CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE FOLHAS DE GOIABEIRA (*PSIDIUM GUAJAVA* L.) EM DIFERENTES ESTÁGIOS DE SENESCÊNCIA

Fernanda Silva Clementino [1], Felipe Gomes Petrone [1], Yan Breno Azeredo Gomes da Silva [1], Yosio Edemir Shimabukuro [1], Matheus Pinheiro Ferreira[2]

[1] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Divisão de Observação da Terra e Geoinformática, São José dos Campos, Brasil. fernanda.clementino@inpe.br; felipe.petrone@inpe.br; yan.silva@inpe.br; yosio.shimabukuro@inpe.br. [2] Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz' (ESALQ), Departamento de Ciências Florestal, Piracicaba, Brasil. mpferreira@usp.br.

RESUMO

A análise espectral da vegetação permite obter de diversas informações sobre seu estado fenológico, através da variação de reflectância. O uso de técnicas de análise espectral, como a profundidade de bandas de absorção em regiões específicas do espectro —incluindo as bandas de absorção de clorofila, água na folha, celulose e lignina— possibilita quantificar a presença de materiais absorvedores nas amostras analisadas e relacioná-los com a sua condição fenológica. O presente estudo utilizou de espectros de reflectância de folhas de goiabeira (*Psidium Guajava* L.) em diferentes estágios fenológicos, coletados em laboratório, visando analisar as diferenças espectrais de folhas de goiabeira em diferentes estados de saúde e examinar a variação espectral nas bandas de absorção nestas diferentes condições.

***Palavras-chave* —** Comportamento Espectral, Banda de Absorção, Radiometria.

ABSTRACT

Spectral analysis of vegetation makes it possible to obtain a variety of information about its phenological state through the variation in reflectance. The use of spectral analysis techniques, such as the depth of absorption bands in specific regions of the spectrum - including the absorption bands of chlorophyll, water in the leaf, cellulose and lignin - makes it possible to quantify the presence of absorbing materials in the analyzed samples and relate them to their phenological condition. This study used reflectance spectra of guava leaves (Psidium Guajava L.) at different phenological stages, collected in the laboratory, to analyze the spectra difference of guajava leaves in different states of health and to examine the spectral variation in the absorption bands in these different conditions.

***Keywords* -** *Spectral Behavior, Absorption Bands, Radiometry.*

1. INTRODUÇÃO

A radiometria pode ser compreendida como a técnica para quantificar a medida da radiação eletromagnética [1]. Essa técnica é altamente benéfica para o campo do sensoriamento remoto e estudos ambientais, devido a sua capacidade de avaliar a interação da radiação eletromagnética (REM), com os mais diversos alvos da superfície terrestre. A análise espectral da vegetação nos permite, através da variação da reflectância nos diferentes comprimentos de onda, obter informações sobre a condição bioquímica das espécies analisada e assim avaliar a condição de saúde desta vegetação [2].

A Goiabeira (*Psidium Guajava* L.), é uma espécie nativa brasileira, que possui relevância econômica e ambiental. Em áreas de floresta nativa, é considerada uma espécie-chave para o fornecimento de alimentos para a fauna local, devido aos seus frutos e pela facilidade de ocupação de terrenos abertos, através da dispersão de suas sementes pela fauna [3]. Do ponto de vista econômico, a produção nacional de Goiaba, foi responsável por uma movimentação de R$1.300.000,00 no ano de 2023, com uma área de aproximadamente 22 mil hectares voltados para a produção desta cultura em todo o território brasileiro [4].

Considerando a importância desta espécie, o uso de tecnicas que permitem estabelecer uma relação clara entre o estado fisiológico da vegetação e seu aspecto em campo de forma rápida é fundamental, sendo a análise espectral uma ferramenta promissora para esta finalidade. Visto que fatores como deficiência nutricional, sanidade do tecido vegetal, idade e doenças podem interferir nas propriedades espectrais da folha [5].

Neste contexto, o presente trabalho buscou analisar as diferenças quantitativas de reflectância nas bandas de absorção de Clorofila, Água na Folha, Celulose e Lignina de folhas de Goiabeira, em diferentes condições de saúde a fim de estabeler uma relação clara entre a reflectância e estado fisiologico da espécie. Os espectros analisados auxiliam na criação de uma biblioteca espectral da espécie, a qual pode servir como referência em estudos voltados para o monitoramento da goiabeira em ambientes naturais e agrícolas.

2. METODOLOGIA

2.1. Espécie Analisada

A escolha da espécie *Psidium guajava* L. para este estudo, conhecida popularmente como Goiabeira, se deu pela sua ampla utilização e pela sua grande relevância ambiental e econômica, ocorrendo espontaneamente em quase todo o território Brasileiro. Nativa da Floresta Pluvial Atlântica, a Goiabeira é cultivada devido aos seus frutos, que podem ser consumidos *in-natura*, assim como em sucos ou doces. É uma espécie de pequeno porte (3 a 6 metros) e ocupa principalmente áreas abertas e de solo úmido [3].

Para a avaliação espectral, foram utilizadas as folhas da goiabeira em diferentes estágios fenológicos, conforme demonstrado na Figura 1, e a resposta espectral de diferentes combinações de sobreposições de folhas de estágios diferentes também foram avaliadas.

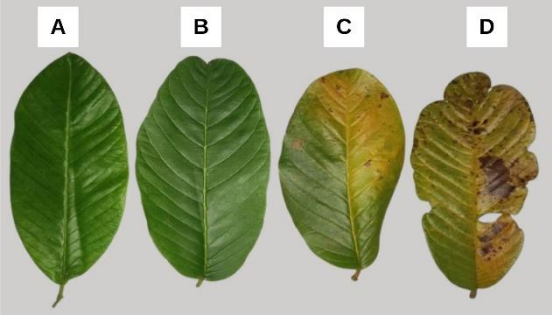

Figura 1. Folhas de Goiabeira (*Psidium guajava* L.) em diferentes estágios de senescência.
(A) Folha nova, (B) Folha madura, (C) Folha em estágio intermediário de senescência e (D) Folha em estágio avançado de senescência.

2.2. Coleta e Pré-Processamento dos Dados

A coleta de dados foi feita através do sensor FieldSpec Pro-FR, que é capaz de coletar diferentes tipos de métricas entre os comprimentos de onda de 350 a 2.500 nm. Por possibilitar ajustes em caso de erros na medição, a métrica escolhida foi a radiância, que foi transformada para reflectância através do uso das (equações I e II). Neste sensor, cada medição de radiância equivale a média de 10 valores amostrados, possibilitando uma menor influência de ruídos.

$$K_\lambda = L_{\lambda,p}/L_{\lambda,r} \quad \text{(I)}$$

$$FR = L_{\lambda,s}/(K_\lambda \cdot L_{\lambda,r}) \quad \text{(II)}$$

Onde K = Fator de calibração da placa, L = Radiância espectral da placa, p = Placa padrão, r = Placa de referência, a = alvo, FR = Fator de reflectância e λ = comprimento de onda.

As medições foram coletadas em laboratório com revestimento de material altamente absorvedor, específico para não interferir em amostragens radiométricas, onde o posicionamento da coleta para todas as amostragens foi na vertical a *nadir*. Além disso, antes de iniciar o experimento foi feita a calibração do sensor utilizando a placa padrão (reflectância de 100%) e de referência (reflectância próxima ao 100%), com ângulo de 25° e 80,5 cm de distância da iluminação (lâmpada alógena) e 10 cm de altura do sensor. Esse procedimento garante que as medidas estejam corretas.

Em seguida foram realizadas 3 medidas por amostra, totalizando 30 valores para cada um das amostras de folhas aqui estudados. Através dessas medidas foram, então, calculadas as médias e a partir disso o comportamento espectral das folhas pôde ser analisado graficamente. Importante ressaltar que características intrínsecas do sensor causam um aumento da relação sinal/ruído nas extremidades do comprimento de onda percebido pelo sensor, e por isso, foram excluídos da análise essas regiões espectrais.

2.3 Análise Espectral

Para a realização da análise espectral, primeiro foi aplicado um filtro Savitzky-Golay, com uma janela de 21 pontos, utilizando a função *savgol_filter* disponível no pacote *Scipy* em linguagem de programação Python [6], em todos os espectros analisados, para diminuir o efeito de ruídos nos espectros. Após a filtragem, foi feita a remoção do contínuo localmente utlizando a função *remove_continuum*, que interpola uma linha reta entre os extremos da faixa espectral, para ajustar o valor do contínuo, para então dividir os valores de reflectância da banda pelos valores do contínuo resultando em um espectro normalizado. Este processo foi aplicado nas regiões do espectro que correspondem as bandas de absorção, conforme exemplificado na Tabela 1. Seguido pela a remoção do contínuo, utlizando a função *calculate_absorption_band_depth*, utilizando a equação (III).

Tabela 1. Bandas de absorção e seus comprimentos de onda correspondentes.

Banda de Absorção	Comprimento de Onda
Clorofila	516 – 756 nm
Água na Folha 1	900 – 1025 nm
Água na Folha 2	1103 – 1279 nm
Celulose e Lignina	2033 – 2208 nm

$$D = 1 - R_{min} \quad \text{(III)}$$

Onde: D = profundidade da banda de absorção; Rmin = Valor mínimo de reflectância da banda.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De maneira geral, a resposta espectral de uma folha pode ser compreendida ao analisar três grandes fatores controladores da reflectância: os pigmentos, a estrutura celular e seu conteúdo de água [2]. Na primeira região, correspondente ao espectro visível, engloba a faixa de 400 a 700 nm, a reflectância é controlada pelos pigmentos

presentes nas folhas (clorofilas, xantofilas e carotenos), determinando a forma da curva nessa faixa espectral [7].

Na segunda região, onde a estrutura celular da planta domina, ocorrem os valores máximos de reflectância da vegetação. Essa região abrange o infravermelho próximo (700 a 1300 nm) e mostra pouca absorção de radiação, mantendo uma reflectância constante. Normalmente, essa reflectância constante varia entre 30% e 40%, podendo ser maior ou menor, dependendo do estado interno da estrutura celular da folha.

A terceira região é formada pelos comprimentos de onda do infravermelho de ondas curtas (1.300 a 3.200 nm) onde o conteúdo de água na folha dita a reflectância. A partir dos dados desta região é possível aferir informações sobre a condição hídrica da vegetação, onde quanto maior o teor de água na folha, menor será a sua reflectância nesta região do espectro. Portanto as análises e discussões a seguir foram realizadas com base nesta revisão, considerando as particularidades de cada amostra coletada.

3.1 Análise Espectral das Folhas

Nas aferições realizadas em laboratório, procurou-se analisar as assinaturas espectrais em diferentes estágios fenológicos e como o comportamento espectral varia em resposta a distintas configurações de sobreposição foliar. A figura 2 apresenta os espectros de reflectância coletados em laboratório demonstrando o comportamento espectral em diferentes estágios fenológicos de folhas de goiabeira, permitindo observar as curvas espectrais desde o estágio de folha fotossinteticamente ativa até seu estágio senescente.

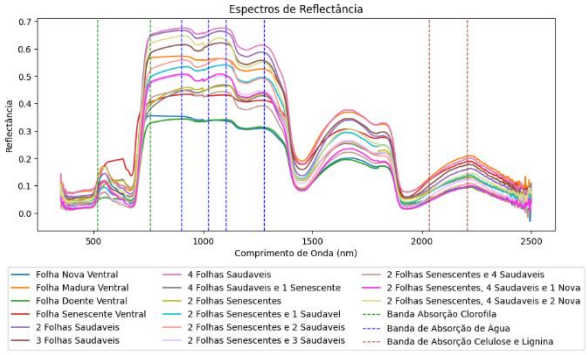

Figura 2. Espectro de reflectância de distintos estágios fenológicos da folha de goiabeira (*Psidium guajava* L.).

Todas as amostras analisadas apresentam comportamento espectral semelhante, no entanto há variações na intensidade da reflectância e na forma da curva, principalmente nas regiões onda a reflectância é influenciada pelos componentes bioquímicos. Na banda de Absorção da clorofila (516 – 756 nm, Figura 3, imagem A), a amostra de folha senescente apresentou a curva mais distinta e rasa comparada com as demais amostras, seguida pelas amostras de 4 folhas saudáveis e 1 senescente, 2 folhas senescentes e 1 folha doente. As bandas de absorção de água (Figura 3, imagem B e C) tiveram o comportamento semelhantes nas amostras, com as menores curvas das amostras de folha doente e folha nova. Este comportamento pode se dar davido à estrutura celular das folhas, no caso da folha nova, não há o desenvolvimento completo e na folha doente, há a deterioração devido a ação da doença [8] e [9].

As curvas da banda de absorção de celulose e lignina (Figura 3, imagem D), apresentaram um comportamento bastante ruidoso e uma baixa amplitude de valores, o que foi refletido no cálculo da produndidade da banda de absorção.

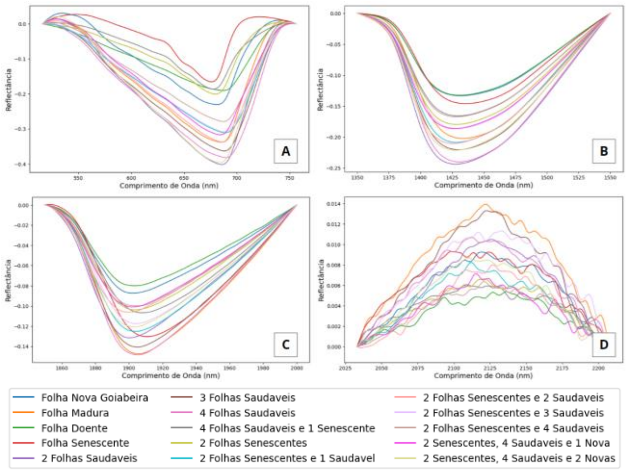

Figura 3. Bandas de Absorção dos Espectros de Reflectância, (A) Clorofila, (B) Água na Folha 1, (C) Água na Folha 2 e (D) Celulose e Lignina.

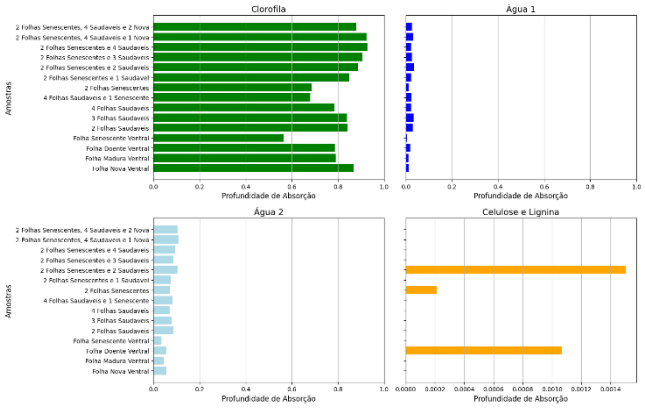

Figura 4. Comparação de Profundidade das Bandas de Absorção.

Ao analisar os gráficos de profundidade da bandas de absorção, é possível perceber que a clorofila é o componente foliar que apresenta a absorção mais intensa no espectro, com todas as amostras apresentando valores de profundidade acima de 0,5. Com o aumento no número de camadas de folhas, ou seja, aumento do índice de área foliar (IAF), a profundidade da banda se intensifica, sendo o comportamento esperado devido ao retroespalhamento da REM, que gera uma maior interação da radiação com os pigmentos

fotossintetizantes das demais camadas de folhas, resultando na intensificação da absorção da radiação [10]. Apesar deste comportamento ser observado, não ocorre uma grande variação entre as amostras.

As bandas de absorção de água tiveram uma profundidade inferior quando comparada com a clorofila (Figura 4), no entanto, houve uma maior variação na resposta entre as amostras, conforme demostrado nas figuras 5 e 6. O efeito do aumento das camadas de folhas na intensificação da banda de absorção também ocorreu nas bandas de absorção de agua, mehor observado na banda de absorção de água 2 (1103–1279 nm). Nesta banda de absorção, também é possivel observar a diminuição da reflectância das folhas senescentes.

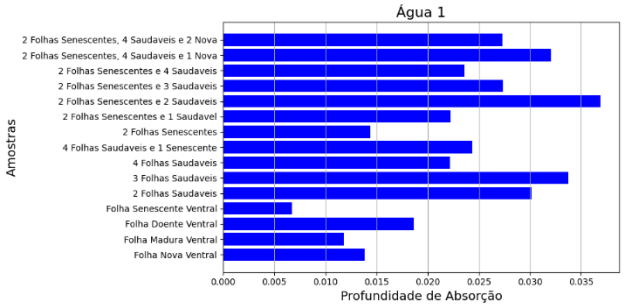

Figura 5. Comparação de Profundidade das Bandas de Absorção de Água 1.

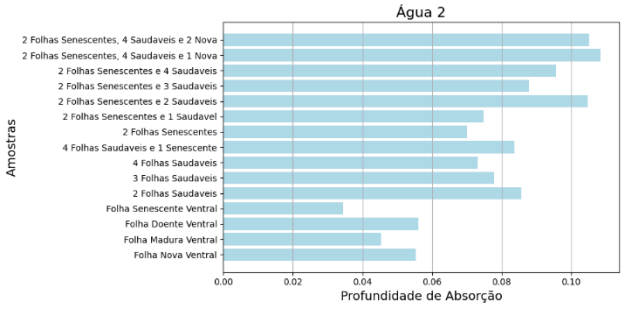

Figura 6. Comparação de Profundidade das Bandas de Absorção de Água 2.

A banda de absorção de celulose e lignina (2033–2208 nm), é localizada em uma região do espectro que apresenta uma alta relação sinal/ruído, além de baixos valores de reflectância. Ao remover o efeito do contínuo, ocorreu uma intensa diminuição nos valores de reflectância, resultando em baixos valores de profundidade da banda de absorção, entre (0,00 e 0,0014), não possibilitando a análise entre as amostras, visto que apenas as amostras de folha doente, 2 folhas senescentes, 2 folhas senescentes e 2 folhas saudáveis, apresentaram valores de profundidade.

5. CONCLUSÕES

A análise das bandas de absorção oferece diversas informações sobre a quantidade dos componentes bioquímicos e estruturais absorvedores presente nas amostras. A banda de absorção da clorofila apresentou os maiores valores de profundidade, demonstrando que esta é uma boa região para diagnosticar a fenologia da goiabeira. A análise das bandas de absorção de água nos permitiu diferenciar de forma mais clara as variações fenológicas entre as amostras, e por fim, a banda de absorção de celulose e lignina, devido à alta relação sinal ruído na região do infravermelho de ondas curtas do espectro, não nos forneceu informações úteis para analisar a fenologia das amostras. Portanto, ao realizar diagnósticos sobre o estado fenológico da vegetação por meio da radiometria, é fundamental considerar o espectro completo para obter uma avaliação precisa.

5. REFERÊNCIAS

[1] Lorenzzetti, J. A. (2015). Princípios Físicos de Sensoriamento Remoto. 5° ed. São Paulo: Blucher. 294p.
[2] Ponzoni, J. A., Shimabukuro, Y. E., Kuplich T. M. (2012). Sensoriamento Remoto da Vegetação. 2º ed. São Paulo: Oficina de Textos. 196p.
[3] Lorenzi, Harri. Árvores Brasileiras. 7. ed. [S. l.]: Instituto Plantarum, 2016. 384 p. v. 1. ISBN 978-85-86714-49-8.
[4] Produção de Goiaba. *In*: IBGE (Rio de Janeiro). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção**
[5] Guan, J., Nutter JR., F.W. (2002). Relationships between defoliation, leaf area index, canopy reflectance, and forage yield in the alfalfa-leaf spot pathosystem. Computers end Electronics in Agriculture. v. 37.
[6] GOMMERS, Ralf et al. scipy/scipy: SciPy 1.14. 0. **Zenodo**, 2024.
[7] DE MORAES NOVO, Evlyn ML. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. Editora Blucher, 2010.
[8] Naue, C.R., Marques, M.W., Lima, N.B., Galvincio, J.D. (2011). Sensoriamento remoto como ferramenta aos estudos de doenças de plantas agrícolas: uma revisão. Revista Brasileira de Geografia Física 3(3):190. DOI:10.26848/rbgf.v3i3.232675.
[9] West, J.S., Bravo, C., Oberti, R., Lemaire, D., Moshou, D., Mccartney, H.A. (2003). The potential of optical canopy measurements for targeted control of field crop diseases. Annual Review Phytopathology. v.41.
[10] Ollinger, S.V. (2011), Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. New Phytologist, 189: 375-394. doi:10.1111/j.1469-8137.2010.03536.x.