresentou o melhor desempenho, com R^2 ajustado de 9,6% e menor erro padrão (S) de 6,36, indicando que a utilização conjunta dos índices é mais eficiente do que a análise isolada. O índice GLI mostrou contribuição marginal, possivelmente devido à colinearidade com os demais preditores.

Gráfico 2 – Análise de Regressão: Clorofila vs. CVI; WBI.



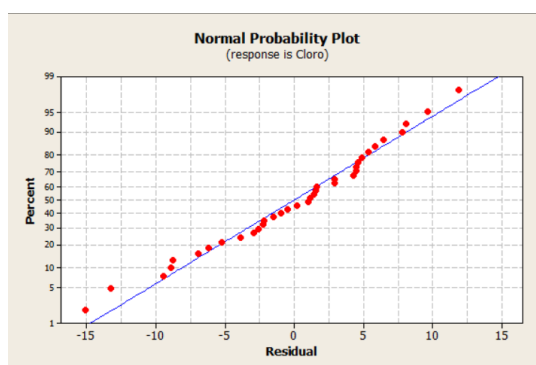
Fonte: Autor.

A equação ajustada para este modelo foi:

$$\text{Clorofila} = 28,0 + 3,06 \text{ CVI} + 21,4 \text{ WBI}$$

Essa hipótese é reforçada quando observamos que, no Gráfico 3, ao utilizar apenas o índice CVI, houve uma redução perceptível no poder explicativo do modelo (R^2 ajustado = 8,0%), mas o erro padrão manteve-se em patamar semelhante ($S = 6,41751$). Essa estabilidade nos erros sugere que os índices compartilham informações espectrais correlatas, o que pode indicar correlação entre variáveis independentes, comprometendo a eficiência do modelo preditivo em termos de ganho informacional com a adição de novos índices.

Gráfico 3 – Análise de Regressão: Clorofila vs. CVI.



Fonte: Autor

A equação ajustada para este modelo foi:

$$\text{Clorofila} = 49,1 + 3,04 \text{ CVI}$$

A análise de colinearidade entre os preditores revelou correlações moderadas entre CVI e WBI, o que pode justificar a sobreposição parcial de variância explicada. Embora o modelo com três variáveis ofereça uma estimativa ligeiramente mais próxima dos valores observados, a análise de resíduos e os baixos valores de R^2 indicam que fatores adicionais não incluídos no modelo — como características biofísicas das folhas, variações genéticas ou ambientais — influenciam significativamente a variabilidade da clorofila.

Portanto, embora os modelos apresentem limitações preditivas, os resultados sugerem que o uso combinado de índices espectrais melhora o ajuste da regressão em comparação ao uso isolado. Para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação do número de amostras e a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina com controle de colinearidade, como regressão por componentes principais (PCR) ou regularização via LASSO, visando aprimorar a acurácia na estimativa da clorofila foliar.

4 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que as condições de iluminação (sombra e sol) não impactaram significativamente a qualidade dos dados espectrais, permitindo a junção das amostras em um único grupo de dados para análise estatística.

A análise dos índices hiperespectrais mostrou que a utilização combinada dos índices CVI e WBI, proporciona um desempenho superior em relação ao uso isolado, ainda que o poder preditivo dos modelos se mantenha limitado ($R^2 < 10\%$). Foi observado colinearidade entre alguns dos índices utilizados, o que pode ter restringido a capacidade explicativa das regressões aplicadas.

Apesar dessa limitação, pode-se afirmar que a combinação de índices representa uma boa estratégia mais robusta para a estimativa indireta de clorofila foliar em cultivos de café.

REFERÊNCIAS

CECAFÉ. **Relatório mensal de exportações**, 2025. Disponível em: <https://www.cecafe.com.br/publicacoes/relatorio-de-exportacoes/>. Acesso em: 04 jul. 2025.

Conab - **Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cafe/2o-levantamento-de-cafe-safra-2025/boletim-cafe-maio-2025> >. Acesso em: 04 jul. 2025.

EOS Data Analytics. **Índice De Clorofila Na Agricultura**. 2025. Disponível em: [https://eos.com/pt/make-an-analysis/chlorophyll-index/#:~:text=O%20%C3%ADndice%20de%20clorofila%20\(CI,para%20a%20maioria%20das%20plantas](https://eos.com/pt/make-an-analysis/chlorophyll-index/#:~:text=O%20%C3%ADndice%20de%20clorofila%20(CI,para%20a%20maioria%20das%20plantas). Acesso em: 04 jul. 2025.

Thenkabail, P. S., Smith, R. B., Pauw, E. D. **Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics**. Yale University, Center for Earth Observation, ELSEVIER, p.158- 182,1999.

PLANET SCOPE. **O que é o NDVI?** São Paulo, 2023. Portal: SCON GEOSPATIAL. Disponível em: <https://www.scon.com.br/o-que-e-ndvi/>. Acesso em: 30 de jun. de 2025.