

## **RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS HÍDRICOS E MORFOANATÔMICOS FOLIARES E O COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ESPÉCIES DA CAATINGA UTILIZANDO IMAGEM DE SATÉLITE (THEMATIC MAPPER LANDSAT 5)**

*Célia Cristina Clemente Machado<sup>1</sup>, Priscila Gomes Corrêa<sup>2†</sup>, Josicléda Domiciano Galvêncio<sup>3</sup>, Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel<sup>4</sup>*

*1 - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Agrárias, Pós-Graduação em Biodiversidade, Campus II, Areia, PB, Brasil, email: celiaccmachado@gmail.com*

*2<sup>†</sup> - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Biologia, Recife, PE, Brasil.*

*3 - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Departamento de Geografia, Recife, PE, Brasil, email: josicleda@hotmail.com*

*4 - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Biologia, Recife, PE, Brasil, email: rmpimentel@hotmail.com*

*Artigo recebido em 24/04/2015 e aceito em 24/06/2015*

### **RESUMO**

O conhecimento da interação entre a radiação eletromagnética e a vegetação permite interpretar dados de sensoriamento remoto, que por sua vez possibilita mapear e monitorar a vegetação de extensas áreas a baixo custo. Este trabalho teve por objetivo avaliar o comportamento espectral entre espécies diferentes e confirmar relações estatísticas entre o seu comportamento espectral e parâmetros hídricos e morfoanatômicos foliares. Para tal, foram coletadas amostras foliares de espécies em áreas homogêneas localizadas na zona da Bacia Hidrográfica do Rio Moxotó. A partir do material coletado foram obtidos vários parâmetros do estado hídrico das plantas e foram realizadas diversas análises anatômicas. As medidas espectrais foram realizadas em imagem do mapeador temático do satélite Landsat 5 com passagem próxima da data de coleta. Foi observado que a banda 3 apresentou correlação linear com todos os parâmetros do estado hídrico, a banda 4 apresentou correlação linear com o PWC e %LWC, as bandas 1, 2, 3 e 5 apresentaram correlação linear com o LWC. Em relação às medidas morfoanatômicas, observaram-se relações estatisticamente significativas entre as bandas 2 e 3 e a espessura total da folha e entre a banda 4 e a espessura da cutícula e a face abaxial da epiderme.

**Palavras-chave:** comportamento espectral; Landsat 5 TM; anatomia foliar; parâmetros hídricos.

## **WATER AND LEAF MORPHOLOGICAL ANATOMIC PARAMETERS RELATIONS WITH THE SPECTRAL BEHAVIOR OF CAATINGA SPECIES USING SATELLITE IMAGERY (THEMATIC MAPPER LANDSAT 5)**

### **ABSTRACT**

Knowledge of the interaction between the electromagnetic radiation and vegetation allows the interpretation of remote sensing data, making possible to map and to monitor the vegetation of extensive areas at low cost. This work aimed to evaluate the spectral behavior of different species and to confirm statistical relations between its spectral behavior and some water parameters and morphological anatomic leaf parameters. In order to do that, leaf samples were collected from species in homogeneous areas localized in the Moxotó drainage basin. From the collected material several water parameters were obtained and some anatomic analyses were made. The spectral measurements were obtained from an image of the Thematic Mapper of the Landsat 5 satellite with passage close to the collecting date. It was observed that layer 3 had linear correlation with all the water state parameters, layer

4 had linear correlation with PWC and %LWC, and layers 1,2,3 and 5 had linear correlation with LWC. Concerning the morphological anatomic measurements, statistically significant relations were observed between layer 2 and 3 and the leaf total thickness and between layer 4 and the cuticle thickness and the lower epidermis.

**Keywords:** spectral behavior; Landsat 5 TM; leaf anatomy; water parameters.

## INTRODUÇÃO

Entre as variáveis ambientais, a luz é a mais influente no desenvolvimento e sobrevivência das plantas nos diversos ambientes (LARCHER, 2000; MARTINS et al., 2009). A interação da radiação eletromagnética com a vegetação ocorre principalmente na folha, órgão especializado na absorção da radiação solar e, conseqüentemente, principal responsável pela fotossíntese. Diversos fatores influenciam a resposta espectral da vegetação. Em uma mesma espécie, variações na reflectância são influenciadas pela idade e conteúdo de água na folha, densidade da cobertura vegetal, geometria da copa, ângulo de visada, azimute solar, ângulo de iluminação, reflexão do solo, disponibilidade de água no solo (COURA et al., 2005). Todas estas variáveis dificultam a identificação das espécies vegetais, em consequência de seu comportamento espectral específico. No entanto, o conhecimento desta interação permite interpretar dados de sensoriamento remoto possibilitando mapear e monitorar a vegetação de forma mais segura.

De acordo com Gates et al. (1965) e Ponzoni e Disperati (1995), as características da reflectância da radiação eletromagnética incidente sobre as folhas variam nos diversos tipos vegetacionais como conseqüência de sua composição química (concentração e tipo de pigmentos fotossintéticos), morfologia e anatomia (distribuição dos tecidos na folha, espaços intercelulares, entre outros). Como estas características da folha são geneticamente controladas, as diferentes espécies apresentarão comportamentos espectrais diferenciados. No entanto, até mesmo indivíduos de uma mesma espécie podem apresentar reflectâncias distintas. À medida que a folha envelhece, aumenta a quantidade de espaços intercelulares, alterando, assim, a sua estrutura interna; fenômeno idêntico ocorre com os efeitos do estresse hídrico.

A detecção remota do estresse hídrico das plantas é de grande importância, entre outros fatores, por sua obtenção rápida e de baixo custo (CECCATO et al., 2001). Nos últimos anos, diversos estudos foram realizados para determinar a viabilidade de dados de sensoriamento remoto para a detecção do estresse hídrico nas plantas (DANSON et al., 1992; SEELIG et al., 2008). No entanto, estes estudos produziram uma grande variabilidade de dados, provavelmente devido a fatores como o sol, o ângulo de visada do sensor, a intensidade de iluminação, a heterogeneidade da superfície da cena, as propriedades de fundo e a diversidade óptica

atmosférica (DAWSON et al., 1999 citados por SEELIG et al., 2008). Essa variabilidade dificultou a aplicabilidade das técnicas descritas, apesar do frequente sucesso em estabelecer correlações entre os dados de sensoriamento remoto e alguns parâmetros relativos ao estado hídrico da planta. Os parâmetros relativos à descrição do estado hídrico da planta mais comumente utilizados nestes estudos estão sumarizados na Tabela 1 (SEELIG et al., 2008).

**Tabela 1:** Parâmetros usados para avaliar o estado hídrico das plantas.  $W_F$  representa o peso fresco de uma amostra de folha,  $W_D$  representa o peso seco de uma amostra de folha,  $W_{FT}$  representa o peso da folha com pressão de turgescência máxima,  $D_w$  representa a densidade da água, e  $A$  representa a área de uma amostra de folha.

Parâmetro	Fórmula/Método	Unidade
Conteúdo hídrico relativo	$RWC = (W_F - W_D) / (W_{FT} - W_D) * 100$	%
Potencial hídrico total	Câmara de pressão de Scholander	MPa
Potencial osmótico da água	Método da pressão-volume	MPa
Pressão de turgescência	Método da pressão-volume	MPa
Concentração de água (conteúdo)	$PWC = ((W_F - W_D) / W_D) * 100$	%
Hidratação foliar	$H = (W_F - W_D) / W_D$	$g_{H_2O} / g_{seco}$
Porcentagem de água na folha	$\%LWC = ((W_F - W_D) / W_F) * 100$	%
Conteúdo hídrico da folha	$LWC = (W_F - W_D) / A$	$g / m^2$
Espessura da água na folha	$LWT = (W_F - W_D) / (D_w * A)$	$\mu m$

Este trabalho objetivou: (1) verificar a existência de diferenças significativas na reflectância entre diferentes espécies e, assim, averiguar a possibilidade de identificar espécies vegetais através do comportamento espectral específico; (2) confirmar a existência de relações estatisticamente significativas entre a reflectância nas várias bandas espectrais de uma imagem do satélite Landsat 5 com passagem próxima à data de coleta e alguns parâmetros do estado hídrico foliar e (3) confirmar relações estatisticamente significativas entre a reflectância foliar nas várias bandas espectrais da imagem de satélite selecionada e alguns parâmetros morfoanatômicos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

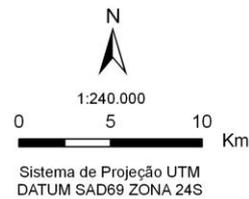
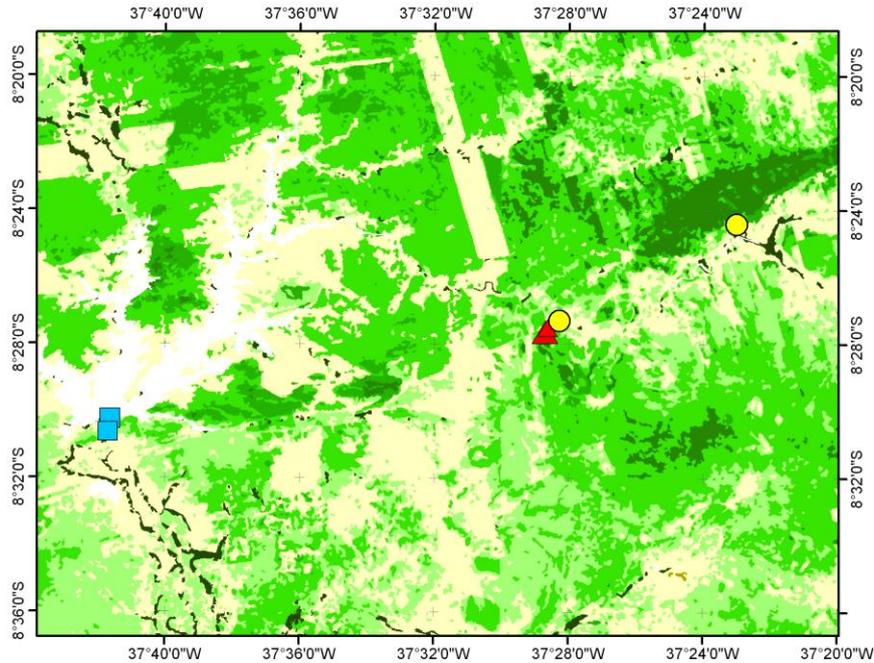
### Área de estudo

Foram selecionadas áreas de coleta na zona da Bacia Hidrográfica do Rio Moxotó (Figura 1), situada na porção central do estado de Pernambuco, dentro dos limites do semi-árido nordestino. A vegetação predominante pertence ao bioma da Caatinga.

### Amostragem

As coletas foram realizadas nos dias 21, 22 e 23 de maio de 2009, em seis áreas com, aproximadamente, 30 x 30 m (área correspondente a um pixel nas imagens Landsat 5), seguindo os critérios: (1) homogeneidade florística, isto é, uma única espécie com mais de 80% de dominância e (2) ausência de solo exposto. Desta forma, a reflectância do pixel na imagem de satélite corresponde à reflectância de uma única espécie e os efeitos de *background* são mínimos. Em cada área foram coletadas vinte folhas adultas de três indivíduos da espécie dominante. Foram consideradas folhas adultas aquelas localizadas entre o quarto e o oitavo nó, a partir da extremidade do ramo, com a lâmina foliar totalmente expandida, quando comparadas com as demais do mesmo indivíduo. Destas, dez folhas foram destinadas à obtenção dos pesos da massa fresca e seca, e outras dez foram reservadas para as análises anatômicas.

**Figura 1:** Mapa de uso e cobertura do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Moxotó (adaptado de CPRM, 2004), exibindo os pontos de amostragem.



**Uso e cobertura do solo**

- Atividades Antrópicas
- Mata Ciliar
- Solo Exposto
- Vegetação Arbustiva Aberta
- Vegetação Arbustiva Arbórea Fechada
- Vegetação Arbustiva Fechada
- Vegetação Arbórea Fechada

**Espécies coletadas**

- 
- ▲ *Caesalpinia microphylla* Mart. ex G. Don
- *Caesalpinia pyramidalis* Tul.
- *Sida galheirensis* Ulb.

**Medidas do Estado Hídrico das Plantas**

As folhas frescas foram pesadas para obtenção do peso da massa fresca ( $W_F$ ). Imagens digitais de cada folha foram obtidas para posterior medição da área foliar utilizando o software *Image Tool 3.0*. As amostras previamente pesadas foram colocadas em estufa a 50°C durante 3 dias após os quais se obtiveram os pesos secos das amostras ( $W_D$ ).

Os parâmetros do estado hídrico das plantas calculados foram: concentração (conteúdo) de água (PWC), porcentagem de água na folha (%LWC) e densidade hídrica específica (LWC). As fórmulas aplicadas para o cálculo destes parâmetros encontram-se na Tabela 1.

### **Medidas Anatômicas**

As amostras destinadas às análises anatômicas foram, inicialmente, fixadas em FAA 50 por 48 h e, posteriormente, foram confeccionadas secções transversais, à mão livre, da porção mediana da lâmina foliar. As secções foram clarificadas com hipoclorito de sódio e coradas com safranina e azul de astra (JOHANSEN, 1940). Imagens digitais foram obtidas por câmera CCD acoplada a um microscópio óptico. Nestas imagens foram medidas a espessura: do mesofilo, da cutícula, da epiderme, do parênquima paliçádico e do parênquima esponjoso, em micrômetros.

### **Medidas Espectrais**

As medidas espectrais foram realizadas em imagem do mapeador temático do satélite Landsat 5 com passagem mais próxima da data de coleta e com a menor cobertura de nuvem - órbita e ponto 215/66 com passagem em 03-04-2009. Foi realizado o pré-processamento e registro da imagem, aplicados os cálculos da radiância e reflectância e construídos os perfis de reflectância utilizando o programa *Erdas Imagine 9.3*.

As imagens do Mapeador Temático do satélite Landsat 5 são compostas por sete bandas espectrais, três bandas no visível, uma banda no infravermelho próximo, duas bandas no infravermelho médio e uma banda no termal. As bandas que cobrem o infravermelho próximo e médio (4, 5 e 7) são essenciais, pois nelas ocorrem os picos de reflectância pela estrutura interna da folhas e da absorção de água, os quais serão relacionados com os vários parâmetros do estado hídrico das plantas. Entretanto, a imagem de satélite selecionada apresentou um erro na banda 7, sendo excluída juntamente com a banda 6, a qual corresponde ao termal. Desta forma, foram analisadas cinco bandas (três do visível, uma do infravermelho próximo e uma do infravermelho médio).

As imagens foram adquiridas, gratuitamente, através de acesso ao catalogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

### **Conversão radiométrica**

Consiste na conversão do número digital (ND) de cada pixel da imagem em radiância espectral monocromática. Essa radiância representa a radiação solar refletida por cada pixel, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda.

A equação utilizada (Eq.1) é a proposta por Markham e Baker (1987):

$$L_{\lambda_i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} ND \quad (1)$$

onde “a” e “b” são as radiâncias espectrais mínimas e máximas ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ ), ND é a intensidade do pixel (numero inteiro compreendido entre 0 e 255) e i corresponde as bandas (1, 2, ... e 7) do satélite Landsat 5. Os coeficientes de calibração utilizados para as imagens TM são os propostos por Chander e Markham (2003), apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Descrição das bandas do Mapeador Temático (TM) do satélite Landsat 5 com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima – a e máxima – b) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (TOA).

Bandas	Comprimento de Onda ( $\mu m$ )	Coeficiente de Calibração				Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera ( $Wm^2 \mu m^{-1}$ )
		De 01/03/1984 até 04/05/2003		Após 05/05/2003		
		a	b	a	b	
<i>Banda 1 (azul)</i>	0,45 – 0,52	-1.52	152.10	-1.52	193.00	1957
<i>Banda 2 (verde)</i>	0,52 – 0,60	-2.84	296.81	-2.84	365.00	1826
<i>Banda 3 (vermelho)</i>	0,63 – 0,69	-1.17	204.30	-1.17	264.00	1554
<i>Banda 4 (IV-próximo)</i>	0,76 – 0,90	-1.51	206.20	-1.51	221.00	1036
<i>Banda 5 (IV-médio)</i>	1,55 – 1,75	-0.37	27.19	-0.37	30.20	215.0
<i>Banda 6 (IV-termal)</i>	10,4 – 12,5	1.2378	15.303	1.2378	15.303	-
<i>Banda 7 (IV-médio)</i>	2,08 – 2,35	-0.15	14.38	-0.15	16.50	80,67

### Reflectância

Trata-se da razão entre o fluxo radiante refletido e o fluxo radiante incidente obtida segundo a equação (Eq.2) de Allen et al. (2002):

$$\rho_{\lambda_i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda_i}}{K_{\lambda_i} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (2)$$

onde  $L_{\lambda_i}$  é a radiância espectral de cada banda,  $K_{\lambda_i}$  é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ( $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ , Tab. 2), Z é o ângulo zenital solar e  $d_r$  é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol ( $r_0$ ) e a distância Terra-Sol (r) em dado dia do ano (DSA).

Os seis pontos de coleta foram espacializados e os perfis espectrais de cada ponto foram obtidos. Os perfis espectrais representam a forma particular como os objetos presentes no pixel refletem a radiação eletromagnética nos diferentes comprimentos de onda.

### Análises estatísticas

Realizaram-se correlações lineares entre as reflectâncias das várias bandas disponíveis na imagem selecionada e os parâmetros que representam o estado hídrico e morfoanatômico das folhas. As relações foram consideradas estatisticamente significativas quando se verificou um nível de 95% de confiança.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO****Identificação das espécies**

Ao todo foram coletadas três espécies, cada uma ocupando duas das seis áreas de coleta. Foram elas: *Sida galheirensis* Ulb., *Caesalpinia pyramidalis* Tul. e *Caesalpinia microphylla* Mart. ex G. Don (Tabela 3).

**Tabela 3:** Lista dos pontos de coleta, coordenadas, espécies e suas respectivas famílias e hábitos.

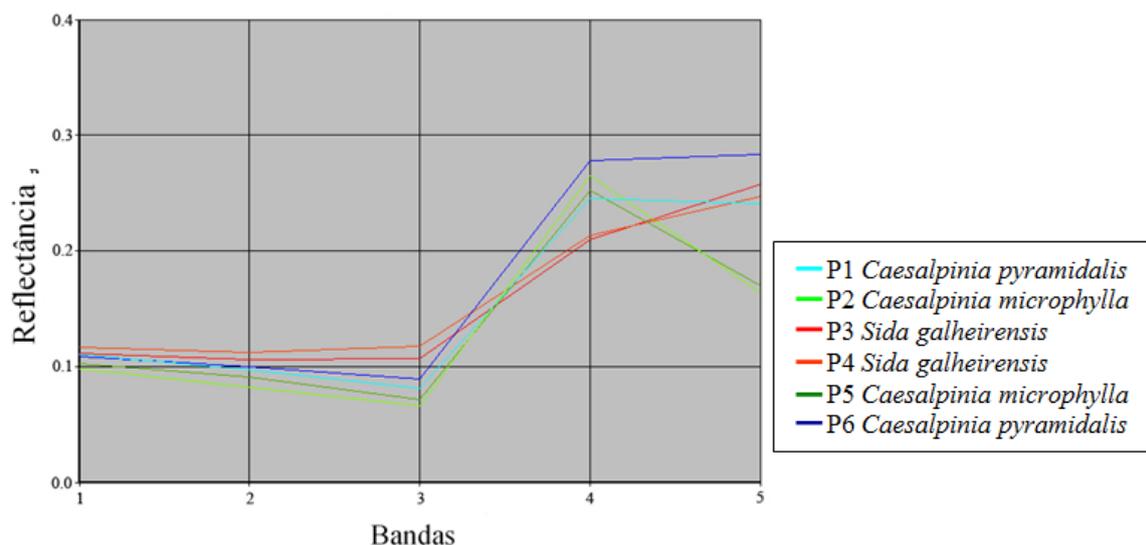
Pontos de coleta	Coordenadas	Espécies	Família	Hábito
P1	0677967N 907033W	<i>Caesalpinia pyramidalis</i> Tul.	Caesalpinaceae	Arbóreo
P2	0667527N 9064602W	<i>Caesalpinia microphylla</i> Mart. ex G. Don	Caesalpinaceae	Arbóreo
P3	0643758N 9059258W	<i>Sida galheirensis</i> Ulb.	Malvaceae	Herbáceo
P4	0643628N 9059018W	<i>Sida galheirensis</i> Ulb.	Malvaceae	Herbáceo
P5	0667635N 9064664W	<i>Caesalpinia microphylla</i> Mart. ex G. Don	Mimosoideae	Arbóreo
P6	0668299N 9065050W	<i>Caesalpinia pyramidalis</i> Tul.	Caesalpinaceae	Arbóreo

**Comportamentos Espectrais**

Na Figura 2 estão representados os perfis espectrais dos seis pontos de coleta obtidos na imagem de 03-04-2009. Pode-se verificar que os pontos de coleta com a mesma espécie dominante apresentam perfis espectrais semelhantes. No entanto, após realizadas as correlações lineares, não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas entre os valores de reflectância de cada espécie. Isto significa que não foi possível distinguir as espécies apenas por seus valores particulares de reflectância. Este resultado pode ser devido a uma amostragem pouco representativa, por isso, é necessário prudência quanto à análise deste resultado.

Também é possível constatar que é entre a banda 4 e 5 que começam as grandes discrepâncias entre as espécies estudadas. É nestas bandas que o comportamento espectral é influenciado principalmente pelo conteúdo hídrico das plantas. É interessante verificar que a espécie que obteve maior discrepância entre locais diferentes – *Caesalpinia pyramidalis* – é aquela que apresentou também as maiores diferenças de conteúdo hídrico entre si (Tabela 4). Constatando-se assim, que o conteúdo hídrico das folhas é um fator de grande peso no comportamento espectral apresentado pelas plantas.

**Figura 2:** Perfis espectrais da imagem de órbita e ponto 215/66 com passagem em 03-04-2009 do Landsat 5 TM em cinco bandas espectrais nos seis pontos de coleta.



### Estado Hídrico da Folha

Os parâmetros verificadores do estado hídrico das plantas foram obtidos para cada um dos indivíduos de cada espécie (Tabela 4). Estes parâmetros foram calculados a partir dos pesos da massa fresca e seca das folhas coletadas e das áreas foliares medidas para cada uma das 10 folhas coletadas de cada indivíduo.

**Tabela 4:** Parâmetros do estado hídricos foliares medidos nas amostras de cada ponto de coleta. MF = massa fresca; MS = massa seca; AF =área foliar; PWC = conteúdo de água na folha; % LWC = % de água na folha; LWC = densidade hídrica específica.

Ponto de coleta	Espécie	MF (g)	MS (g)	AF (m <sup>2</sup> )	PWC (%)	% LWC	LWC (g/m <sup>2</sup> )
P1	<i>Caesalpinia pyramidalis</i> Tul.	13,347	5,493	0,013	142,963	58,841	594,954
	<i>Caesalpinia microphylla</i> Mart. ex G.	5,180	2,273	0,004	127,863	56,114	807,417
P2	Don						
P3	<i>Sida cf. galheirensis</i> Ulb.	0,783	0,260	0,004	201,269	66,807	146,173
P4	<i>Sida cf. galheirensis</i> Ulb.	0,950	0,263	0,004	260,805	72,284	171,675
	<i>Caesalpinia microphylla</i> Mart. ex G.	5,447	2,367	0,003	130,139	56,548	916,667
P5	Don						
P6	<i>Caesalpinia pyramidalis</i> Tul.	19,853	9,213	0,027	115,485	53,593	399,549

### Reflectância versus Estado Hídrico

Análises de regressão linear foram realizadas entre os valores de reflectância de cada banda em cada ponto de coleta e os parâmetros do estado hídrico calculados.

Analisando os dados da Tabela 5 verificou-se que a banda 3 apresentou uma correlação linear com todos os parâmetros. A banda 4 apresentou correlação linear com o PWC e %LWC. As bandas 1, 2, 3 e 5 apresentaram correlação linear com o LWC.

**Tabela 5:** Coeficientes lineares de correlação entre os parâmetros de estado hídrico e a reflectância de 5 das bandas espectrais do satélite Landsat 5 TM.

		<b>Banda 1</b>	<b>Banda 2</b>	<b>Banda 3</b>	<b>Banda 4</b>	<b>Banda 5</b>
		<b>(0,45-0,52 μm)</b>	<b>(0,52-0,60 μm)</b>	<b>(0,63-0,69 μm)</b>	<b>(0,76-0,9 μm)</b>	<b>(1,55-1,75 μm)</b>
<b>Coefficiente de correlação (r)</b>	PWC	0,744	0,792	0,876*	0,896*	0,311
	%LWC	0,735	0,777	0,862*	0,941*	0,295
	LWC	0,872*	0,904*	0,952*	0,647	0,825*

\* Significante ao nível de 95% de confiança.  $n=6$ .

A reflectância verificada nas bandas 3 e 4 está relacionada com o comportamento espectral da vegetação. Os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância espectral verificada na banda 3; é nesta banda que ocorre maior absorção da REM pela vegetação. No entanto, nesta região do espectro a absorção da água é muito baixa. Estas correlações positivas foram, também, verificadas no trabalho de Danson et al. (1992) e justificada pela covariância entre o conteúdo de clorofila e outros parâmetros foliares.

Na região do espectro electromagnético contida na banda 4 existe uma pequena absorção da REM e considerável espalhamento interno na folha. Esse espalhamento interno varia de acordo com a estrutura interna específica e a disponibilidade de água, a qual promove alterações na relação água-ar no mesófilo. Correlações positivas entre o infravermelho próximo e o LWC foram também encontradas no trabalho de Danson et al. (1992) e justificada pela competição entre a estrutura foliar e os efeitos do conteúdo hídrico foliar, uma vez que a água preenche as cavidades de ar, formando um meio líquido no interior da folha. Com isso, ocorre uma diminuição das diferenças no índice de refração do ar e da parede celular hidratada na folha, aumentando assim a transmitância da mesma (Knipling, 1970). Seriam esperadas correlações entre a banda 5 e todos os parâmetros hídricos calculados pelo fato desta banda encontrar-se na região do infravermelho médio do espectro eletromagnético, onde a absorção, devido a presença de água líquida, predomina na reflectância espectral das folhas. Além disso, vários estudos verificaram relações estatisticamente significativas entre alguns comprimentos de onda do infravermelho médio e o conteúdo hídrico da planta (Danson et al., 1992; Seelig et al., 2008). O fato de ter trabalhado apenas seis pontos e cinco bandas espectrais (apenas uma na região do infravermelho médio) pode justificar o resultado aqui encontrado.

### **Anatomia**

Analisando os valores obtidos pela determinação dos parâmetros foliares (Tabela 6) foi observado que a folha de *S. galheirensis* destacou-se por apresentar maior espessura total, seguida das folhas de *C. pyramidalis* e *C. microphylla*. A espessura da cutícula superior foi maior em folhas de *C. microphylla* e menor em folhas de *S. galheirensis*. A espessura da cutícula da face inferior foi maior em folhas de *C. pyramidalis*, seguida por *C. microphylla* e *S. galheirensis*. *C. pyramidalis* apresentou a cutícula espessada em ambas as faces epidérmicas. A espessura do parênquima paliçádico e esponjoso foi maior em folhas de *S. galheirensis*.

**Tabela 6:** Comparação entre espessura ( $\mu\text{m}$ ) total, cutícula, epiderme, parênquima clorofiliano (paliçádico e esponjoso) em folhas de espécies estabelecidas na região da Bacia Hidrográfica do Rio Moxotó, semi-árido nordestino, Pernambuco, Brasil.

Ponto de coleta	Espécie	Espessura ( $\mu\text{m}$ )							
		Total	Cutícula		Epiderme		Parênquima		
			AD	AB	AD	AB	Paliçádico	Esponjoso	
1	<i>C. pyramidalis</i>	179,982 $\pm$ 13,247b	5,246 $\pm$ 1,332b,c	4,075 $\pm$ 1,011a,b	17,070 $\pm$ 2,641a,b	11,644 $\pm$ 1,909a,b	65,609 $\pm$ 16,950b	58,868 $\pm$ 14,523b	
2	<i>C. microphylla</i>	164,982 $\pm$ 19,160b	6,493 $\pm$ 0,900a	3,269 $\pm$ 0,731c,d	14,625 $\pm$ 2,397b,c	10,796 $\pm$ 1,313b,c	70,366 $\pm$ 17,271b	55,132 $\pm$ 18,353b	
3	<i>S. galheirensis</i>	198,348 $\pm$ 14,000a	4,470 $\pm$ 0,911c	2,413 $\pm$ 0,457e	14,048 $\pm$ 2,981c	9,913 $\pm$ 1,571c,d	105,896 $\pm$ 13,406a	60,343 $\pm$ 10,477a,b	
4	<i>S. galheirensis</i>	207,022 $\pm$ 13,439a	4,354 $\pm$ 1,053c	2,593 $\pm$ 0,735d,e	13,824 $\pm$ 2,247c	8,374 $\pm$ 1,290d	103,680 $\pm$ 13,786a	73,293 $\pm$ 11,878a	
5	<i>C. microphylla</i>	179,713 $\pm$ 26,606b	5,900 $\pm$ 1,103a,b	3,629 $\pm$ 0,868b,c	15,483 $\pm$ 3,688a,b,c	11,301 $\pm$ 1,436a,b,c	113,573 $\pm$ 34,219a	30,330 $\pm$ 10,355c	
6	<i>C. pyramidalis</i>	175,988 $\pm$ 11,644b	5,908 $\pm$ 0,650a,b	4,50 $\pm$ 0,605a	17,698 $\pm$ 1,948a	12,405 $\pm$ 1,995a	99,479 $\pm$ 24,323a	37,839 $\pm$ 17,800c	

Médias ( $\pm$  desvio padrão) entre espécies, seguidas pela mesma letra, não diferiram significativamente entre si pelo teste Tukey a 95% de confiança.

### Reflectância versus Anatomia foliar

Analisando a influencia dos parâmetros anatômicos na reflectância (Tabela 7), foi constatado através do coeficiente de correlação de Pearson resultados significantes entre as bandas 2 e 3 e a espessura total da folha, entre a banda 4 e a espessura da cutícula (AB e AD) e da espessura da face abaxial da epiderme.

A espessura da folha é fator importante no caminho da radiação eletromagnética, sendo a transmitância maior do que a reflectância para folhas finas, e o inverso para as folhas espessas (PONZONI e DISPERATI, 1995).

A epiderme adaxial mostrou uma correlação elevada, embora não significativa. A cutícula e a epiderme são as primeiras barreiras no caminho da radiação eletromagnética, desta forma influenciam fortemente o comportamento espectral da folha. A espessura destas estruturas varia de espécie para espécie e de acordo com as características particulares do ambiente. Por exemplo, em ambientes mais secos, as espécies vegetais tendem a apresentar cutícula mais espessa, de forma a reduzir a perda de água por transpiração da folha. Estudos como os de Danson et al. (1992) e Seeling et al. (1992) utilizaram espectroradiômetro para medir a reflectância em determinados comprimentos de onda para cada indivíduo de cada

espécie analisada. Neste trabalho, foram utilizados os valores de reflectância do pixel medidos para a imagem de satélite.

**Tabela 7:** Coeficientes lineares de correlação entre a espessura ( $\mu\text{m}$ ) total, cutícula, epiderme, parênquima clorofiliano (paliçádico e esponjoso) em folhas de espécies da região da Bacia Hidrográfica do Rio Moxotó, semi-árido nordestino, Pernambuco, Brasil e a reflectância de 5 bandas espectrais do satélite Landsat 5 TM dos pontos de coleta.

Espessura ( $\mu\text{m}$ )	Coeficiente de correlação ( $r$ )				
	Banda 1 0,45-0,52 ( $\mu\text{m}$ )	Banda 2 0,52-0,60 ( $\mu\text{m}$ )	Banda 3 0,63-0,69 ( $\mu\text{m}$ )	Banda 4 0,76-0,9 ( $\mu\text{m}$ )	Banda 5 1,55-1,75 ( $\mu\text{m}$ )
Total	0,769	0,86*	0,896*	-0,858	0,451
Cutícula AD	-0,910	-0,914	-0,919	0,916*	-0,577
Cutícula AB	-0,284	-0,381	-0,549	0,851*	0,114
Epiderme AD	-0,097	-0,211	-0,395	0,719	0,312
Epiderme AB	-0,478	-0,553	-0,691	0,839*	-0,007
Parênquima paliçádico	0,190	0,285	0,178	0,048	0,018
Parênquima esponjoso	0,055	0,511	0,643	-0,702	0,266

\* Significante ao nível de 95% de confiança.  $n= 6$ . AD = adaxial; AB = abaxial.

## CONCLUSÕES

Pela análise dos resultados podemos concluir que o estado hídrico da folha influenciou consideravelmente o comportamento espectral das espécies estudadas na banda 3 e 4. Embora *S. galheirensis* possua folhas mais espessas, com parênquima paliçádico e esponjoso mais espessos, quando comparados com as demais, esta não apresentou reflectância superior, o que era de se esperar.

Este tipo de estudo é essencial para possibilitar o entendimento de como a radiação eletromagnética interage com a folha, seu conteúdo hídrico e sua estrutura anatômica e, deste modo, permitir inferir sobre o estado hídrico da vegetação em vastas áreas, de forma rápida e com baixo custo.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; Waters, R.; Bastiassen, W. Surface energy balance algorithms for land (SEBAL). Advance training and users manual, version 1.0, Idaho, 2002. 98p.
- CECCATO, P.; FLASSE, S.; TARANTOLA, S.; JACQUEMOUD; S. GRÉGOIRE, J. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. Remote Sensing Environment, v. 77, p. 22-33, 2001.
- CHANDER, G. e MARKHAM, B. 2003. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 41, p. 2674-2677, 2003.

COURA, S.M.C.; PIROMAL, R.A.S.; CANAVESI, V.; GOMES, M.N.; QUIRINO, V.F.; PONZONI, F.J. Comparação das Características Espectrais das Espécies *Ligustrum japonicum* Thunb. e *Cassia macranthera* DC. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Goiana, Brasil, 2005. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Proceedings... INPE, 2005. p. 1477-1484.

DANSON, F.M.; STEVEN, M.D.; MALTHUS, T.J.; CLARK, J.A. High-spectral resolution data for determining leaf content. *International Journal of Remote Sensing*, v. 13, p. 461-470, 1992.

GATES, D.M.; KEEGAN, J.J.; SCHLETER, J.C.; WEIDNER, V.R. Spectral properties of plants. *Applied Optics*, v. 4, p. 11-20, 1965.

JOHANSEN, D.A. *Plant Microtechnique*. McGraw-Hill Book Co. Inc., New York. 1940.

KNIPLING, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, v. 1, p. 155-159, 1970.

LARCHER, W. *Ecofisiologia Vegetal*. São Carlos: Rima, 2000. 531p.

MARKHAM, B.L.; BARKER, L.L. 1987. Thermal mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. *International Journal of Remote Sensing*, v. 8, p. 517-523, 1987.

MARTINS, J.R.; ALVARENGA, A.A.; CASTRO, E.M.; SILVA, A.P.O.; OLIVEIRA, O.; ALVES, E. Anatomia foliar de plantas de alfavaca-cravo cultivadas sob malhas coloridas. *Ciência Rural*, v. 39, p. 82-87, 2009.

PONZONI, F. J.; DISPERATI, A. A. Comportamento espectral da vegetação. INPE, 1995. (INPE5619 pud/065).

SEELIG, H.D.; HOEHN, A.; STODIECK, L.S.; KLAUS, D.M.; ADAMS, W.W.; EMERY, W.J. Relations of remote sensing leaf water indices to leaf water thickness in cowpea, bean, and sugarbeet plants. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, p. 445-455, 2008