

FATOR DE REFLECTÂNCIA DE DIFERENTES FOLHAS DE VEGETAÇÃO DE AMENDOEIRA DA PRAIA (*T. catappa sp*)

Andeise Cerqueira Dutra¹, Victor Hugo Rohden Prudente¹, Denis Corte Vieira¹, Nildson Rodrigues de França e Silva¹, Celso Henrique Leite Silva Junior¹, Elisabete Caria Moraes¹, Yosio Edemir Shimabukuro¹ e Ieda Del'Arco Sanches¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais– INPE, Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil {andeise.dutra; victor.prudente; denis.vieira; nildson.silva, celso.junior, yosio.shimabukuro, ieda.sanches}@inpe.br e bete@dsr.inpe.br

RESUMO

A obtenção de informações sobre a interação de um determinado alvo com a radiação eletromagnética (REM) possibilita caracterizar o comportamento espectral e os atributos físicos, químicos e biológicos deste alvo. O objetivo deste trabalho foi obter o espectro de reflectância de três diferentes folhas de Amendoeira da Praia (*T. catappa sp.*), utilizando um espectroradiômetro em condições de laboratório. Conclui-se que para o estudo do comportamento espectral de alvos é necessário considerar fatores como a geometria de iluminação e aquisição, fonte de radiação e as características do alvo em estudo. Além disso, o entendimento de como pigmentos, conteúdo de água e estruturas internas das folhas interagem com os diferentes comprimentos de onda da REM, permite o uso de sensoriamento remoto no monitoramento da vegetação em termos de estresse hídrico, produtividade primária e saúde de culturas agrícolas.

Palavras-chave — sensoriamento remoto, radiância, espectroradiômetro, fator de reflectância.

ABSTRACT

*Obtaining information about the interaction of a specific target with electromagnetic radiation (EMR) allows to know and characterize the spectral behavior and also physical, chemical and biological attributes of this target. The objective of this work was to obtain the reflectance spectrum of three leaves of Amendoeira da Praia (*T. catappa sp.*) at different stages of development, using a spectroradiometer under laboratory conditions. We concluded that for studies of spectral behavior of targets it is necessary to consider factors such as the geometry of illumination and acquisition, source of radiation and characteristics of the target under study. In addition, the understanding of how pigments, water content and internal structures of leaves interact with different wavelengths of EMR allows remote sensing applications that aim to monitor vegetation in terms of water stress, primary productivity and health of agricultural crops.*

Key-words: remote sensing, radiance, spectroradiometer reflectance factor.

1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto pode ser definido como o conjunto de tecnologias que possibilitam a obtenção de informações sobre a superfície terrestre por meio da detecção e medição das interações da radiação eletromagnética (REM) com os alvos [1, 2, 3].

Entre as diversas grandezas radiométricas envolvidas no sensoriamento remoto, a radiância (L) é a mais importante. Esta grandeza descreve a REM detectada pelos sensores remotos e pode ser descrita pela razão entre o fluxo radiante refletido ou emitido ($d\phi_\lambda$) por unidade de área projetada ($dA \cdot \cos\theta$) e por unidade de ângulo sólido ($d\omega$) em uma dada direção, conforme a Equação 1.

$$L_\lambda = \frac{d^2\phi_\lambda}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\omega} \quad (1)$$

Por meio dessa medida, podemos definir o comportamento espectral de um determinado alvo como o conjunto de medidas espectrais adjacentes da radiância obtidas para cada comprimento de onda efetuadas sob condições conhecidas e controladas.

No entanto, não é possível estudar e interpretar as características físicas, químicas e biológicas dos alvos, unicamente com a radiância. Para isso, utiliza-se medidas de reflectância espectral (ρ_λ), que é uma propriedade do alvo em estudo, sendo representada pela razão entre o fluxo radiante espectral refletido ($\phi_{\lambda,out}$) pelo alvo e o fluxo radiante total espectral incidente ($\phi_{\lambda,in}$) sobre o mesmo alvo, conforme a Equação 2.

$$\rho_\lambda = \frac{\phi_{\lambda,out}}{\phi_{\lambda,in}} \quad (2)$$

Devido à dificuldade de obter diretamente a reflectância espectral em experimentos de laboratório e de campo, por causa das diferentes variações de intensidade do fluxo radiante espectral refletido pelo alvo em função dos ângulos de observação, utiliza-se um artifício matemático nomeado de Fator de Reflectância Espectral (FR_λ), que é dado pela razão entre a radiância espectral do alvo ($L_{\lambda,a}$) e a radiância espectral de uma superfície lambertiana ideal ($L_{\lambda,r}$), ambos obtidos nas mesmas condições de iluminação e observação

[4], conforme a Equação 3. Mesmo sendo dependente de fatores como condições de iluminação e ângulo de observação, terá uma configuração específica que permitirá distinguir os diferentes alvos de interesse em comprimentos de onda específicos [2].

$$FR_{\lambda} = \frac{L_{\lambda,a}}{L_{\lambda,r}} \quad (3)$$

Nesse contexto, pode-se afirmar que a realização de experimentos de radiometria em laboratório é de fundamental importância para o estabelecimento de padrões do comportamento espectral de alvos. Assim, as medidas de radiância espectral permitem inferir sobre as propriedades espectrais de reflectância e transmitância dos alvos de interesse e, conseqüentemente, de sua absorvância.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar as alterações do espectro de reflectância de três folhas de Amendoeira da Praia (*T. catappa sp.*) em diferentes estádios de desenvolvimento e em diferentes ângulos de observação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no dia 29 de março de 2017, no Laboratório de Radiometria (LARAD) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em São José dos Campos – SP, com coordenadas 23°12'36.62"S e 45°51'32.35"O. As paredes e piso do laboratório são enegrecidos de forma a reduzir a interferência na fonte de iluminação, sendo esta a condição apropriada.

A esquematização da geometria de aquisição dos dados deste experimento é apresentada na Figura 1. Durante o experimento, para garantir a confiabilidade na obtenção das medidas de radiância, manteve-se um padrão constante de distâncias, fonte-alvo-sensor, assegurando a obtenção de dados sobre as mesmas condições de observação e iluminação.

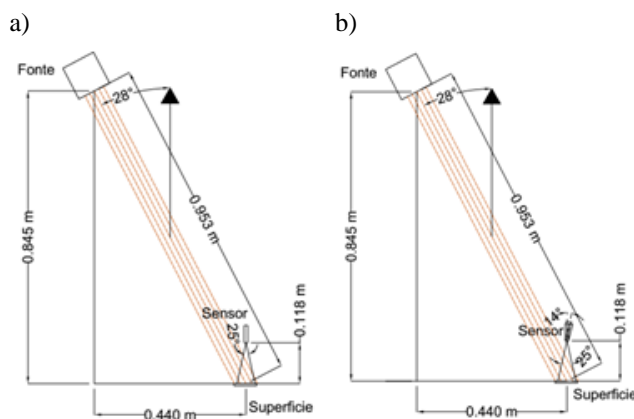


Figura 1. Esquematização dos equipamentos utilizados em laboratório e as respectivas distâncias: (a) ao nadir, (b) com inclinação de 14°.

As medidas de radiância foram obtidas utilizando o espectralradiômetro *FieldSpec* modelo *Standard-Res* (ASD,

Boulder, CO, USA), com IFOV (*Instantaneous Field of View*) de 25°. As leituras deste sensor cobrem a faixa de 350 a 2500 nm do espectro eletromagnético. Sua resolução espectral é 3 nm para as leituras nas faixas espectrais do visível e infravermelho próximo e de 10 nm para a faixa do infravermelho de ondas curtas. Os valores de radiância são reamostrados e disponibilizados com valores a cada 1 nm. Sua capacidade de registro de um espectro de radiância representativo da média da coleta de 10 espectros é de 0,2s [5].

Neste estudo foi utilizada uma fonte de iluminação halógena de 250W de fluxo colimado, apoiada em um tripé e direcionada ao alvo em um ângulo zenital de 28°. A distância vertical entre a fonte e a superfície foi de 0,845 m e entre o alvo e o sensor foi de 0,118 m. Enquanto que a distância horizontal entre o alvo e a parte correspondente à fonte na superfície foi de 0,440 m. Por sua vez, a distância inclinada entre a fonte e o sensor foi 0,953 m.

Para a coleta de dados do objeto em estudo foi realizado medidas com o sensor posicionado ao nadir e a 14° de ângulo zenital. As áreas detectadas pelo sensor foram de aproximadamente 0,00205 m² e 0,00211 m², respectivamente, baseadas nas geometrias de iluminação e aquisição dos dados [6]. Assim, os fluxos considerados estão contidos em dois ângulos sólidos, determinando o fator de reflectância bidirecional (FRBD).

Para a caracterização do espectro de reflectância foram utilizados: i) três alvos naturais de folhas de Amendoeira da Praia (*T. catappa sp.*) – folha verde, senescente e seca –; ii) três alvos artificiais de amostras de papel em cores semelhantes aos alvos naturais (Figura 2).

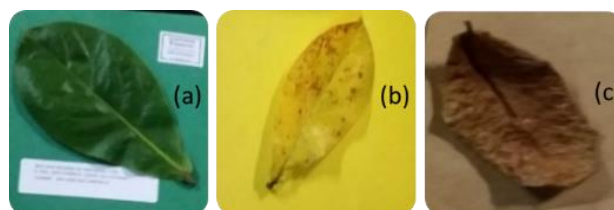


Figura 2. Folhas de Amendoeira da Praia e papéis: (a) folha verde e papel verde; (b) folha em senescência e papel amarelo; (c) folha seca e papel marrom.

Para a obtenção de dados padronizados de radiância, a calibração do equipamento foi realizada utilizando uma placa *Spectralon* com reflectância espectral de aproximadamente 100% de reflectância, considerada como uma placa lambertiana ideal. A partir destas medidas, considerando que o experimento foi desenvolvido sob condições conhecidas e controladas de observação e iluminação, foi possível calcular o FRBD espectral dos alvos.

As coletas das medidas de radiância dos alvos foram efetuadas com o ângulo de observação ao nadir da parte superior das folhas (Figura 1a). Adicionalmente para a folha verde foram coletadas medidas de radiância a 14° de inclinação do sensor (Figura 1b). Para cada alvo foram

efetuadas três repetições das medidas de radiância no menor intervalo de tempo possível, sendo que cada repetição corresponde à média de 10 espectros. Adotou-se como valor de radiância de cada alvo a média das três repetições.

A partir do FRBD espectral, calculou-se o fator de reflectância multispectral equivalente ao que seria obtido em cada faixa espectral (banda) do sensor OLI (*Operational Land Imager*), a bordo do satélite Landsat 8 (Tabela 1). Para isso foi efetuada a média aritmética dos FRBD correspondentes a cada faixa espectral.

Tabela 1. Características das bandas do OLI Landsat 8.

Banda	Nome Banda	Faixas espectrais (nm)
Banda 1	Coastal/Aerosol	435 – 451
Banda 2	Blue	452 – 512
Banda 3	Green	533 – 590
Banda 4	Red	636 – 673
Banda 5	NIR	851 – 879
Banda 6	SWIR-1	1566 – 1651
Banda 7	SWIR-2	2107 – 2294
Banda 9	Cirrus	1363 – 1384

Fonte: Adaptado de USGS [7].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A propriedade dos alvos de absorver, transmitir e refletir a REM depende, dentre outros fatores, das suas características químicas, físicas e biológicas [8], sendo estas propriedades variam no tempo, pois o estado da vegetação depende das condições do solo e meteorológicas. Sendo assim, no estudo da vegetação é importante ressaltar que existem variações marcantes de estruturas das folhas até mesmo de uma mesma espécie. Dessa maneira, no espectro de reflectância das folhas analisadas (Figura 3), podem ser identificadas três distintas regiões espectrais de interesse para estudos em vegetação: visível (400-700 nm), infravermelho próximo - IVP (700-1100 nm) e infravermelho médio - IVM (1100-2500 nm) [3].

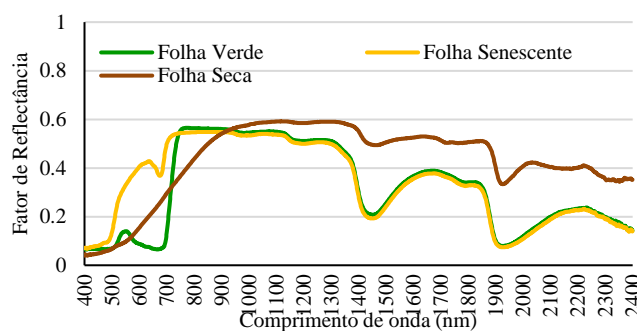


Figura 3. Espectros de reflectância de folhas de Amendoeira da Praia.

Na faixa do visível espectral espectro de reflectância é definido principalmente pelos pigmentos existentes nos cloroplastos das folhas. Esses pigmentos são constituídos sobretudo por clorofilas (65%), carotenóides (6%) e xantofilas (29%), sendo que essas proporções podem apresentar variações dependendo da espécie vegetal [3]. Uma

vez que a folha verde estava fotossinteticamente ativa, e que ocorre maior concentração de pigmentos nas regiões espectrais do azul e vermelho, foi observado uma maior absorção da REM nesses comprimentos de onda e, conseqüentemente, um pico de reflexão na faixa do verde. Na folha amarela, que estava em processo de senescência, à medida que a influência dos pigmentos diminui, maiores quantidades de luz verde e vermelha são refletidas, resultado na sua aparência amarelada. A folha seca produziu uma curva com menor reflectância na faixa do azul e verde quando comparado às demais folhas e maior reflectância na faixa do vermelho se comparada à folha verde, produzindo sua coloração marrom [1].

Visto que a faixa espectral correspondente ao IVP não é utilizada para a realização da fotossíntese [3,1], verifica-se uma maior reflectância e menor absorção na folha verde e na senescente, apresentando grande similaridade entre ambas a partir dos ~950 nm. Nesta região a reflectância é o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. Assim, de maneira geral, quanto mais lacunosa for a estrutura interna celular, maior será o espalhamento interno da energia incidente e, conseqüentemente, maiores serão os valores de fator de reflectância [3]. No entanto, foi observado na folha seca a redução na reflectância na região entre ~758 e ~894 nm, e o aumento na faixa entre ~894 e ~1000 nm quando comparado às folhas verde e senescente, visto que os espaços intermoleculares são menores devido à compactação da estrutura interna da vegetação.

Na faixa do IVM, é possível identificar uma menor amplitude das curvas em duas bandas de absorção (~1450 nm e ~1930 nm), as quais ocorrem devido ao conteúdo de água nas folhas verde e senescente. Na folha senescente, ainda que apresente baixa atividade fotossintética, o conteúdo de água é conservado. A folha seca apresentou maior valor de reflectância pois o menor conteúdo de água ocasiona a redução da absorção, implicando em bandas de absorção são rasas, e aumento da reflectância na região do IVM [8].

Os alvos artificiais apresentaram picos de FRBD nos mesmos comprimentos de ondas na região do espectro visível em relação aos alvos naturais com os quais foram comparados (Figura 4).

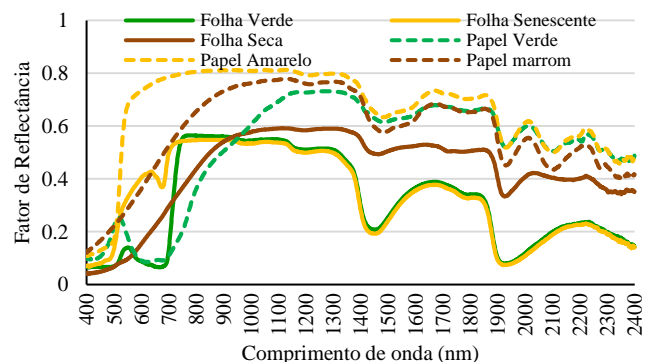


Figura 4. Espectros de reflectância dos papéis de cor semelhante aos alvos naturais.

Na região do IVM, os papéis apresentaram espectro de reflectância semelhantes, com pouca variação de valores. Entretanto, dentre os alvos naturais analisados, a folha seca foi a que mais apresentou semelhança de espectro de reflectância com o seu respectivo alvo artificial, principalmente na região do IVM. Isso pode estar relacionado as propriedades físico-químicas e biológicas da folha seca que tem sua reflectância regida principalmente pelo conteúdo de celulose e lignina, com maior reflectância no IVM [8], além do fato dos alvos artificiais serem compostos de celulose compactada.

Em relação ao FRBD da folha verde obtido nas duas condições de observação (Figura 5), constatou-se que os espectros de reflectância do alvo apresentaram semelhança entre si.

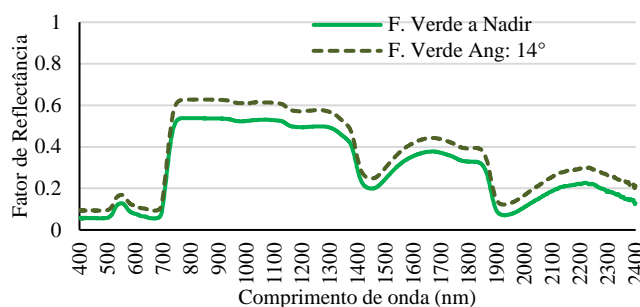


Figure 5. Folha verde de Amendoira da Praia em condição de observação ao Nadir e a 14° de inclinação do sensor.

Entretanto, a reflectância foi maior com o ângulo de observação de 14°. Isso acontece, pois, a superfície da folha é anisotrópica (não difusora), ou seja, pode apresentar diferentes valores de radiancia em diferentes ângulos de observação. Aliado a isto, há uma maior área observada pelo sensor, quando inclinado. Desta forma, para pequenas variações nas condições de observação ocorre uma sensível flutuação nas medições.

Devido à largura das bandas do sensor OLI (Figura 5) a simulação do FRBD multiespectral perde informações que se apresentam detalhada no FRDB espectral (Figura 4). Todavia, ainda que haja essa perda de informação espectral, as bandas do sensor OLI correspondem a regiões importantes para os estudos da vegetação, possibilitando dessa maneira a diferenciação dos alvos naturais em diferentes estádios.

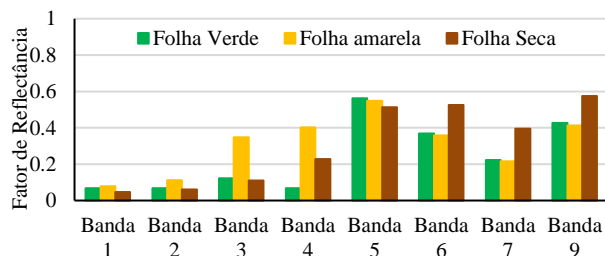


Figura 6. Folhas de Amendoira da Praia em diferentes estádios e seus respectivos papéis em cada banda do sensor OLI.

4. CONCLUSÕES

O uso do fator de reflectância bidirecional possibilitou caracterizar e distinguir as folhas de Amendoiras da Praia nos diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético, válido para as condições do momento de aquisição. Para isto, é importante ressaltar que no estudo do espectro de reflectância dos alvos é fundamental considerar fatores como a geometria de iluminação e aquisição, fonte de radiação e as características físico-químicas do alvo em estudo.

Foi possível também aprofundar o entendimento de como os pigmentos, conteúdo de água e estruturas internas foliares interagem com a REM. Isto possibilita aplicações de sensoriamento remoto que visem monitorar a vegetação em termos de estresse hídrico, produtividade primária e saúde das culturas agrícolas.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ).

6. REFERÊNCIAS

- [1] Jensen, J.R., "Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres", Tradução de J. C. N. Epiphânio. São José dos Campos, SP: Parênteses, pp.598, 2009. Tradução de: Remote Sensing of the Environment: an Earth Resource Perspective (Prentice Hall Series in Geographic Information Science).
- [2] Novo, E.M.L. de M., "Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações", 4 ed. Blucher: São Paulo, pp. 387, 2010.
- [3] Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y.E.; Kuplich, T.M. "Sensoriamento Remoto da Vegetação". 2 ed. Oficina de Textos: São José dos Campos, pp.176, 2012.
- [4] Steffen, C. A. "Técnicas radiométricas com o SPECTRON SE-590", In: VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8, Salvador, Anais... São José dos Campos: INPE, pp. 9-14, 1996.
- [5] ASD, I., "FieldSpec 4 Standard-Res Spectroradiometer", 2017. Disponível em: <<https://www.asdi.com/products-and-services/fieldspec-spectroradiometers/fieldspec-4-standard-res>>.
- [6] Boulomytis, V.T.G.; Garcia, C.E; Silva, F.B.; Trabaquini, K. e Corrêa, S.C. "Proposta metodológica para o estudo da reflectância e da transmitância de uma superfície lambertiana no âmbito do sensoriamento remoto", *Latin-American Journal of Physics Education*, v. 5 n. 2, pp. 461 - 466, 2011.
- [7] USGS - United States Geological Survey, "Landsat 8 (L8) Data Users Handbook", v. 1, n. June, 2015.
- [8] Thenkabail, P.S.; Lyon, J.S. e Huete, A., "Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation", 1st ed. New York: Taylor & Francis Group, 2012.