

LARISSA AREAL DE CARVALHO MÜLLER

**TRAÇOS ESPECTRAIS E ANATÔMICOS DE ESPÉCIES DO  
ESTRATO HERBÁCEO-SUBARBUSTIVO DE CERRADO**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Botânica, para  
obtenção do título de *Magister  
Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

M958t  
2018 Müller, Larissa Areal de Carvalho, 1991-  
Traços espectrais e anatômicos de espécies do estrato  
herbáceo-subarbustivo de Cerrado / Larissa Areal de Carvalho  
Müller. – Viçosa, MG, 2018.  
[56] f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Andreza Viana Neri.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Plantas - Anatomia. 2. Folhas - Anatomia. 3. Análise  
foliar. 4. Folhas - Fisiologia. 5. Ervas. 6. Cerrados .  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Biologia  
Vegetal. Programa de Pós-Graduação em Botânica. II. Título.

CDD 22. ed. 581.7

LARISSA AREAL DE CARVALHO MÜLLER


**TRAÇOS ESPECTRAIS E ANATÔMICOS DE ESPÉCIES DO  
ESTRATO HERBÁCEO-SUBARBUSTIVO DE CERRADO**


Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Botânica, para obtenção do título de  
*Magister Scientiae*.

APROVADA: 20 de fevereiro de 2018.

  
\_\_\_\_\_  
José Marinaldo Gleriani

  
\_\_\_\_\_  
Marcelo Leandro Bueno

  
\_\_\_\_\_  
Cibele Hummel do Amaral  
(Coorientadora)

  
\_\_\_\_\_  
Andreza Viana Neri  
(Orientadora)

Dedico este trabalho à minha mãe e irmã  
que sempre me apoiaram.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos Coordenadores, Professores e Funcionários do Programa de Pós-Graduação em Botânica, à Universidade Federal de Viçosa por ceder toda a estrutura para realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de pós-graduação.

Ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) pela autorização de pesquisa na Floresta Nacional de Paraopeba, aos funcionários da UC pela atenção e gentileza em que éramos recebidos.

À minha orientadora Andreza Viana Neri pela confiança e credibilidade depositado em mim, muitíssimo obrigado pelas cobranças e ensinamentos.

Aos meus colaboradores Cibele Hummel do Amaral, Aristéa Alves Azevedo e João Augusto Alves Meira Neto por me acompanhar em mais uma jornada, agradeço pelas conversas, aprendizados e motivação em desenvolver este trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Ecologia e Evolução de Plantas (LEEP) e Herbário: Herval, Alex, Anaïs, Helder, Flávia, Daniela, Alice, Fernando, Gustavo, Izabela, Cecília, Miguel, Neil, Nayara Mota, Nayara Smith, Prímula, Wedelo; vocês são especiais para mim, agradeço pelos momentos de alegria e diversão proporcionados. Um agradecimento especial ao técnico do LEEP, Celso Antônio, pela disponibilidade e por sempre ajudar a todos a sua volta, obrigado!!

A todos os meus colegas de pós-graduação, obrigado pela amizade e conhecimentos compartilhados.

Ao Laboratório de Anatomia vegetal por me ceder materiais para minha análises. E agradecer em especial ao Ivanilson, por me ajudar na preparação dos meus materiais. Ao núcleo de microscopia e microanálise por me fornecer infraestruturas para análises anatômicas

Aos colegas e Pós-Doc do LEEP Marcelo Leandro Bueno e Vanessa Pontara pelas idéias, ajudas e sugestões.

Aos colegas de república, Carol, Bárbara e Maria Alice pelos papos na cozinha e vários momentos de alegria e descontração.

Às minhas queridas amigas, Camila, Joice, Ludmilla e Tayanne pelo companheirismo desde da minha graduação. Sempre me fazendo feliz!

A minha irmã Raíssa que me incentivou a vencer mais esta etapa e me ajudou nas minhas apresentações com seus desenhos. E principalmente à minha mãe Gilmara pelo apoio, conversas motivadoras e confortantes, e por sempre acreditarem no meu potencial. A todos os meus amigos e familiares que mesmo distantes torciam por mim.

E por fim, a todos que mesmo indiretamente ajudaram na realização deste trabalho. Deixo aqui o meu muito obrigado e minhas desculpas por ter esquecido alguém.

## RESUMO

MÜLLER, Larissa Areal de Carvalho, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Traços espectrais e anatômicos de espécies do estrato herbáceo-subarbustivo de Cerrado.** Orientador: Andreza Viana Neri. Coorientador: Cibele Hummel do Amaral.

As características biofísicas e bioquímicas presente em uma folha, entre outras maneiras, ao interagir com radiação eletromagnética, proveniente do sol, confere a planta um comportamento espectral. Esse comportamento espectral é usado no sensoriamento remoto, de forma a coletar informações acerca da vegetação de maneira não destrutiva. Essa coleta de informações pode ser por meio de índices de vegetação ou por meio de correlações através de modelos de regressão, como a regressão parcial dos mínimos quadrados (PLSR). O presente trabalho teve como objetivos principais: 1) entender as informações das estratégias de espécies do estrato herbáceo subarbustivo de uma área de Cerrado na Floresta Nacional de Paraopeba por meio de índices de vegetação calculados através das propriedades espectrais das espécies; 2) averiguar possíveis correlações de traços anatômicos e regiões espectrais da *Pterandra pyroidea* A. Juss. Para isso foram coletadas cinco folhas de cinco indivíduos das espécies: *Ageratum fastigiatum* (Gardner) R.M. King & H. Rob, *Baccharis tridentata* Vahl, *Pterandra pyroidea* A. Juss e *Sabicea brasiliensis* Wernham, registradas em duas fitofisionomias com diferentes intensidades de luminosidade (Cerrado *sensu stricto* e Cerradão). Após as coletas dos dados espectrais, foram calculados quatro índices espectrais: *Anthocyanin Reflectance Index* (ARI), *Carotenoid Reflectance Index* (CRI), *Photochemical Reflectance Index* (PRI) e *Red-edge Vegetation Stress Index* (RVSI). As variações entre espécies e ambientes foram analisadas através de Análises de Variância. As correlações traço-espectro foram analisadas através dos traços espectrais e traços anatômicos coletados de 13 indivíduos de *P. pyroidea*. Foi realizada uma regressão de quadrados mínimos parciais (PLSR) para verificar a correlação e validação cruzada entre cada traço anatômico e cada região do espectro. Quanto a variância dos índices, PRI e CRI foram significativamente diferentes entre as fisionomias ( $p < 0.05$ ). No Cerrado *sensu stricto*, PRI, CRI e RVSI mostraram valores diferentes entre as espécies. No Cerradão, *A. fastigiatum* mostrou os valores mais altos de PRI e *S. brasiliensis* os menores valores de RVSI. A

variação de ARI não foi significativa para qualquer fisionomia. A análise de regressão gerou 18 modelos com coeficiente de determinação da calibração ( $R^2_{cal}$ ) variando de 0.008 a 0.867 e erro quadrático médio (RMSE) de 2,38 a 39,43%. Os melhores coeficientes foram observados nos modelos com o espectro total (*full range* 400-2500 nm). Já região do infravermelho próximo (700–1300 nm) mostrou uma moderada correlação ( $R^2_{cal} \approx 0.5$ ) com a espessura foliar, com o mesofilo e com o parênquima paliçádico. As demais espessuras, a correlação foi considerada moderada ou fraca. Os índices CRI e PRI detectaram variações de carotenóides; PRI também foi eficiente na indicação de variação na eficiência fotossintética dentro das fitofisionomias. Os modelos de regressão não foram satisfatórios, mesmo sendo semelhantes aos encontrados na literatura. Possivelmente o reduzido número amostral influenciou na geração dos modelos de regressão, ocasionando uma discrepância muito grande entre os coeficientes das regressões e das validações cruzadas. Testes com diferentes pré-processamento mostraram-se necessários. Com nossos resultados, os índices de vegetação se mostraram uma boa ferramenta para explorar as diferentes estratégias fisiológicas sob fatores abióticos diferentes e sob mesmas condições.

## ABSTRACT

MÜLLER, Larissa Areal de Carvalho, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Spectral and anatomical traits of species in the herbaceous-subshrub layer of Cerrado.** Adviser: Andreza Viana Neri. Co-adviser: Cibele Hummel do Amaral.

The biophysical and biochemical characteristics present on a leaf, which when interacting with electromagnetic radiation, naturally from the sun, gives the plant a spectral signature. This spectral property is used in remote sensing, to gather information about the vegetation in a non-destructive manner. This gathering of information can be by vegetation indexes or through correlations through regression models such as PLSR. The present work had as main objectives: 1) to understand the information of the species strategies of the subshrub herbaceous stratum of a Cerrado area in the Paraopeba National Forest by means of vegetation indexes calculated through the spectral signatures of Species; 2) to ascertain possible correlations of anatomical traits and spectral regions of the *Pterandra pyroidea* A. Juss. For this, five leaves of five individuals of the species were collected: *Ageratum fastigiatum* (Gardner) R.M. King & H. Rob., *Baccharis tridentata* Vahl, *Pterandra pyroidea* A. Juss and *Sabicea brasiliensis* Wernham, found in two physiognomies with different brightness intensity (Cerrado *sensu stricto* and Cerradão). After the collection of spectral data, it was calculated Four Spectral indices: *Anthocyanin Reflectance Index* (ARI), *Carotenoid Reflectance Index* (CRI), *photochemical Reflectance Index* (PRI) and *Red-Edge Vegetation Stress Index* (RVSI). The Variations between species and environments have been analyzed through Analysis of Variance. Trace-spectral correlations were analyzed through spectral traits and anatomical traits collected from 13 Individuals of *P. pyroidea*. A regression of partial minimum squares (PLSR) was held to verify correlation and cross-validation between each anatomical trait and each region of the spectra. Regarding the variance of indexes, PRI and CRI were significantly different between phytophysiognomies ( $p < 0.05$ ). In the Cerrado *sensu stricto*, PRI, CRI, and RVSI showed different values among the species. In Cerradão, *A. fastigiatum* showed the highest values of PRI and *S. brasiliensis* the lowest values of RVSI. The variation of ARI was not significantly to any phytophysiognomy. Regression analysis generated 18 models with the coefficient determination of calibration ( $R^2_{Cal}$ ) ranging from 0.008 to

0.867 and root mean square error (RMSE) From 2.38 to 39.43%. The best coefficients were observed in the models with the total spectra (*Full Range* 400-2500 nm). While Near Infrared Region (700-1300 nm) showed a moderate correlation ( $R^2_{\text{Cal}} \approx 0.5$ ) with leaf thickness, mesophyll thickness, and parenchyma palisade. The other thicknesses measures, the correlation was considered moderate or weak. The indexes the CRI and PRI detected variations of carotenóides; PRI it was also efficient in the indication of variation in photosynthetic efficiency in phytophysiognomies. Regression model's results were not satisfactory, even though they were like those found in the literature. Possibly, the reduced sample number influenced the generation of regression models, causing a very large discrepancy between the coefficients of regressions and cross-validation. Tests with different preprocessing proved necessary. With our results, the vegetation indexes showed a valuable tool for explore the different physiological strategies under abiotic factors different and under same conditions.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	1
<b>Referências bibliográficas</b> .....	2
<b>CAPÍTULO I: Reconhecimento de estratégias usadas pelas espécies herbáceas de Cerrado por meio de propriedades espectrais. <i>Strategies recognition in herbaceous species of Neotropical Savanna through spectral properties.</i></b> .....	5
<b>Abstract</b> .....	5
<b>Introdução</b> .....	6
<b>Materiais e métodos</b> .....	8
<i>Área de estudo</i> .....	8
<i>Coleta de material</i> .....	9
<i>Espécies coletadas</i> .....	10
<i>Coleta de dados</i> .....	11
<i>Análises estatísticas</i> .....	13
<b>Resultados</b> .....	14
<b>Conclusão</b> .....	22
<b>CAPÍTULO II: Propriedades espectrais associadas aos traços anatômicos de <i>Pterandra pyroidea</i> A. Juss.</b> .....	29
<b>Resumo:</b> .....	29
<b>Introdução</b> .....	30
<b>Materiais e métodos</b> .....	32
<i>Área de estudo</i> .....	32
<i>Coleta de material</i> .....	33
<i>Coleta de dados</i> .....	33
<i>Análises estatísticas</i> .....	35
<b>Discussão</b> .....	40
<b>CONCLUSÃO GERAL</b> .....	47

## INTRODUÇÃO GERAL

A fotossíntese realizada por uma planta só é possível graças a interação da folha com a radiação eletromagnética proveniente do sol, o qual é absorvida pelo pigmento fotossintetizantes, como clorofila, carotenóides e xantofilas (ASNER, 1998; ASNER; MARTIN, 2008; PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2015). A radiação além de absorvida pode ser refletida ou trafegar pelas diversas camadas de lamina foliar sendo também refletida pelos elementos internos na lâmina foliar, como células, espaços vazios ou água (GATES et al., 1965; GAUSMAN, 1977; WOOLLEY, 1971). A parte absorvida pelos pigmentos é referente ao intervalo do espectro visível (VIS, entre 0,4-0,7  $\mu\text{m}$ ), os demais comprimentos continuam pelos tecidos foliares. Na região do infravermelho (NIR, entre 0,7-1,3  $\mu\text{m}$ ) ocorre espalhamento da radiação devido as estruturas internas que criam uma interface parede celular e espaços gasosos. Entre as regiões NIR e infravermelho de ondas curtas (SWIR, 1,4-2,5  $\mu\text{m}$ ) a absorção é em consequência das ligações O-H, presentes na água e compostos bioquímicos estruturais como lignina e celulose (ASNER, 1998; GATES et al., 1965; GAUSMAN, 1977; WOOLLEY, 1971).

Essa interação de reflexão, absorção e transmitância, influenciadas pelas características biofísicas e bioquímicas foliares confere uma relação entre as curvas espectrais e os traços foliares sendo amplamente aproveitada, principalmente em sensoriamento remoto (ASNER; MARTIN, 2008; MEERDINK et al., 2016; USTIN; GAMON, 2010). Com avanços na área de sensoriamento remoto, a espectrometria - mensuração não destrutiva das propriedades espectrais – permitiu explorar variações quantitativas de pigmentos presentes nas folhas, como clorofila e carotenóides (ASNER et al., 2009; SIMS; GAMON, 2002; USTIN et al., 2009), assim como variações nas estruturas externas, como cutícula (LU, 2013), pelos (EHLERINGER; MOONEY, 1978) e também estruturas internas, como mesofilo (SLATON et al., 2001; CASTRO; SANCHEZ-AZOFEIFA, 2008; CASTRO-ESAU et al., 2006).

Estas variações que afetam o comportamento espectrais, e existem entre espécies e entre indivíduos que se desenvolveram em diferentes ambientes (ASNER et al., 2009; BIERAS; DAS GRAÇAS SAJO, 2009; FRANCO et al., 2005; ROSSATTO; KOLB; FRANCO, 2015). O efeito de fatores ambientais é

fortemente revelado pelas folhas, o órgão vegetal de maior plasticidade fenotípica, podendo alterar estruturas internas (tamanho e forma das células) e externas (área foliar, por exemplo) (CARLOS; ROSSATTO, 2017; GOULART et al., 2011).

Estudar os traços foliares e sua relação com o comportamento espectral possibilita avanços tanto na área do Sensoriamento Remoto quanto na Botânica. Saber aplicar tais técnicas inovadoras, rápidas e não destrutivas, permite uma redução de custo e mão de obra. Muitos avanços já foram feitos, no que diz respeito a predição dos traços foliares à nível de folha e de dossel (MEERDINK et al., 2016; ROELOFSEN et al., 2014; SCHWEIGER et al., 2017), mostrando-se ainda mais promissor, o enfoque na espectrometria com uma ferramenta multidisciplinar.

### **Referências bibliográficas**

ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote sensing of Environment**, v. 64, n. 3, p. 234–253, 1998.

ASNER, G. P. et al. Leaf chemical and spectral diversity in Australian tropical forests. **Ecological Applications**, v. 19, n. 1, p. 236–253, 2009.

ASNER, G. P.; MARTIN, R. E. Spectral and chemical analysis of tropical forests: Scaling from leaf to canopy levels. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3958–3970, 2008.

BIERAS, A. C.; DAS GRAÇAS SAJO, M. Leaf structure of the cerrado (Brazilian savanna) woody plants. **Trees**, v. 23, n. 3, p. 451–471, 2009.

CARLOS, N. A.; ROSSATTO, D. R. Leaf traits combinations may explain the occurrence of savanna herbaceous species along a gradient of tree encroachment. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 29, n. 3, p. 155–163, set. 2017.

CASTRO, K. L.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G. A. Changes in Spectral Properties, Chlorophyll Content and Internal Mesophyll Structure of Senescing *Populus balsamifera* and *Populus tremuloides* Leaves. **Sensors**, v. 8, p. 51–69, 2008.

CASTRO-ESAU, K. L. et al. Variability in leaf optical properties of mesoamerican trees and the potential for species classification. **American Journal of Botany**, v. 93, n. 4, p. 517–530, 2006.

EHLERINGER, J.; MOONEY, H. Leaf hairs: effects on physiological activity and adaptive value to a desert shrub. **Oecologia**, v. 37, n. 2, p. 183–200, 1978.

FRANCO, A. C. et al. Leaf functional traits of Neotropical savanna trees in relation to seasonal water deficit. **Trees - Structure and Function**, v. 19, n. 3, p. 326–335, 2005.

GATES, D. M. et al. Spectral properties of plants. **Applied optics**, v. 4, n. 1, p. 11–20, 1965.

GAUSMAN, H. W. W. Reflectance of leaf components. **Remote Sensing of Environment**, v. 6, n. 1, p. 1–9, 1977.

GOULART, M. F. et al. Which Extent is Plasticity to Light Involved in the Ecotypic Differentiation of a Tree Species from Savanna and Forest? **Biotropica**, v. 43, n. 6, p. 695–703, 2011.

MEERDINK, S. K. et al. Linking seasonal foliar traits to VSWIR-TIR spectroscopy across California ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 186, p. 322–338, 2016.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. [s.l.] Oficina de Textos, 2015.

ROELOFSEN, H. D. et al. Predicting leaf traits of herbaceous species from their spectral characteristics. **Ecology and Evolution**, v. 4, n. 6, p. 706–719, mar. 2014.

ROSSATTO, D. R.; KOLB, R. M.; FRANCO, A. C. Leaf anatomy is associated with the type of growth form in Neotropical savanna plants. **Botany**, v. 93, n. 8, p. 507–518, 2015.

SCHWEIGER, A. K. et al. How to predict plant functional types using imaging spectroscopy: linking vegetation community traits, plant functional types and spectral response. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 8, n. 1, p. 86–95, 2017.

SIMS, D. A.; GAMON, J. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 2–3, p. 337–354, 2002.

SLATON, M. R. et al. Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. **American Journal of Botany**, v. 88, n. 2, p. 278–284, 2001.

USTIN, S. L. et al. Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. S67–S77, 2009.

USTIN, S. L.; GAMON, J. A. Remote sensing of plant functional types. **New Phytologist**, v. 186, n. 4, p. 795–816, 2010.

WOOLLEY, J. T. Reflectance and Transmittance of Light by Leaves. **Plant Physiol**, v. 47, p. 656–662, 1971.

**CAPÍTULO I: Reconhecimento de estratégias usadas pelas espécies herbáceas de Cerrado por meio de propriedades espectrais. *Strategies recognition in herbaceous species of Neotropical Savanna through spectral properties.***

**Abstract**

Vegetation indexes have been developed to access vegetation physiological traits, through leaf or canopy spectral measures. To identify herbaceous species physiological responses from spectra properties, we collected leaf spectra of four herbaceous species from Cerrado *stricto sensu* and Cerrado woodland, taken as extreme physiognomies in term of light exposure. We calculated four spectral indexes (*Anthocyanin Reflectance Index*, *Carotenoid Reflectance Index*, *Photochemical Reflectance Index*, *Red-edge Vegetation Stress Index*), and analyzed their variances among species and environments. The results showed two indexes, PRI and CRI, are significantly different between physiognomies ( $p < 0.05$ ). In Cerrado *stricto sensu*, PRI, CRI and RVSI had different values between species. In Cerradão (Cerrado woodland), *Ageratum fastigiatum* showed the highest PRI values and *Sabicea brasiliensis* the lowest RVSI values. ARI variance was not significant for any physiognomy. We demonstrated to be possible to assess different physiological strategies under different abiotic factors and under same conditions by using vegetation indexes. CRI and PRI detected variations in carotenoid; being PRI one of index for photosynthetic efficiency detection. Within physiognomies, indexes demonstrated distinct species' strategies that may be used to deal with environmental pressures. This work provides good and rapid use of vegetation index to investigate vegetation status of native vegetation in Cerrado.

**Keywords:** Vegetation indexes, Cerrado, plant strategies, herbaceous

## Introdução

Sujeita a diversas condições ambientais, a capacidade de uma planta de tolerar circunstâncias extremas depende de várias estratégias morfológicas e/ou fisiológicas. A plasticidade fenotípica de uma planta, normalmente, é expressa como uma resposta às condições locais (GIVNISH, 1988; PEARCY, 2007). Em termos fisiológicos, os pigmentos presentes em uma folha têm um importante papel no funcionamento desta plasticidade, principalmente em relação à disponibilidade de luz (DEMMIG-ADAMS; ADAMS, 1992).

A disponibilidade de luz, essencial para o desenvolvimento de uma planta, é um fator ambiental que influencia as estruturas internas e externas, e a montagem de comunidade, devido à sua distribuição heterogênea no espaço e no tempo (AKULA; RAVISHANKAR, 2011; ELEMANS, 2004; GIVNISH, 1988; HANBA; KOGAMI; TERASHIMA, 2002; PEARCY, 2007; PINHEIRO; KOLB; ROSSATTO, 2016). Em uma circunstância de alta radiação, o excesso de energia que atinge a folha pode não ser usados no processo de fotossíntese e seu acúmulo pode danificar o aparato fotossintético. Assim, vários processos de fotoproteção, envolvendo pigmentos como carotenoides e antocianinas, são acionados para lidar com esse excesso de energia (AKULA; RAVISHANKAR, 2011; DEMMIG-ADAMS; ADAMS, 1992). As antocianinas participam do processo de proteção à planta em diversas situações de estresse. Em relação ao excesso de luz, esse pigmento minimiza a fotoinibição (GITELSON; MERZLYAK; CHIVKUNOVA, 2001; LINDA; CHALKER-SCOTT, 1999), enquanto os carotenoides participam na captura de fótons como dissipadores de energia, via ciclo da xantofila, evitando a fotoxidação (GAMON; SERRANO; SURFUS, 1997; GITELSON et al., 2002).

O Domínio Cerrado é considerado uma savana neotropical ou *brasilian savanna* pois é formado por um complexo vegetacional, que possui relações ecológicas e fisionômicas com outras savanas do mundo (EITEN, 1972; RIBEIRO; WALTER, 2008). É o segundo maior bioma do Brasil e sua vegetação se compõe de formações florestais savânicas e campestres sob, predominantemente, solos do tipo latossolo. No Cerrado, a riqueza e a distribuição de espécies herbáceas e arbustivas é fortemente influenciada pela

luminosidade que atinge esses estratos (GOULART et al., 2011; LAURETO; CIANCIARUSO, 2015; PINHEIRO; KOLB; ROSSATTO, 2016). As fisionomias de Cerrado são muito distintas em relação à disponibilidade de luz porque a cobertura da vegetação varia em densidade de árvores, arbustos e plantas herbáceas (FERREIRA; HUETE, 2004; RIBEIRO, J. F., & WALTER, 1998). Estas últimas estão bem estabelecidas em fitofisionomias abertas, mas também podem ser encontradas em *habitat* sombreados. A diferença na oferta de luz em camadas herbáceas as obriga a empregar diferentes estratégias para lidar com o excesso ou a escassez de luz (FILGUEIRAS, 2002). No entanto, existem poucos estudos sobre herbáceas nativas ou arbustos, nas fisionomias de Cerrado.

A folha é um órgão de grande participação na fotossíntese e é por onde a planta interage com as ondas eletromagnéticas oriundas do sol (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2015; USTIN; GAMON, 2010). Esta radiação do sol interage com as folhas, as quais, por causa das suas características biofísicas e bioquímicas, atribuem às plantas características espectrais (ASNER, 1997; ASNER et al., 2009; SÁNCHEZ-AZOFEIFA et al., 2009; USTIN; GAMON, 2010). Cada região do espectro pode ser relacionada como uma característica da folha, bioquímica ou biofísica. No intervalo espectral do visível (VIS, entre 0,4-0,7  $\mu\text{m}$ ), a energia é absorvida por clorofilas e pigmento, enquanto na região do infravermelho próximo (NIR, entre 0,7-1,3  $\mu\text{m}$ ) ocorre uma reflectância devido às estruturas internas e espalhamento da radiação (interface parede celular – espaços gasosos). Entre as regiões NIR e infravermelho (SWIR, 1,4-2,5  $\mu\text{m}$ ), a absorção ocorre em consequência das ligações O-H (água e compostos bioquímicos) (GATES et al., 1965; GAUSMAN, 1985). Assim, mudanças nessas características podem ser captadas utilizando espectros foliares de maneira rápida e não destrutiva (ASNER, 1997; ASNER; MARTIN, 2008; USTIN et al., 2009; WANG et al., 2010).

Uma ferramenta desenvolvida para avaliar o *status* da cobertura vegetal, por meio desses comportamentos espectrais, foi o índice de vegetação. O índice é uma combinação que utiliza regiões espectrais específicas, definidas após medições laboratoriais (ROBERTS; ROTH; PERROY, 2011; XUE; SU, 2017). Está sendo amplamente implementado em diversas aplicações do

sensoriamento remoto, desde quantificar pigmentos até avaliar *status* fisiológicos de uma vegetação (BAEK et al., 2017; GITELSON et al., 2002; GUO; TROTTER, 2006; MERTON, 1998; USTIN et al., 2009; VANDVIK; BIRKS, 2002; XUE; SU, 2017). Com o avanço da tecnologia no sensoriamento remoto, o número de bandas captadas pelos sensores usados está crescendo e a largura das bandas captadas está diminuindo. Assim, os algoritmos usados para os cálculos dos índices estão se diversificando, garantindo melhores estimativas (XUE; SU, 2017).

Devido à diferença de distribuição de luz nas fitofisionomias do Cerrado, espécies do estrato herbáceo-subarbustivo podem apresentar características bioquímicas e biofísicas diferentes, refletindo no seu comportamento espectral. Considerando todos estes fatores, o objetivo principal desse estudo foi identificar as respostas fisiológicas das fitofisionomias de Cerrado a diferentes disponibilidades de luz no estrato herbáceo-subarbustivo, a partir de propriedades espectrais deste estrato e comparar estas respostas entre duas fitofisionomias e entre as espécies.

## **Materiais e métodos**

### *Área de estudo*

A área de estudo foi a Floresta Nacional de Paraopeba (FLONA de Paraopeba), situa-se no Estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil (19°20' S, 44°20' W), com altitudes entre 734 m ao sul a 750 m ao norte (Figura 1). A FLONA possui 200 ha de área e encontra-se em regeneração e protegida desde 1952, além disso o último registro de queimada foi em 1963 (SILVA-JÚNIOR, 1984). O clima da região é caracterizado como tropical úmido (Aw, pelo sistema Koeppen), com uma estação chuvosa e uma seca bem definidas (NERI, 2007).

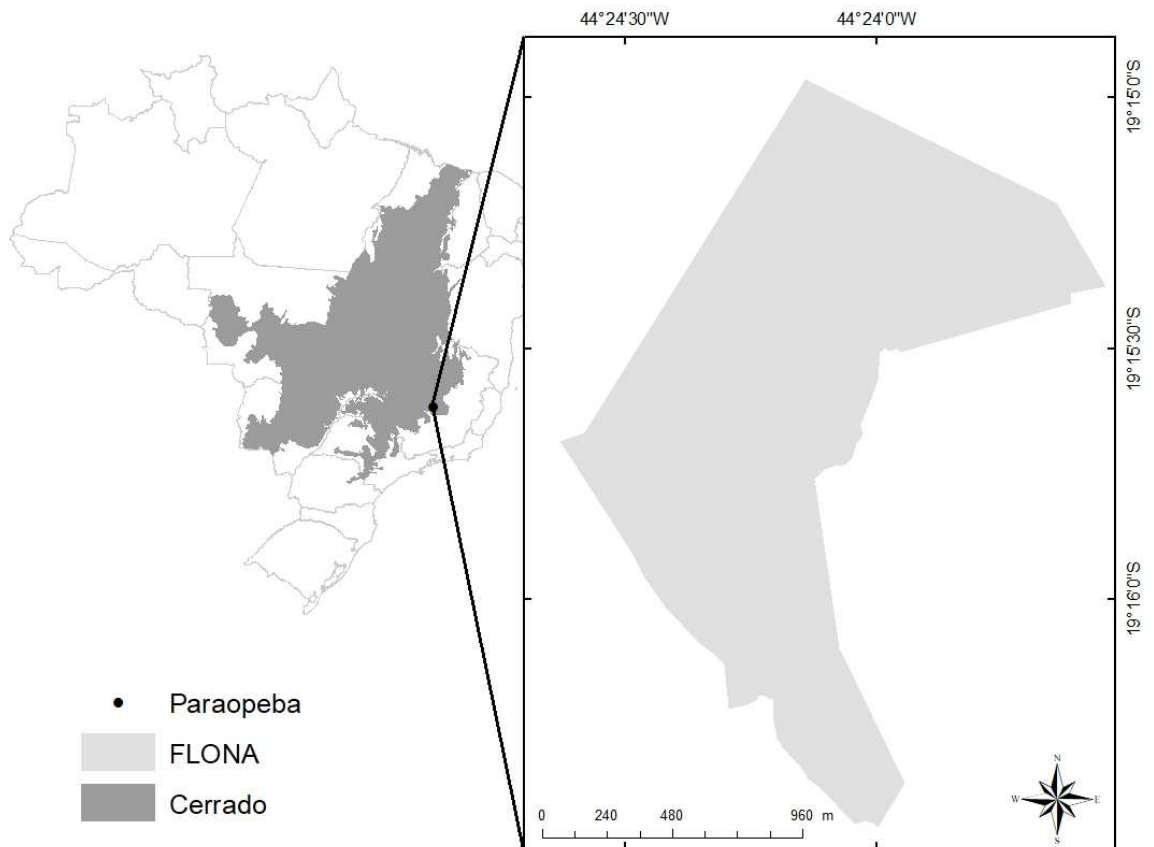


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo, Floresta Nacional de Paraopeba (FLONA), Minas Gerais, Brasil.

A vegetação encontrada nessa área engloba fitofisionomias do Domínio cerrado, apresentando um gradiente na formação de dossel (formações florestais a savânicas). Tais fitofisionomias estão associadas às características dos solos:

- Cerradão distrófico sobre latossolo vermelho;
- Cerrado *stricto sensu* sobre latossolo amarelo;
- Cerrado *stricto sensu* sobre cambissolo amarelo
- Cerrado *stricto sensu* denso sobre latossolo vermelho-amarelo;
- Cerradão mesotrófico sobre latossolo vermelho;

#### *Coleta de material*

Das fitofisionomias encontradas, duas foram escolhidas para coleta de material vegetal: Cerrado *stricto sensu* e Cerradão por poderem ser consideradas como ambientes extremos em termos de exposição à luz. O Cerrado *stricto sensu* é uma formação savânica com dois estratos bem definidos:

um gramíneo e outro lenhoso, em que não se forma um dossel contínuo devido a distribuição das árvores. Já o Cerradão é uma formação florestal do ponto de vista fisionômico, apresentando um dossel contínuo (RIBEIRO; WALTER, 1998; MIURA; HUETE, 2003,).

A coleta do material vegetal foi ao final do período chuvoso (março de 2017). Folhas maduras de cinco indivíduos de quatro espécies previamente selecionadas foram coletadas: *Ageratum fastigiatum* (Gardner) R.M. King & H. Rob, *Baccharis tridentata* Vahl, *Pterandra pyroidea* A. Juss e *Sabicea brasiliensis* Wernham. (NERI et al., 2012)(RIBEIRO; WALTER, 1998; MIURA; HUETE, 2003,)

### *Espécies coletadas*

#### *Ageratum fastigiatum* (Gardner) R.M. King & H. Rob

A espécie *Ageratum fastigiatum* pertence à família Asteraceae dentro da tribo Eupatorieae e pode ser encontrada como ervas, subarbustos ou arbustos de até 1,5m. As folhas da *A. fastigiatum* são alternas, com baixa densidade de pelos na face adaxial e podendo ser consideradas membranáceas (RIVERA, [s.d.]). A distribuição dessa espécie é ampla no Brasil, sendo encontradas em área de cerrado e campos de altitude (ALMEIDA; PRADO; LEWINSOHN, 2004) como em área de ação antrópica.

#### *Baccharis tridentata* Vahl

A espécie *Baccharis tridentata* pertence à família Asteraceae dentro da tribo. O gênero *Baccharis* apresenta uma ampla distribuição e diversas espécies. As espécies encontradas dentro deste gênero, normalmente, apresentam alturas médias entre 0,5 a 4 m. A espécie *Baccharis tridentata* é um subarbusto de com uma altura que pode variar de 0,5 a 2 m (BARROSO, 1978; GIULIANO, 2001; SOUZA et al., 2011). As folhas da *B. tridentata* possuem tricomas glandulares e estruturas secretoras tanto na superfície abaxial quanto na adaxial. Além disso, a superfície foliar também apresentar grandes quantidades de ceras e ausência de pelos (SOUZA et al., 2011).

#### *Pterandra pyroidea* A. Juss

A espécie *Pterandra pyroidea* pertence à família Malpighiaceae e o gênero *Pterandra* A. Juss. inclui 14 espécies de árvores e arbustos encontradas na América Central e do Sul. A *P. pyroidea* é uma planta comum do Planalto Brasileiro, em que podem formara arbustos pouco ramificados que pode alcançar até 2 metros (ANDERSON, 1997). As folhas podem ser tomentosas em ambas as faces com tricomas malpighiáceos, com a face abaxial serícea e a face adaxial hirsuta (FRANCENER, [s.d.]).

#### *Sabicea brasiliensis* Wernham

A espécie *Sabicea brasiliensis* pertencente à família Rubiaceae, dentro da tribo Sabiceae. O gênero *Sabicea* é composto por aproximadamente 100 espécies distribuídas pela América Tropical e África, sendo que na região neotropical podem ser encontradas cerca de 45 a 50 espécies. A espécie *S. brasiliensis* é um arbusto com aproximadamente 80 cm de altura e são encontradas em regiões de cerrado do Brasil (DELPRETE; SMITH; KLEIN, 2004). Em observações em campo, contatou-se uma densa camada de pelos por toda superfície foliar, conferido a folha um aspecto esbranquiçado.

#### *Coleta de dados*

A fim de garantir a integridade do material, as folhas foram enroladas em papel toalha umedecido, guardadas em saco plástico lacrado e armazenado em caixa térmica contendo gelo (FOLEY et al., 2006; MEERDINK et al., 2016).

Após 48 horas da coleta das folhas, foram coletados os espectros através do espectrorradiômetro hiperaespectral portátil: FieldSpec® 4 Hi-Res (Analytical Spectral Devices, Bolder, CO, Estados Unidos), localizado no Laboratório de Ecologia e Evolução de Plantas da Universidade Federal de Viçosa. O equipamento é constituído por uma sonda (pistola) e um clipe de folhas, garantindo uma obtenção de espectros ortogonalmente, em condições iguais de iluminação e com pouca influência da atmosfera, considerando o contato da sonda. Ele é capaz de registrar a reflectância de alvos na faixa do espectro eletromagnético óptico entre 350 e 2500 nm, com resoluções espectrais de 3 nm para ondas mais curtas (350-700 nm) e de 10 nm para ondas longas, coletando

ao todo 2151 bandas (DANNER et al., 2015). A análise foi feita usando a porção adaxial das folhas, com exclusão da nervura central, quando possível.

Com base nos dados hiperespectrais coletados, quatro índices de vegetação foram calculados para obter uma estimativa de conteúdo de pigmentos e condições fisiológicas das espécies (Tabela 1).

**Tabela 1.** Índices espectrais calculados para conteúdo de pigmentos e condições fisiológicas para conseguir apurar as diferentes estratégias usadas pelas espécies. A lista de índices foram de retirados de Roberts et. al. (2013)

Índices	Fórmula	Referência
Anthocyanin Reflectance Index	$ARI = (1/\rho_{550}) - (1/\rho_{700})$	(GITELSON; MERZLYAK; CHIVKUNOVA, 2001)
Carotenoid Reflectance Index	$CRI = (1/\rho_{510}) - (1/\rho_{550})$	(GITELSON et al., 2002)
Photochemical Reflectance Index	$PRI = (\rho_{530} - \rho_{570}) / (\rho_{530} + \rho_{570})$	(GAMON; SERRANO; SURFUS, 1997)
Red-edge Vegetation Stress Index	$RSVI = (\rho_{714} + \rho_{752}) / 2 - \rho_{733}$	(MERTON, 1998)

O Índice de Reflectância de Antocianina (*Anthocyanin Reflectance Index* -ARI) permite uma estimativa não destrutiva do acúmulo de antocianina em folhas que é induzido como consequência de muitos estresses ambientais como a seca, baixa temperatura e luz intensa (AKULA; RAVISHANKAR, 2011; GITELSON; MERZLYAK; CHIVKUNOVA, 2001; LINDA; CHALKER-SCOTT, 1999). Este pigmento tem um máximo de absorção de energia entre 540-550 nm que também é influenciado pela reflectância de clorofilas (GITELSON; MERZLYAK; CHIVKUNOVA, 2001). Levando isso em consideração, a fórmula para ARI é uma combinação de regiões de absorção de energia por antocianinas e clorofilas e, também, de absorção por clorofilas (GITELSON; MERZLYAK; CHIVKUNOVA, 2001; MERZLYAK et al., 2003). Para estimar carotenóides, o índice CRI (*Carotenoid Reflectance Index*)(GITELSON et al., 2002), que se baseia em uma fórmula básica relacionada à absorção de clorofila e à absorção de carotenóides mais clorofila (ROBERTS; ROTH; PERROY, 2011). Esta estimativa tem algumas dificuldades porque a sua ocorrência varia e muda durante a ontogenia da folha e após adaptações a condições variáveis de luz (MERZLYAK et al., 2003).

Em relação ao estado fisiológico, os índices que usam regiões do limite do vermelho e comprimentos de onda mais curtos são os mais usados (PERRY; ROBERTS, 2008; ROBERTS; ROTH; PERROY, 2011). O índice de reflectância fotoquímica (*Photochemical Reflectance Index*, PRI) é um indicador da função fotossintética, pois pode capturar as alterações na reflectância de 531 nm devido à mudança da violaxantina para a zeaxantina, conhecida como ciclo xantofílico (ZHANG et al., 2016). À medida que a violaxantina converte-se para a zeaxantina, a reflectância em 531nm reduz, produzindo um valor cada vez mais negativo, indicando uma planta sob estresse e uma incapacidade de usar a luz absorvida (PEÑUELAS; FILELLA; GAMON, 1995). A conversão e o excesso de energia estão correlacionados, e esse processo ocorre no fotossistema II (PSII) (GAMON; SERRANO; SURFUS, 1997; ROBERTS; ROTH; PERROY, 2011; USTIN et al., 2009). Portanto, o PRI é um *proxy* viável para a medição da eficiência de uso de luz PSII (ZHANG et al., 2016).

Usando as mudanças de forma e posição da região espectral do limite do vermelho, o RSVI (*Red-edge Vegetation Stress Index*) pode ser a condições de estresse para plantas (MERTON; HUNTINGTON, 1999; ROBERTS; ROTH; PERROY, 2011). Essa região é a transição da região visível para a região do infravermelho próximo, que é resultado da reflectância do comprimento de onda do vermelho (RED, visível) e do infravermelho próximo (NIR). A região do visível é determinada pelos pigmentos fotossintetizantes, enquanto o NIR é governado pela estrutura foliar (GATES et al., 1965; GAUSMAN, 1985). Sob um alto estresse, um RSVI ligeiramente negativo ou positivo é encontrado devido à forma do limite do vermelho côncava ascendente (MERTON, 1998; MERTON; HUNTINGTON, 1999; ROBERTS; ROTH; PERROY, 2011).

### *Análises estatísticas*

Os testes de variância foram feitos por meio de ANOVA, quando os dados seguiram uma distribuição normal, caso contrário, o teste de Kruskal Wallis foi utilizado. Para cada índice foram investigadas as diferenças na variação de valores entre fitofisionomias e entre espécies de cada fitofisionomia. Nos dados que foram estatisticamente diferentes com nível de 95% de significância, de acordo com o ANOVA, o teste de média de Tukey foi feito para avaliar a

separação da média em cada índice de reflectância da folha. Todas as análises foram feitas usando R software (THE R CORE TEAM, 2016).

## Resultados

Ao todo foram coletados e analisados 41 espectros, um espectro médio foi obtido para cada espécie em cada fitofisionomia, sendo de 3 a 5 espectros por espécie coletadas (Figura 2).

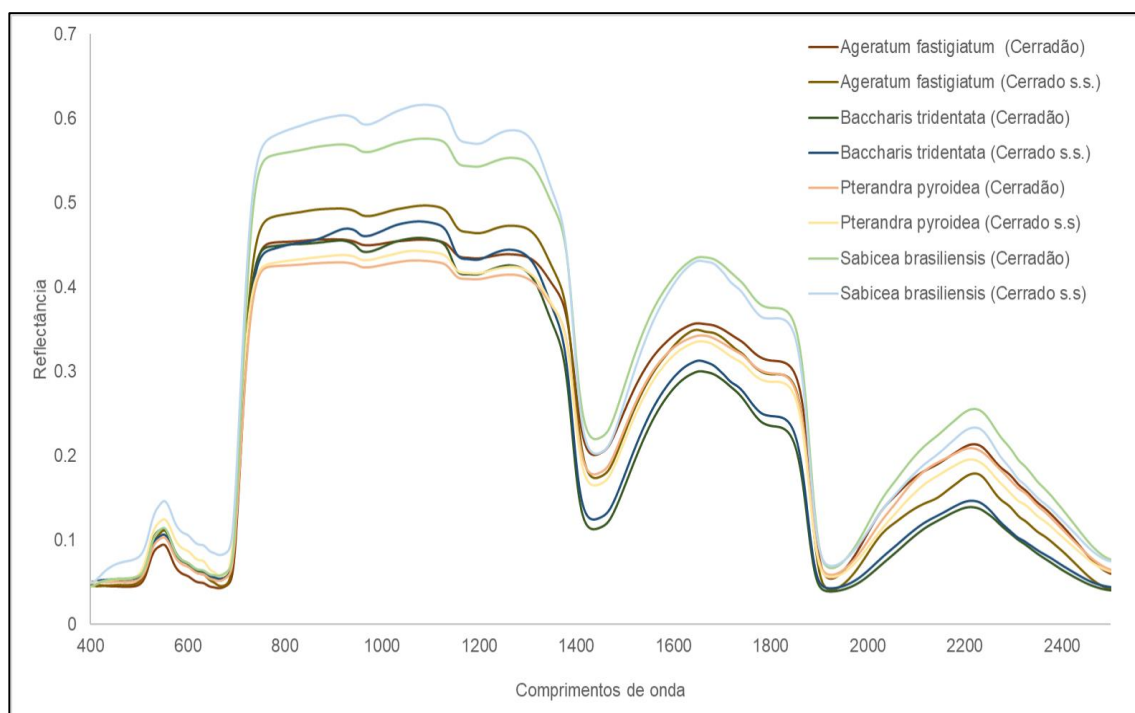


Figura 2. Comportamento espectral médio por espécie coletada em cada fitofisionomias trabalhadas: Cerradão e Cerrado *stricto sensu* (Cerrado s.s.).

Dos quatro índices calculados (ARI, CRI, PRI, RVSI) apenas dois índices exibiram diferenças significativa entre as fitofisionomias Cerradão e o Cerrado *stricto sensu*: CRI ( $p = 0.036$ ,  $F = 4.746$ ) e PRI ( $p < 0.001$ ,  $F = 17.188$ ). Em ambos índices, os maiores valores foram encontrados nas espécies do Cerradão. Os valores negativos encontrados para o índice RVSI nas duas fitofisionomias indicam que não há uma condição de estresse que afeta as qualidades fisiológicas (quantidade de clorofila, por exemplo) e morfológicas das espécies coletadas (figura 3 A-D).

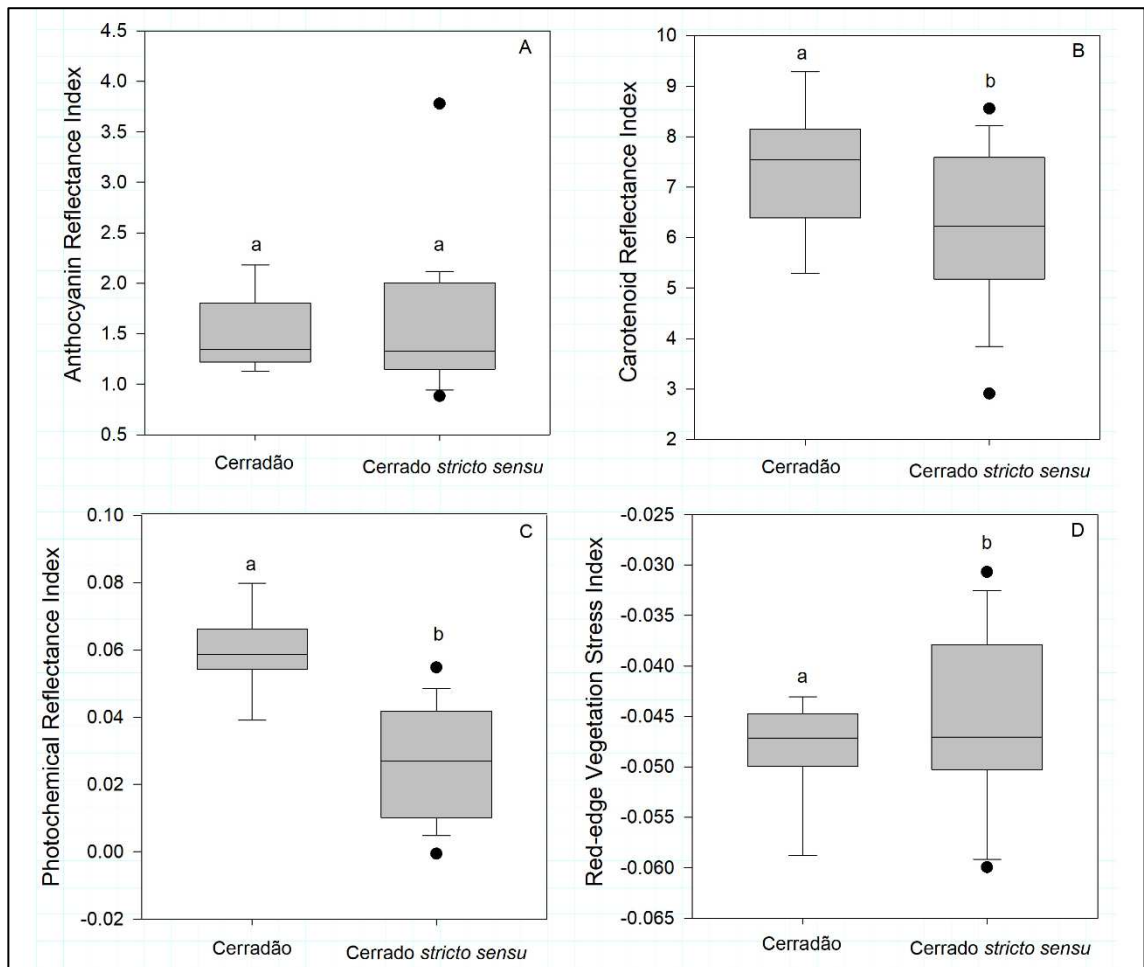


Figura 3. Distribuição dos valores de cada índice calculado (A-ARI, B-CRI, C-PRI D-RVSI) dos índices de vegetação entre as fisionomias trabalhadas, Cerrado sensu stricto e Cerradão. Os boxplots mostram a mediana para cada característica por grupo (linha horizontal escura), intervalo interquartil (caixas) e intervalo de dados (traços), além disso, para cada índices calculados o conjunto de dados com diferenças significativas a  $p < 0.05$  foram indicados com letras diferentes.

Quando consideramos as fitofisionomias separadamente, foi possível verificar para cada índice, variações entre as espécies. No Cerrado *stricto sensu*, três dos índices calculados mostraram diferenças significativas: CRI ( $p = 0.015$ ,  $F = 4.74$ ) e PRI ( $p = 0.00925$ ,  $F = 5.402$ ), RVSI ( $p = 0.00135$ ,  $F = 8.455$ ) (Figura 4A-D). O teste de comparações de médias Tukey HSD indicou que para o índice de CRI, *S. brasiliensis* e *A. fastigiatum* foram diferentes entre si ( $p = 0.0087$ ), sendo os maiores valores, os de *A. fastigiatum* (Figura 4B). Enquanto para o índice PRI as médias significativamente diferentes foram entre *S. brasiliensis* e *B. tridentata* ( $p = 0.006$ ), sendo *B. tridentata*, a espécie com os valores mais altos (Figura 4C). Para os valores de RVSI, a diferença foi entre *S. brasiliensis* e *P.*

*pyroidea* ( $p < 0.001$ ), com a *P. pyroidea* apresentando os maiores valores (Figura 4D).

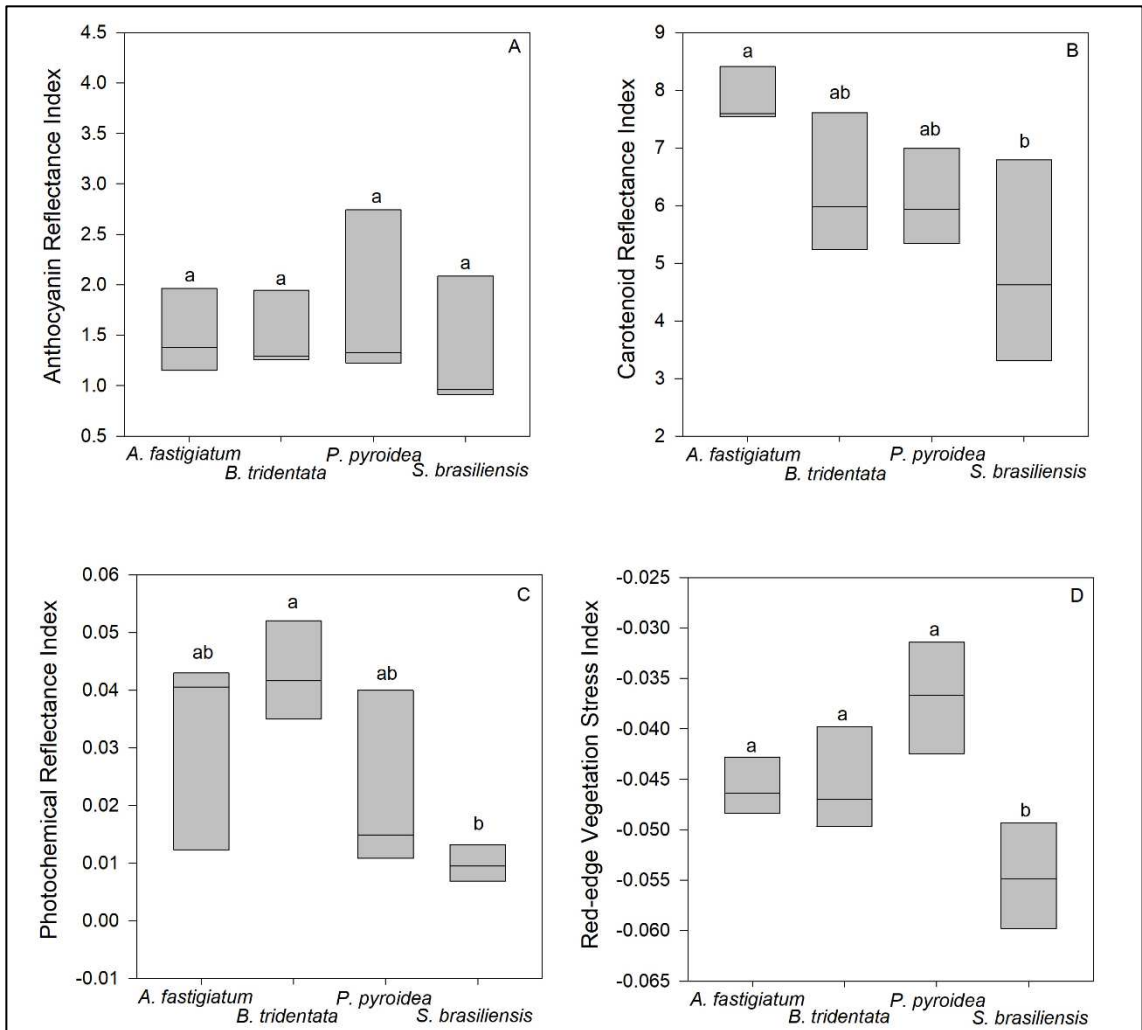


Figura 4. Distribuição dos valores dos índices (A-ARI, B-CRI, C-PRI D-RVSI) encontrados para cada espécie coletada na área de Cerrado *stricto sensu*. Os boxplots mostram a mediana para cada característica por grupo (linha horizontal escura), intervalo interquartil (caixas) e intervalo de dados, além disso, para cada índices calculados o conjunto de dados com diferenças significativas a  $p < 0.05$  foram indicados com letras diferentes

No Cerradão, menos índices apresentaram diferenças significativas entre as espécies, dos quatro apenas dois mostraram espécies com valores diferentes: PRI ( $p=0,005$ ,  $F =6,559$ ) e RVSI ( $H=8,7195$ , 3 d.f,  $p=0,03$ ) (Figura 5A-D). Com o teste de comparação entre médias para os valores de PRI, *A. fastigiatum* apresentou diferenças das demais com os maiores valores de PRI (Figura 5C). Enquanto para o índice RVSI, a distribuição de dados não foi normal então foi realizado um teste não paramétrico e os resultados mostraram diferença significativa, assim foi realizado o método Dunn de

comparação de grupos. O teste mostrou a *S. brasiliensis* como a mais diferente das demais espécies, com os menores valores (Figura 5D). Esses valores baixos nos índices encontrados para a espécie *S. brasiliensis* possivelmente é devido a grande quantidade de pelos em sua superfície foliar que aumentam suas taxas de reflectância e reduzindo assim os valores dos índices.

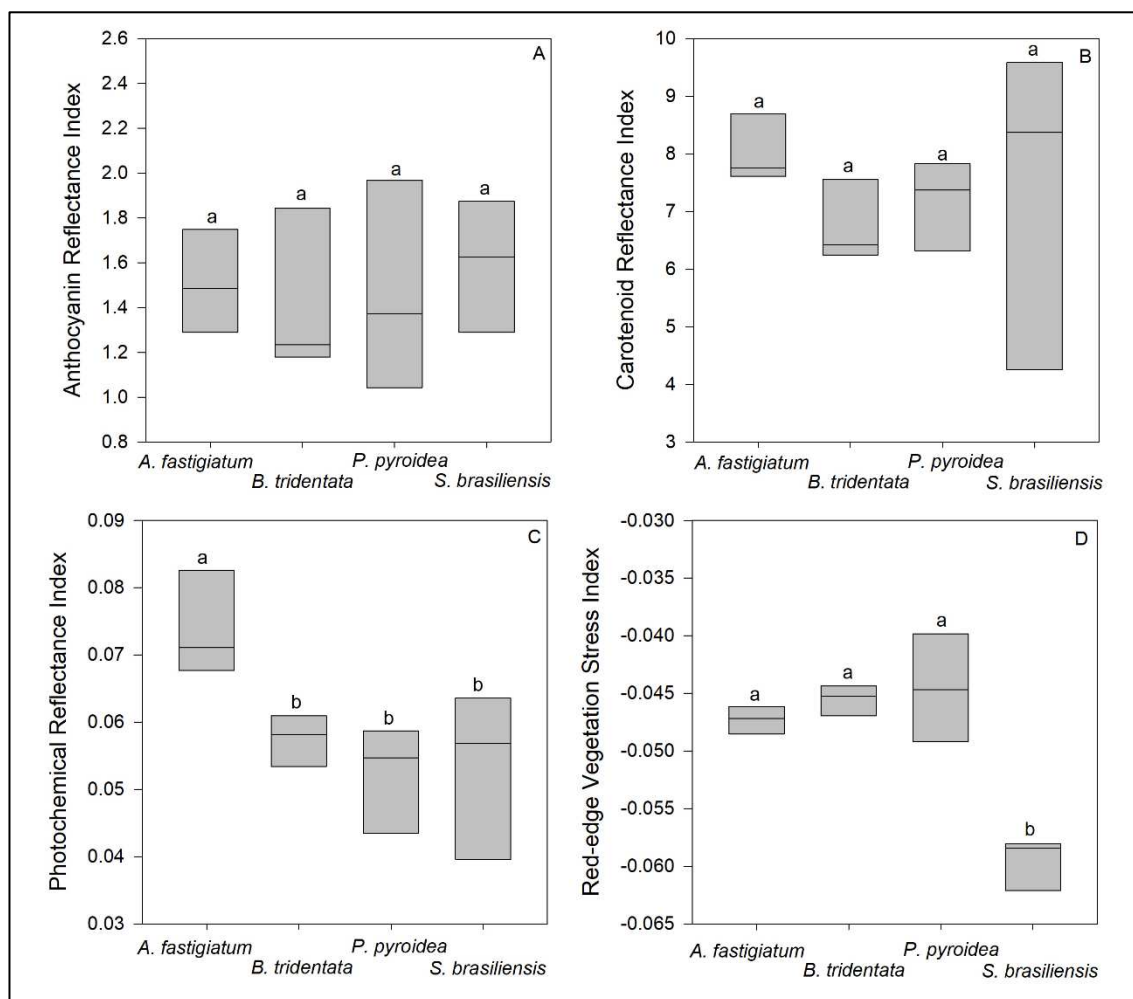


Figura 5. Distribuição dos valores dos índices (A-ARI, B-CRI, C-PRI D-RVSI) encontrados para cada espécie coletada na área de Cerradão. Os boxplots mostram a mediana para cada característica por grupo (linha horizontal escura), intervalo interquartil (caixas) e intervalo de dados, além disso, para cada índices calculados o conjunto de dados com diferenças significativas a  $p < 0.05$  foram indicados com letras diferentes

## Discussão

O uso dos índices possibilitou visualizar diferenças nas proporções dos pigmentos e no status no conjunto de espécies entre as fitofisionomias e dentro das fitofisionomias, e, assim, viabilizou a discussão respeito de possíveis

estratégias as quais as plantas se dispõem para sobreviverem no Cerrado sob diferentes intensidades luminosas.

O índice PRI mostrou haver discrepância entre fitofisionomias em relação proporção de clorofilas e carotenóides, e na eficiência no uso da luz. Esse índice detecta o ciclo da xantofila, que funciona como um dissipador de energia, prevenindo a fotoxidação dos centros de reação (fotossistema II, PSII) (DEMMIG-ADAMS; ADAMS; ADAMS III, 1992; LATOWSKI; KUCZYŃSKA; STRZAŁKA, 2011). Essa variação encontrada retrata as diferenças de adaptabilidade das espécies entre as duas fisionomias. O Cerrado *stricto sensu*, por apresentar uma estrutura de vegetação predominantemente herbacea-subarbustiva, a quantidade de luz e, conseqüentemente, a quantidade de energia é bem maior que a do Cerradão que, por sua vez, é formada em sua maioria por lenhosas que formam um dossel (CARLOS; ROSSATTO, 2017; MIURA; HUETE, 2003; PINHEIRO; KOLB; ROSSATTO, 2016). Isso poderia ser um dos motivos pelo qual as espécies do Cerradão apresentaram maiores valores de PRI, o que indicaria uma maior eficiência no uso da luz. A luminosidade é um importante fator que guia a estequiometria dos nutrientes das plantas. Indivíduos no Cerradão particionam uma grande fração do seu nitrogênio foliar para captura de energia, enquanto no Cerrado *stricto sensu*, devido à grande quantidade de energia que chega, realocam seus recursos para a proteção dos seus centros de reação (HALLIK; NIINEMETS; KULL, 2012; ROELOFSEN et al., 2014). Um exemplo de proteção seria o ciclo da xantofila, que permite dissipar a energia em excesso na forma de fluorescência e calor e, com isso, reduz a capacidade fotossintética, considerando a diminuição de energia a ser absorvida pelos cloroplastos (DEMMIG-ADAMS, 1998; LATOWSKI; KUCZYŃSKA; STRZAŁKA, 2011). Diversos trabalhos já revelaram a sensibilidade desse índice em expressar a capacidade fotossintética tanto em nível de dossel como foliar (BAEK et al., 2017; GAMON; SERRANO; SURFUS, 1997; GAMON; SURFUS, 1999; GARBULSKY et al., 2011; GUO; TROTTER, 2006; SOUDANI et al., 2014; ZHANG et al., 2016). No estudo de Baek et. al. (2017), por meio do PRI, foi possível averiguar diferentes capacidades adaptativas de plantas, ao local em que crescem.

Outra relação do PRI é com a taxa de carotenóide/clorofila nas folhas (GARRITY; EITEL; VIERLING, 2011; SIMS; GAMON, 2002), que parece estar em conformidade com os resultados do índice de carotenóides (CRI). A variação de luminosidade também poderia interferir na quantidade de carotenóides. O índice CRI mostrou haver maior quantidade nas espécies do Cerradão. Os carotenóides apresentam diversas funções dentro dos processos de fotossíntese, entre essas, a de fotoprotetor. Além da clorofila, esse pigmento acessório também participa da captura de fótons e da transferência de energia para os centros de reação (BRITTON, 1996; DEMMIG-ADAMS; GILMORE; ADAMS, 1996). Possivelmente, a maior quantidade de carotenóides nessas espécies do Cerradão estaria voltada para a necessidade de uma maior captação de luz (HALLIK; NIINEMETS; KULL, 2012). A mudança nas proporções de componentes de captura de elétrons e de fotoproteção altera a relação entre taxa de carotenóide/clorofila, e o PRI (GITELSON; GAMON; SOLOVCHENKO, 2017).

Quanto aos demais índices calculados não indicaram uma variação significativa entre as fitofisionomias. O índice RVSI foi formulado para identificar mudanças no formato da região do limite do vermelho, onde é influenciado pelos pigmentos, referente à região do visível, e pela estrutura foliar relacionada com a região do NIR (CURRAN, 1989; GATES et al., 1965). Assim, o índice exibe as mudanças ambientais que poderiam ter ocasionado uma "tensão" nos aparatos fisiológicos e morfológicos das plantas gerando um estresse (MERTON; HUNTINGTON, 1999). Os valores negativos e a diferença não significativa possivelmente, mostram, boa adaptação às condições adversas, ou seja, mesmo em uma condição considerada estressante (excesso ou escassez de luz) seus processos fisiológicos não são afetados negativamente. Uma possível explicação esse "não estresse" poderia ser graças à capacidade plástica das espécies do cerrado. No trabalho de Carlos e Rossato. (2017), eles descobriram que as espécies que cresciam ao longo do gradiente do cerrado apresentavam uma plasticidade em relação aos seus traços foliares e fisiológicos.

Contribuindo para essa condição de não estresse, os resultados para índice de antocianinas (ARI) também não mostraram diferenças entre as duas fitofisionomias. A produção deste pigmento está intimamente relacionada as

condições de estresse em que são submetidas as plantas (CHALKER-SCOTT, 1999) provavelmente a produção é similar entre as fitofisionomias porque as plantas já estão adaptadas a essas variações, assim, não há necessidade de uma maior produção deste composto.

As espécies do estrato herbáceo-subarbusivo precisam de uma quantidade mínima de energia (luz) para se desenvolverem e normalmente estão adaptadas a altas radiações (CARLOS; ROSSATTO, 2017; GRIME, 2006; PINHEIRO; KOLB; ROSSATTO, 2016). No Cerradão, a luz que chega nesse estrato herbáceo-subarbusivo é reduzida, mas as espécies são capazes de desenvolverem estratégias para uma maior captação de luz, seja mudando a realocação de recursos ou a sua morfologia (NIINEMETS, 2010). Essa capacidade permite a presença de espécies não-arbóreas em áreas de Cerradão, repercutindo na riqueza e na diversidade dessas espécies nessas áreas (CARLOS; ROSSATTO, 2017; GOULART et al., 2011; PINHEIRO; KOLB; ROSSATTO, 2016). (2017)

Dentro das fitofisionomias, os índices mostraram diferença entre certas características fisiológicas das espécies. No Cerrado *stricto sensu*, as espécies se diferenciaram mais que no Cerradão, ou seja, mais índices com diferenças significativas foram encontrados entre as espécies (CRI, PRI e RVSI, no Cerrado *stricto sensu*; PRI CRI e PRI no cerradão). As condições no Cerrado *stricto sensu* são mais extremas do que no Cerradão, em termos de temperatura e luz, o que, possivelmente, induz as espécies ao uso das suas capacidades plástica de maneiras diferentes (CARLOS; ROSSATTO, 2017). Por serem espécies de famílias ou grupos diferentes, supostamente todas as espécies deveriam apresentar alguma diferença entre si, em pelo menos algum índice; mostrando assim diferenças entre si tanto morfologicamente quanto fisiologicamente. Mesmo assim algumas espécies apresentaram valores de índices com distribuição similar, o que indicaria o uso de estratégias similares para lidarem com as condições adversas.

Dentro do Cerrado *stricto sensu*, merece destaque a espécie *S. brasiliensis*, que apresentou os menores valores nos índices e apresentava diferenças significativas entre algumas espécies. Provavelmente, as estratégias adaptativas usadas estão mais ligadas à morfoanatomia do que à fisiologia. Em observações de campo, foi possível analisar que suas folhas eram cobertas por pelos (tricomatas), característica que confere à planta uma capacidade de dissipar a radiação, o calor e reter a água (Figura 2). A presença de tricomas que interfere na reflectância da região do visível e do NIR, afetando os valores dos índices que incluem esse espectros (EHLERINGER; BJÖRKMAN, 1978).



Figura 2. Folha pilosa presente nas espécies de *S. brasiliensis* encontradas nas fisionomias de Cerrado. Foto: Müller, L A C.

Em relação ao Cerradão, a condição diferencial é a baixa taxa de luminosidade devido ao dossel formado pelas árvores. Os menores valores encontrados para *S. brasiliensis* em RVSI, provavelmente, são reflexo da sua morfologia foliar que alterou a taxa de reflectância assim como pontuado no Cerrado *stricto sensu* devido à contribuição da morfoanatomia de suas folhas, diferente das demais espécies. Além da *S. brasiliensis* outra espécie se destacou: *A. fastigiatum*. Em observação no campo, as suas folhas são aparentemente finas, pequenas e bem membranáceas, o que poderia conferir à planta uma vantagem na captação de luz em relação às demais. *A. fastigiatum* apresentou os maiores valores para PRI, o que pode ser reflexo da sua estrutura morfoanatômica em conjunto com sua fisiologia. A distribuição desta espécie é

ampla, têm-se registro em várias regiões, em diferentes ambientes, inclusive em áreas antrópicas (DEL-VECHIO-VIEIRA et al., 2008).

## **Conclusão**

As fitofisionomias apresentam condições diferentes que influenciam tanto fisiologicamente quanto morfológicamente as espécies que elas abrigam. O uso de índices de vegetação, permitiu deduzir sobre as estratégias utilizadas para as plantas se mantenham sob essas condições adversas, sem a necessidade de experimentos. O PRI, por exemplo, demonstrou as diferenças entre o uso eficiente da luz entre as duas fitofisionomias são diferentes, sendo os indivíduos do cerrado os com maiores eficiências. Além disso, mostrou o uso similar e diferente entre espécies sob mesmas condições.

Os índices como ferramenta ecológica mostrou ser promissor, uma vez que não necessite de experimentos e custos elevados. Ainda são necessários maiores estudos sobre quais as relações dos traços espectrais com os traços foliares para as espécies do estrato herbáceo-subarbusivo para maiores conclusões, principalmente para as espécies do Cerrado.

## **Referências bibliográficas**

- AKULA, R.; RAVISHANKAR, G. A. Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. **Plant Signaling & Behavior**, v. 6, n. 11, p. 1720–1731, 2011.
- ALMEIDA, A. M.; PRADO, P. I.; LEWINSOHN, T. M. Geographical distribution of Eupatorieae (Asteraceae) in South-eastern and South Brazilian mountain ranges. **Plant ecology**, v. 174, n. 1, p. 163, 2004.
- ANDERSON, C. Revision of Pterandra (Malpighiaceae). 1997.
- ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 64, n. 3, p. 234, 1997.
- ASNER, G. P. et al. Leaf chemical and spectral diversity in Australian tropical forests. **Ecological Applications**, v. 19, n. 1, p. 236–253, 2009.

ASNER, G. P.; MARTIN, R. E. Spectral and chemical analysis of tropical forests: Scaling from leaf to canopy levels. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3958–3970, 2008.

BAEK, H. et al. Developmental Changes of the Photochemical Reflectance Index (PRI), Chlorophyll Fluorescence and Leaf Pigments Show the Adaptability of Trees to Local Environments. **American Journal of Plant Sciences**, v. 8, p. 1–13, 2017.

BARROSO, G. M. Sistemática de angiospermas do Brasil. 1978.

CARLOS, N. A.; ROSSATTO, D. R. Leaf traits combinations may explain the occurrence of savanna herbaceous species along a gradient of tree encroachment. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 29, n. 3, p. 155–163, 5 set. 2017.

CHALKER-SCOTT, L. Environmental significance of anthocyanins in plant stress responses. **Photochemistry and photobiology**, v. 70, n. 1, p. 1–9, 1999.

CURRAN, P. J. Remote sensing of foliar chemistry. **Remote Sensing of Environment**, v. 30, n. 3, p. 271–278, 1989.

DANNER, M. et al. Spectral Sampling with the ASD FieldSpec 4–Theory, Measurement, Problems, Interpretation. EnMAP Field Guides Technical Report. GFZ Data Services. 2015.

DELPRETE, P. G.; SMITH, L. B.; KLEIN, R. M. Rubiáceas (gêneros de AG). **Flora ilustrada catarinense. Itajaí, Herbário Barbosa Rodrigues**, p. 1–345, 2004.

DEL-VECHIO-VIEIRA, G. et al. Caracterização morfoanatômica de *Ageratum fastigiatum* (Asteraceae). **Brazilian Journal of Pharmacognosy**, v. 18, n. SUPPL., p. 769–776, dez. 2008.

DEMMIG-ADAMS, B.; ADAMS, W. W. Responses of plants to high light stress. **Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.**, v. 43, p. 599–626, 1992.

DEMMIG-ADAMS, B.; ADAMS, W. W.; ADAMS III, W. W. Photoprotection and other responses of plants to high light stress. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Microbial Biology**, v. 43, n. 1, p. 599–626, jun. 1992.

- EHLERINGER, J. R. J.; BJÖRKMAN, O. Pubescence and leaf spectral characteristics in a desert shrub, *Encelia farinosa*. **Oecologia**, v. 36, n. 2, p. 151–162, 1978.
- EITEN, G. The cerrado vegetation of Brazil. **The Botanical Review**, v. 38, n. 2, p. 201–341, 1972.
- ELEMANS, M. Light, nutrients and the growth of herbaceous forest species. **Acta Oecologica**, v. 26, n. 3, p. 197–202, 2004.
- FERREIRA, L. G.; HUETE, A. R. Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 10, p. 1837–1860, 2004.
- FILGUEIRAS, T. S. Herbaceous plant communities. **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**, p. 121–139, 2002.
- FOLEY, S. et al. Foliar spectral properties following leaf clipping and implications for handling techniques. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, n. 3, p. 265–275, 2006.
- FRANCENER, A. **Pterandra in Flora do Brasil 2020 em construção**. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB25721>>. Acesso em: 7 dez. 2017.
- GAMON, A. J. A.; SERRANO, L.; SURFUS, J. S. The Photochemical Reflectance Index: An Optical Indicator of Photosynthetic Radiation Use Efficiency across Species, Functional Types, and Nutrient Levels. **Oecologia**, v. 112, n. 4, p. 492–501, 1997.
- GATES, D. M. et al. Spectral Properties of Plants. **Applied Optics**, v. 4, n. 1, p. 11, 1965.
- GAUSMAN, H. W. Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light. **Graduate studies/Texas Tech University (USA)**, 1985.
- GITELSON, A. A. et al. Assessing Carotenoid Content in Plant Leaves with Reflectance Spectroscopy. **Photochemistry and Photobiology**, v. 75, n. 3, p. 272–281, 2002.

- GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N.; CHIVKUNOVA, O. B. Optical Properties and Nondestructive Estimation of Anthocyanin Content in Plant Leaves. **Photochemistry and Photobiology**, v. 74, n. 1, p. 38, 1 maio 2001.
- GIULIANO, D. A. Clasificación infragenérica de las especies argentinas de *Baccharis* (Asteraceae, Astereae). **Darwiniana**, p. 131–154, 2001.
- GIVNISH, T. J. Adaptation to Sun and Shade: A whole-plant Perspective. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 15, n. 2, p. 63–92, 1988.
- GOULART, M. F. et al. Which Extent is Plasticity to Light Involved in the Ecotypic Differentiation of a Tree Species from Savanna and Forest? **Biotropica**, v. 43, n. 6, p. 695–703, 2011.
- GRIME, J. P. Trait convergence and trait divergence in herbaceous plant communities: mechanisms and consequences. **Journal of Vegetation Science**, v. 17, n. 2, p. 255–260, 2006.
- GUO, J. M.; TROTTER, C. M. Assessing light-dependent down-regulation of photosynthesis using the photochemical reflectance index (PRI). **Journal of Spatial Science**, v. 51, n. 2, p. 67–78, dez. 2006.
- HANBA, Y. T.; KOGAMI, H.; TERASHIMA, I. The effect of growth irradiance on leaf anatomy and photosynthesis in *Acer* species differing in light demand. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, n. 8, p. 1021–1030, ago. 2002.
- LATOWSKI, D.; KUCZYŃSKA, P.; STRZAŁKA, K. Xanthophyll cycle – a mechanism protecting plants against oxidative stress. **Redox Report**, v. 16, n. 2, p. 78–90, 19 mar. 2011.
- LAURETO, L. M.; CIANCIARUSO, M. V. Trait distribution patterns in savanna and forest plant assemblages and their relationship with soil features. **Plant Ecology**, v. 216, n. 4, p. 629–639, 2015.
- LINDA, C.-S.; CHALKER-SCOTT, L. Invited Review Environmental Significance of Anthocyanins in Plant Stress Responses. **Photochemistry and Photobiology**, v. 70, n. 1, p. 1–9, 1999.
- MEERDINK, S. K. et al. Linking seasonal foliar traits to VSWIR-TIR spectroscopy across California ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 186, p. 322–338, 2016.

MERTON, R. Monitoring community hysteresis using spectral shift analysis and red-edge vegetation stress index. In **proceedings of the seventh annual JPL airborne geoscience workshop, AVIRIS workshop**, p. <http://www.bees.unsw.edu.au/school/staff/merton/jp>, 1998.

MERTON, R.; HUNTINGTON, J. Early Simulation Results of the Aries-1 Satellite Sensor for Multi-Temporal Vegetation Research Derived From Aviris. **Proceedings of the Eighth Annual JPL ...**, n. January 1999, p. 1–10, 1999.

MERZLYAK, M. N. et al. Application of Reflectance Spectroscopy for Analysis of Higher Plant Pigments. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 50, n. 5, 2003.

MIURA, T.; HUETE, A. Discrimination and biophysical characterization of Cerrado physiognomies with EO-1 hyperspectral Hyperion. **Simpósio Brasileiro de ...**, v. 1, p. 1077–1082, 2003.

NERI, A. V. **Gradiente pedológico-vegetacional de cerrado em Paraopeba, MG**. [s.l.] Tese (Doutorado em Botânica)–Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

NERI, A. V. et al. the Influence of Soils on the Floristic Composition and Community Structure of an Area of Brazilian Cerrado Vegetation. **Edinburgh Journal of Botany**, v. 69, n. 01, p. 1–27, 2012.

NIINEMETS, Ü. A review of light interception in plant stands from leaf to canopy in different plant functional types and in species with varying shade tolerance. **Ecological Research**, v. 25, n. 4, p. 693–714, 2010.

PEARCY, R. W. Responses of plants to heterogeneous light environments. In: **Functional Plant Ecology**. [s.l: s.n.]. p. 213–257.

PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; GAMON, J. A. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. **New Phytologist**, v. 131, n. 3, p. 291–296, 1 nov. 1995.

PERRY, E. M.; ROBERTS, D. A. Sensitivity of narrow-band and broad-band indices for assessing nitrogen availability and water stress in an annual crop. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 4, p. 1211–1219, 2008.

- PINHEIRO, L. F. S.; KOLB, R. M.; ROSSATTO, D. R. Changes in irradiance and soil properties explain why typical non-arboreal savanna species disappear under tree encroachment. **Australian journal of botany**, v. 64, n. 4, p. 333–341, 2016.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. [s.l.] Oficina de Textos, 2015.
- RIBEIRO, J. F., & WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. **Cerrado : ambiente e flora**, p. 556, 1998.
- RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma cerrado in: Sano, SM; Almeida, SP; Ribeiro, JF Cerrado: Ecologia e flora. **Brasília: Embrapa Informação Tecnológica**, 2008.
- RIVERA, V. . **Flora do Brasil - Ageratum fastigiatum (Gardner) R.M.King & H.Rob.** Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB15936>>. Acesso em: 29 jan. 2018.
- ROBERTS, D. A.; ROTH, K. L.; PERROY, R. L. **Hyperspectral Vegetation Indices**. [s.l.] CRC Press, 2011.
- SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A. et al. Differences in leaf traits, leaf internal structure, and spectral reflectance between two communities of lianas and trees: Implications for remote sensing in tropical environments. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 10, p. 2076–2088, 2009.
- SILVA-JÚNIOR, M. C. Composição Florística e parâmetros fitossociológicos do cerrado e sua relação com o solo na Estação Florestal de Experimentação de Paraopeba. **Viçosa, MG: UFV. 130p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)–Universidade Federal de Viçosa**, 1984.
- SOUZA, S. P. et al. Óleo essencial de *Baccharis tridentata* Vahl: composição química, atividade antioxidante e fungitóxica, e caracterização morfológica das estruturas secretoras por microscopia eletrônica de varredura. **Rev. Bras. Pl. Med., Botucatu**, v. 13, n. 4, p. 456–466, 2011.
- THE R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing. Reference Index. Version 3.3.0 Patched (2016-05-09)**. [s.l.] ISBN 3-900051-07-0, 2016.

USTIN, S. L. et al. Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. S67–S77, 2009.

USTIN, S. L.; GAMON, J. A. Remote sensing of plant functional types. **New Phytologist**, v. 186, n. 4, p. 795–816, 2010.

VANDVIK, V.; BIRKS, H. J. B. Pattern and process in Norwegian upland grasslands: a functional analysis. **Journal of Vegetation Science**, v. 13, n. 1, p. 123–134, 2002.

WANG, H. et al. Hyperspectral Remote Sensing Monitoring of Grassland Degradation. **Spectroscopy and Spectral Analysis**, v. 30, n. 10, p. 2734–2738, 1 out. 2010.

XUE, J.; SU, B. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. **Journal of Sensors**, v. 2017, p. 1–17, 2017.

ZHANG, C. et al. Affecting factors and recent improvements of the photochemical reflectance index (PRI) for remotely sensing foliar, canopy and ecosystemic radiation-use efficiencies. **Remote Sensing**, v. 8, n. 9, p. 677, 2016.

## **CAPÍTULO II: Propriedades espectrais associadas aos traços anatômicos de *Pterandra pyroidea* A. Juss.**

### **Resumo:**

A folha é um dos órgãos vegetativos da planta que participa de importantes processos fisiológicos. Suas características biofísicas e bioquímicas interagem com a radiação eletromagnética e conferem às plantas características espectrais foliares. Com isso, a nossa hipótese é que existe correlação entre traços anatômicos foliares e o comportamento espectral de *Pterandra pyroidea* A. Juss. Para isso, foram coletadas folhas de 13 indivíduos para medições espectrais (região do visível, infravermelho, infravermelho de ondas curtas e espectro total) e para medições de espessuras (parede periclinal externa, epiderme, mesofilo, paliçádico, esponjoso e folha). Foi realizada uma regressão de quadrados mínimos parciais (PLSR) e a validação cruzada para verificar a correlação entre cada traço foliar e cada região do espectro. Os 18 modelos gerados tiveram o coeficiente de determinação da calibração ( $R^2_{cal}$ ) de 0.008 a 0.867 e erro quadrático médio (RMSE) de 2,38 a 39,43%, sendo os melhores coeficientes, os do espectro total (0,4-2,5  $\mu\text{m}$ ) para a predição dos traços. A região do infravermelho próximo (NIR, de 0,7-1,3  $\mu\text{m}$ ) mostrou correlação moderada com a espessura foliar, com mesofilo e parênquima paliçádico, apresentando  $R^2_{cal}$  de aproximadamente 0.5. Enquanto para as outras regiões, a correlação foi considerada moderada ou fraca. Os modelos encontrados não forneceram predições ou correlações satisfatórias, mesmo com resultados semelhantes aos encontrados na literatura. Mesmo algumas correlações possuindo coeficientes altos, ainda é preciso maior aprofundamento na análise.

**Palavras chaves:** predição de traços, anatomia foliar, PLSR, Cerrado

## Introdução

A folha participa de vários processos fisiológicos, dentre esses a fotossíntese, em que é necessário a absorção de energia proveniente do Sol (comprimento de ondas de 0,4 a 0,7 $\mu$ m) (GATES et al., 1965; GAUSMAN, 1985; PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2015). Além disso, é um órgão de maior plasticidade fenotípica, podendo revelar fortemente os fatores ambientais que influenciam nas suas estruturas internas e externas (BIERAS; DAS GRAÇAS SAJO, 2009; CARLOS; ROSSATTO, 2017; FRANCO et al., 2005; ROSSATTO; KOLB; FRANCO, 2015). Devido as características biofísicas e bioquímicas foliares, a interação da radiação eletromagnética do sol com as folhas confere às plantas características espectrais foliares (ASNER, 1997; ASNER et al., 2009; USTIN et al., 2009). Nesse órgão, no intervalo espectral do visível (VIS, entre 0,4-0,7  $\mu$ m) a energia absorvida por clorofilas e pigmento, enquanto na região do infravermelho próximo (NIR, entre 07-1,3  $\mu$ m) ocorre uma reflectância devido as estruturas internas e espalhamento da radiação (interface parede celular – espaços gasosos). Entre as regiões NIR e infravermelho (SWIR, 1,4-2,5  $\mu$ m) a absorção é em consequência das ligações O-H (água e compostos bioquímicos) (GATES et al., 1965; GAUSMAN, 1985). A radiação interage com diversas estruturas internas e externas: ceras ou tricomas na epiderme, pigmentos, parênquimas com células variando a compactação (paliçádico e esponjoso); isso faz com que essa energia seja absorvida, transmitida ou refletida de maneiras diferentes (BIERAS; DAS GRAÇAS SAJO, 2009; EHLERINGER; BJÖRKMAN, 1978; SÁNCHEZ-AZOFEIFA et al., 2009; SLATON et al., 2001).

Em consequência da interação folha e radiação é possível a mensuração da variação da reflectância que é não destrutiva dessas características espectrais, abrindo portas para diversos estudos envolvendo traços foliares e traços espectrais (ASNER; MARTIN, 2008; HOMOLOVA; MALENOVSKÝ; CLEVERS, 2013; USTIN et al., 2009). Através da espectroscopia, permitiu-se analisar variações na quantidade de pigmentos presentes nas folhas, como clorofila e carotenóides (ASNER et al., 2009; KARLOVSKA et al., 2015; SÁNCHEZ-AZOFEIFA et al., 2009) assim como variações nas estruturas foliares, como cutícula (LU, 2013) ou outras estruturas da epiderme (EHLERINGER; BJÖRKMAN, 1978; HEIM et al., 2015). Também estruturas

internas, como mesófilo (CASTRO; SANCHEZ-AZOFEIFA, 2008; CASTRO-ESAU et al., 2006; SÁNCHEZ-AZOFEIFA et al., 2009).

Variações internas e externas em uma planta podem ser resultados de condições ambientais as quais elas são exposta, como a disponibilidade de luz, que também influencia na montagem de comunidade, devido à sua distribuição heterogênea no espaço e no tempo (AKULA; RAVISHANKAR, 2011; ELEMANS, 2004; GIVNISH, 1988; HANBA; KOGAMI; TERASHIMA, 2002; PEARCY, 1999; PINHEIRO; KOLB; ROSSATTO, 2016). Essas variações internas, ou seja, nos traços anatômicos permitem compreender processos ecológicos de uma comunidade (HLWATIKA; BHAT, 2002) ou em espécies que se distribuem em condições discrepantes (MARQUES et al., 2000; RÔÇAS; SCARANO; BARROS, 2001).

O Domínio Cerrado é considerado uma savana neotropical ou *Brasilian* savana, devido as relações ecológicas e fisionômicas de complexo vegetacional que apresenta (EITEN, 1972; RIBEIRO; WALTER, 2008). As fisionomias de Cerrado são muito distintas em relação à disponibilidade de luz, porque a cobertura da vegetação varia em densidade de árvores, arbustos e plantas herbáceas (FERREIRA; HUETE, 2004; RIBEIRO, J. F., & WALTER, 1998). Essa discrepância entre ambientes pode influenciar na estruturas internas das espécies que estão distribuídas nesse dois ambientes com diferentes intensidades luminosas (MARQUES et al., 2000; ROSSATTO; KOLB; FRANCO, 2015)

Com a distribuição de luz heterogênea entre as fitofisionomias de Cerrado seria possível correlacionar os traços estruturais da folha e o comportamento espectral, sendo assim, possível prever os traços anatômicos usando as assinaturas espectrais. Assim, o presente estudo tem como objetivos: I) correlacionar a variação dos traços foliares e o comportamento espectral da folha em *Pterandra pyroidea*; II) Encontrar um modelo adequado para a predição dos traços por meio do comportamento espectrais.

## Materiais e métodos

### Área de estudo

A área de estudo foi a Floresta Nacional de Paraopeba (FLONA de Paraopeba), situa-se no Estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil ( $19^{\circ}20' S$ ,  $44^{\circ}20' W$ ), com altitudes entre 734 m ao sul a 750 m ao norte (Figura 1). A FLONA possui 200 ha de área e encontra-se em regeneração e protegida desde 1952, além disso o ultimo registro de queimada foi em 1963 (SILVA-JÚNIOR, 1984). O clima da região é caracterizado como tropical úmido (Aw, pelo sistema Koeppen), com uma estação chuvosa e uma seca bem definidas (NERI, 2007).

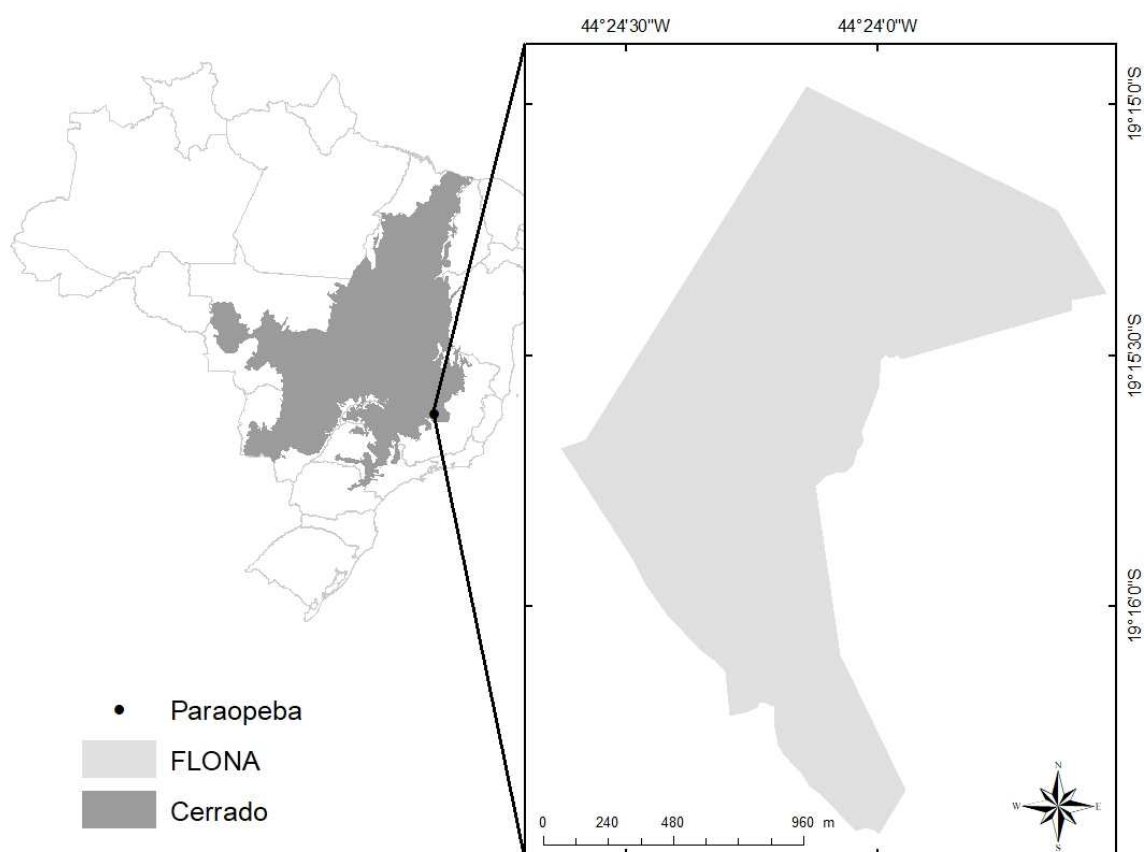


Figura 3. Localização geográfica da área de estudo, Floresta Nacional de Paraopeba (FLONA), Minas Gerais, Brasil.

A vegetação encontrada nessa área engloba fitofisionomias do Domínio cerrado, apresentando um gradiente na formação de dossel (formações florestais a savânicas). Tais fitofisionomias estão associadas às características dos solos:

- Cerradão distrófico sobre latossolo vermelho;

- Cerrado *stricto sensu* sobre latossolo amarelo;
- Cerrado *stricto sensu* sobre cambissolo amarelo
- Cerrado *stricto sensu* denso sobre latossolo vermelho-amarelo;
- Cerradão mesotrófico sobre latossolo vermelho;

#### *Coleta de material*

Foram coletadas cinco folhas maduras de cada 13 dos indivíduos de *P. pyroidea*, em três fitofisionomias: Cerrado *stricto sensu* - cerrado savânico com dois estratos bem definidos: um gramíneo e outro lenhoso; Cerrado *stricto sensu* denso – região de transição entre Cerrado *stricto sensu* e Cerradão; e Cerradão, com maior densidade de plantas lenhosas em detrimento da camada gramínea (RIBEIRO et al., 1998). A fim de garantir a integridade do material, as folhas foram enroladas em papel toalha umedecido e guardadas em saco plástico lacrado e armazenado em caixa térmica contendo gelo (FOLEY et al., 2006; MEERDINK et al., 2016)

Para a coleta dos traços anatômicos, foram recortados com auxílio de um estilete pedaços das folhas dos indivíduos e armazenados em FAA<sub>50</sub>, posteriormente desidratado no álcool 70% e estocado para análises (JOHANSEN, 1940).

#### *Pterandra pyroidea* A. Juss

A espécie *Pterandra pyroidea* pertence à família Malpighiaceae e o gênero *Pterandra* A. Juss. inclui 14 espécies de árvores e arbustos encontradas na América Central e do Sul. A *P. pyroidea* é uma planta comum do Planalto Brasileiro, em que podem formara arbustos pouco ramificados que pode alcançar até 2 metros (ANDERSON, 1997). As folhas podem ser tomentosas em ambas as faces com tricomas malpighiáceos, com a face abaxial serícea e a face adaxial hirsuta (FRANCENER, [s.d.]).

#### *Coleta de dados*

Após 48 horas da coleta das folhas, foram coletados os espectros através do espectrorradiômetro hiperaespectral portátil: FieldSpec® 4 Hi-Res (Analytical Spectral Devices, Bolder, CO, Estados Unidos), localizado no Laboratório de

Ecologia e Evolução de Plantas da Universidade Federal de Viçosa (**Erro! Fonte d e referência não encontrada.**). O equipamento é constituído por uma sonda (pistola) e um clipe de folhas, garantindo uma obtenção de espectros ortogonalmente, em condições iguais de iluminação e com pouca influência da atmosfera, considerando o contato da sonda. Ele é capaz de registrar a reflectância de alvos na faixa do espectro eletromagnético óptico entre 350 e 2500 nm, com resoluções espectrais de 3 nm para ondas mais curtas (350-700 nm) e de 10 nm para ondas longas, coletando ao todo 2151 bandas (DANNER et al., 2015). A análise foi feita usando a porção adaxial das folhas, com exclusão da nervura central, quando possível.

#### *Coleta de traços anatômicos*

O material vegetal foi seccionado em cortes transversais (7 µm) usando em micrótomo rotativo de avanço automático (modelo RM2155, Leica Microsystems Inc., Deerfield, USA). Foram submetidos a uma dupla coloração com Azul de Astra e Safranina aquosa (KRAUS; ARDUIN, 1997). As análises quantitativas foram realizadas através da documentação fotográfica em fotomicroscópio Zeiss - Scope A1 com sistema de captura de imagens AxioCam 105 color – Zeiss, localizado no Laboratório de Anatomia Vegetal da Universidade Federal de Viçosa. Posteriormente, essas imagens foram analisadas usando software de processamento de imagem, *ImageJ* (ABRÀMOFF; MAGALHÃES; RAM, 2004)..

Foram quantificados os seguintes traços: espessura da parede periclinal externa, espessura da epiderme, espessura do mesofilo, espessura do parênquima paliçádico, espessura do parênquima esponjoso e por último a espessura da lâmina foliar (Figura 2). Devido ao menor de grau de compactação, optamos por incluir a camada de transição entre o paliçádico e o esponjoso, que

continha as células coletoras, na quantificação da camada do parênquima esponjoso (CARMELLO-GUERREIRO; APPEZZATO-DA-GLÓRIA, 2006).

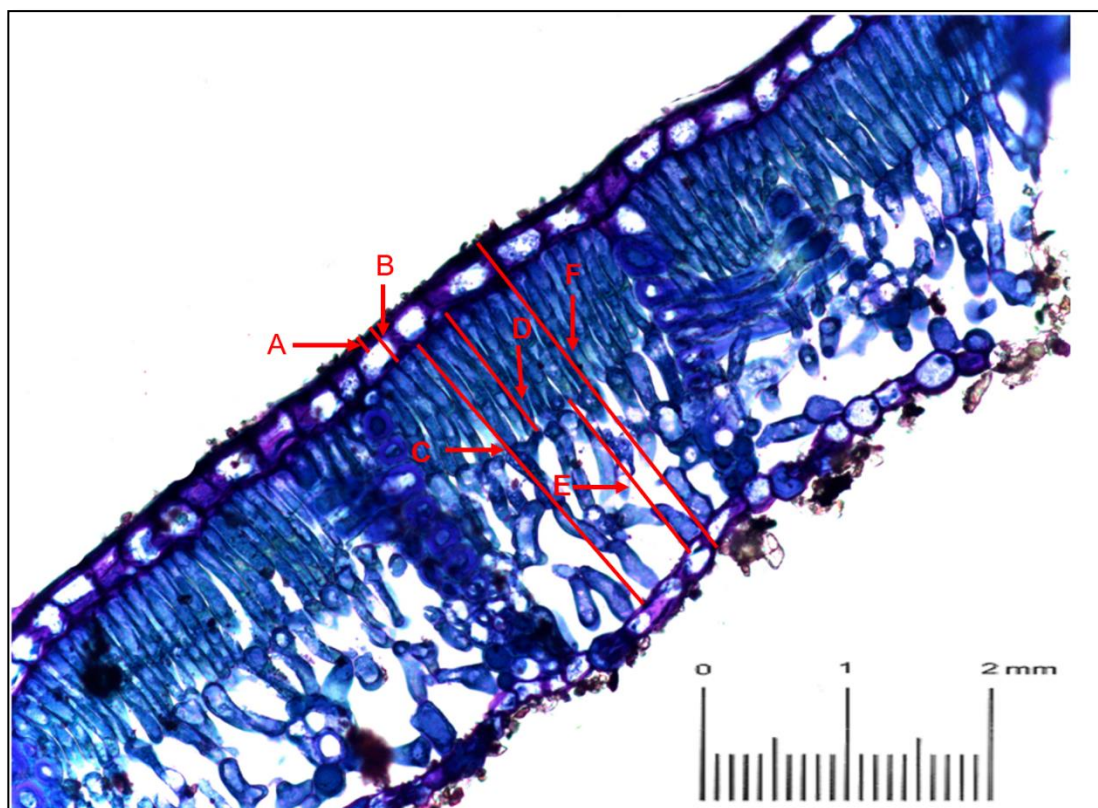


Figura 2. Corte transversal de uma lâmina foliar de *P. pyroidea* em área de Cerrado *stricto sensu*. As setas indicam os traços anatômicos medidos: A - espessura da parede periclinal externa, B - espessura da epiderme, C - espessura do mesófilo, D - espessura do paliçádico, E - espessura do parênquima esponjoso, F - espessura da lâmina foliar.

### *Análises estatísticas*

Os modelos de predição para os traços foliares foram criados por meio da regressão por quadrados mínimos parciais (PLSR) usando o software Solo 8.5.2 (EIGENVECTOR RESEARCH, 2017). A regressão de mínimos quadrados parciais é uma regressão multivariada que se baseia na construção de modelos de predição levando em conta as estruturas das matrizes (X) com os espectros foliares e (Y) com os dados foliares (HAALAND; THOMAS, 1988; WOLD; SJÖSTRÖM; ERIKSSON, 2001). Essa análise é indicada quando as variáveis envolvidas são muitas e altamente correlacionadas, como no caso de dados de espectroscopia.

Os dados foram linearizados através do desvio padrão de cada conjunto de dados. Para a construção dos modelos, os dados foram separados por traço foliar e por região espectral (VIS de 400 nm a 700 nm; NIR de 700 a 1300 nm;

SWIR de 1300 a 2450 nm e espectro total, (*full range*, 400 nm a 2450 nm), totalizando 18 modelos construídos.

Foi feita uma validação cruzada para determinar o número de fatores retidos em cada modelo de regressão e avaliar a capacidade de predição. Na validação cruzada são calculados os modelos potenciais excluindo uma observação de cada vez (*Leave-one-out*). O desempenho do modelo foi avaliado por meio do coeficiente de determinação da calibração ( $R^2_{cal}$ ) e por meio do erro quadrático médio (RMSE). Foi considerado os coeficientes de determinação  $R^2_{cal}$  como altos aqueles com valores maiores que 0.7, moderado (entre 0.7 e 0.5) ou baixo com menores 0.5 (ROELOFSEN et al., 2014)

## Resultados

As espessuras mensuradas mostraram diferenças em suas distribuições de valores (Figura 3). As espessuras da folha e mesofilo total exibiram valores que variaram em maior amplitude de distribuição que os demais valores de espessuras.

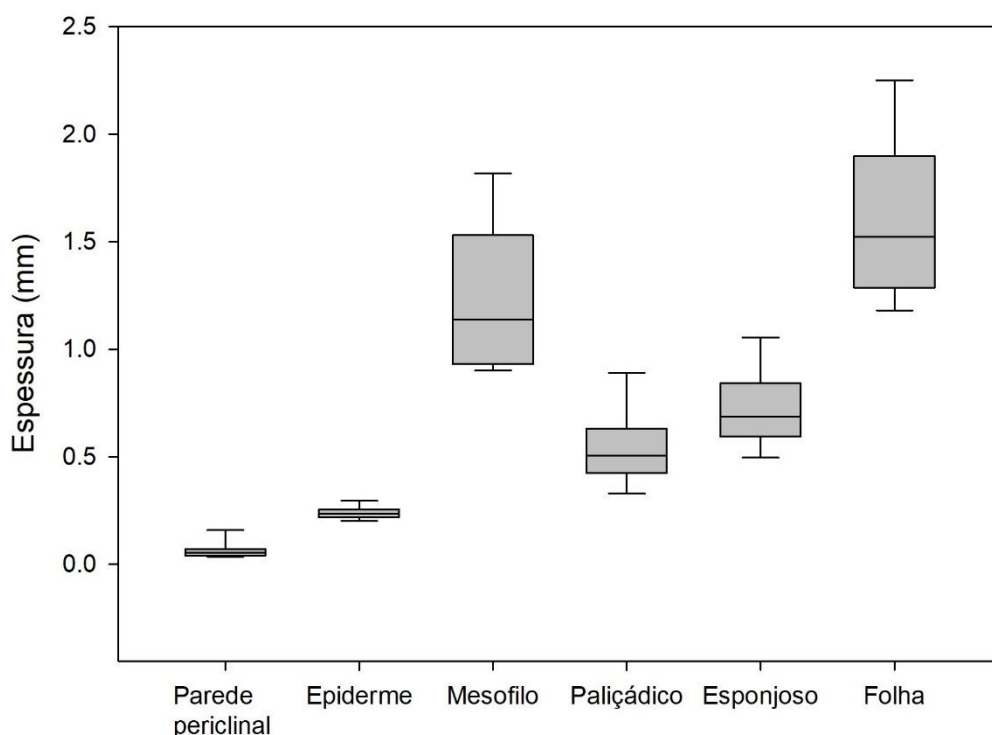


Figura 3. Distribuição dos traços anatômicos para *P. pyroidea* nas fitofisionomias. Os boxplots mostram a mediana para cada característica por grupo (linha horizontal escura), intervalo interquartil (caixas) e intervalo de dados (traços).

Foi construído um modelo para cada traço anatômico (espessuras) usando as medidas espectrais divididas em regiões: do visível (VIS), do infravermelho próximo (NIR), do infravermelho de ondas curtas (SWIR) e espectro total (*Full range*). Os modelos gerados tiveram o RMSE de 2,38 a 39,43% e  $R^2_{cal}$  de 0.008 a 0.867. A predição para a espessura da parede periclinal externa não foi adequada para nenhuma região, enquanto o modelo com o espectro total mostrou um bom desempenho na predição da espessura da folha, do mesofilo total e do parênquima esponjoso. Esse modelo apresentou RMSE e RMSECV baixos e  $R^2_{cal}$  maior que 0.7, no entanto os valores  $R^2_{cv}$  foram baixos (Tabela 2).

Tabela 2. Desempenho dos modelos usando cada medida de espessura para cada comprimento de onda. LV são o número de componentes retidos no modelo, RMSEC e RMSECV são raiz quadrada do erro quadrático médio da calibração e da validação cruzada, respectivamente;  $R^2_{cal}$  e  $R^2_{cv}$  são os coeficientes de determinação da calibração e da validação cruzada, respectivamente. Os valores em negrito  $R^2 > 0.5$ .

Traço foliar	Região do espectro	LV	RMSE	RMSECV	$R^2_{cal}$	$R^2_{cv}$
Parede periclinal	VIS	1	0.038	0.041445	0.122	0.002
	NIR	1	0.039	0.042345	0.221	0.211
	SWIR	1	0.040	0.043691	0.008	0.501
	<i>Full range</i>	1	0.040	0.043117	0.118	<b>0.539</b>
Epiderme	VIS	2	0.028	0.032385	0.173	0.077
	NIR	1	0.030	0.032082	0.028	0.000
	SWIR	1	0.024	0.024893	0.397	0.028
	<i>Full range</i>	1	0.025	0.026109	0.314	0.195
Mesofilo	VIS	1	0.319	0.35073	0.059	0.002
	NIR	2	0.233	0.27961	0.482	0.278
	SWIR	1	0.351	0.37798	0.217	0.437
	<i>Full range</i>	6	0.138	0.32601	<b>0.819</b>	0.195
Esponjoso	VIS	1	0.188	0.20725	0.019	0.003
	NIR	1	0.181	0.19629	0.000	0.105
	SWIR	1	0.197	0.21425	0.268	<b>0.533</b>
	<i>Full range</i>	6	0.064	0.18367	<b>0.867</b>	0.158
Paliçádico	VIS	1	0.169	0.187	0.084	0.001
	NIR	2	0.129	0.16381	0.469	0.206
	SWIR	1	0.197	0.2135	0.356	<b>0.656</b>
	<i>Full range</i>	1	0.187	0.202336	0.252	<b>0.588</b>
Folha	VIS	1	0.240	0.36181	0.566	0.199
	NIR	2	0.257	0.31288	0.489	0.278
	SWIR	1	0.394	0.42515	0.206	0.389

A região do visível (VIS) apresentou um coeficiente de determinação de calibração ( $R^2_{cal}$ ) moderado ( $0.7 < R^2_{cal} > 0.5$ ) para a espessura da folha, com um RMSE de 24%, enquanto para os demais traços foi considerado fraco ( $R^2_{cal} < 0.5$ ) (Tabela 2). Para essa região todos os valores de coeficiente de determinação de validação cruzada foram muito baixos. A região do infravermelho próximo (NIR) apresentou um coeficiente moderado ( $R^2_{cal} = 0.5$ ), podendo ser considerada uma possível preditora para a espessura da folha, do mesofilo e do parênquima paliçádico. Já a região de infravermelho de ondas curtas (SWIR) obteve valores de coeficiente menores que 0.5 e foram considerados de fraca correlação e com os maiores valores de RMSE nos modelos para folha e mesofilo. Os coeficientes de determinação de validação cruzada ( $R^2_{cv}$ ) foram moderados para alguns modelos: SWIR x Paliçádico, SWIR x Esponjoso, *Full range* x paliçádico (Tabela 2). No entanto, esses modelos não apresentaram um coeficiente da calibração com valores semelhantes, o que indicaria uma superestimativa da validação cruzada. Os melhores modelos de regressão, de acordo com os valores de  $R^2_{cal}$ , foram os gerados a partir do espectro total (Figura 4).

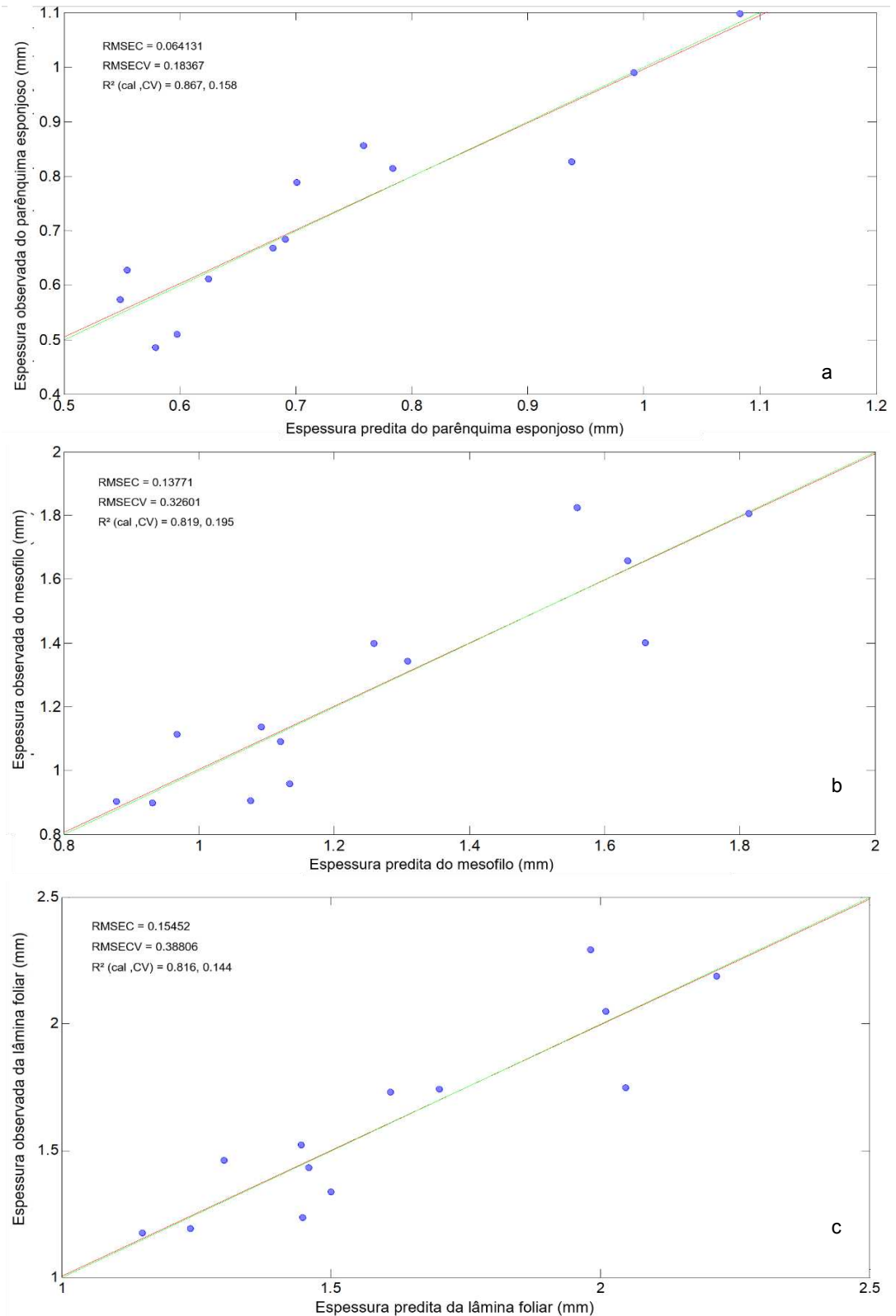


Figura 4. Modelos de regressão gerados entre traços anatômicos e a reflectância do espectro total (*Full range*, 400 nm a 2450 nm) com  $R^2_{cal} > 0.7$ . a) Valores observados vs. valores preditos de espessura do esponjoso, b) valores observados vs. valores preditos de espessura do mesofilo, c) valores observados vs. valores observados da espessura foliar.

## Discussão

As espessuras da parede periclinal e da epiderme quase não variaram entre os indivíduos de diferentes fitofisionomias. Já as espessuras do mesofilo e a espessura da lâmina foliar mostrou uma amplitude de valores que pode indicar diferenças entre os indivíduos. Não só a aspectos fisiológico, como anatômicos, sofrem influência das condições ambientais como luz e solo (ARIANO; SILVA, 2016; LOSADA GAVILANES et al., 2016; MARQUES et al., 2000). Essa maior amplitude das espessuras encontradas possivelmente são resultados dos diferentes regimes de luz em que estão os indivíduos, que para ajustarem seus processos fisiológicos ajustam suas estruturas internas (TERASHIMA; MIYAZAWA; HANBA, 2001).

A região referente ao espectro visível (VIS) apresentou correlação moderada com a espessura da folha. Nessa região, grande parte da radiação é absorvida pelos pigmentos fotossintetizante, sendo menor as taxas de reflectância e mais relacionada às quantidades desses pigmentos (ASNER, 1997; GATES et al., 1965; GAUSMAN, 1985). Diferenças na espessura de uma folha se correlacionam com a espessura do mesofilo, indicando maiores ou menores quantidade de tecidos que contêm pigmentos como a clorofila (KNAPP; CARTER, 1998; SLATON et al., 2001). No entanto, nossos modelos não mostraram correlação do VIS com as camadas do mesofilo, possivelmente devido a uma maior correspondência desta região com aspectos fisiológicos (ASNER, 1997; GAUSMAN, 1985; KNAPP; CARTER, 1998).

Já a região do infravermelho próximo (NIR – 700 nm a 1300 nm) é cuja radiação eletromagnética não é absorvida pelos pigmentos fotossintetizantes, sendo capaz de alcançar as camadas mais internas dos tecidos foliares (ASNER, 1997; PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2015; SLATON et al., 2001). O comportamento espectral de uma folha nesses comprimentos de ondas está mais relacionado aos espaços intracelulares que permitem a dispersão da radiação. Na camada do parênquima esponjoso, por exemplo, há presença de grandes espaços celulares, graças ao baixo grau de compactação das células parenquimáticas (CASTRO-ESAU et al., 2006; GATES et al., 1965; KNIPLING, 1970; SLATON et al., 2001). No trabalho de Slaton et al. (2001) foi encontrada

alta correlação do NIR com essa camada, através da razão entre a área de superfície das células do mesofilo por superfície de área do mesofilo. A presença de grandes espaços celulares poderia ocasionar uma possível correlação com a região do NIR, no entanto não foi encontrado um modelo adequado.

Na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR), assim como o NIR, a radiação penetra nas camadas mais internas da folha, no entanto uma grande absorção dessa radiação é feita pela água contida no interior das células ou nos espaços intercelulares (ASNER, 1997; ASNER et al., 2009).

A assinatura espectral que é coletada de uma folha é reflexo de um conjunto de diferentes propriedades foliares, que envolvem absorção e dispersão das ondas que chegam nela (GATES et al., 1965; PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2015). A alta correlação para o espectro total pode ser um reflexo da influência dos traços foliares no comportamento espectral como um todo e não somente em alguns comprimentos. As regiões de maiores comprimentos (NIR e SWIR), por exemplo, são as mais influenciadas por estruturas internas, que a região do visível (ASNER, 1997).

Mesmo com algumas correlações, ainda é preciso um maior aprofundamento na metodologia. Comparado com outros trabalhos que relacionam espectro foliares com traços foliares (ASNER et al., 2009; ROELOFSEN et al., 2014), o número investigado aqui é demasiado reduzido (apenas 13 observações). Há uma grande diferença entre os valores do coeficiente de calibração e de validação cruzada, isso pode ser devido ao baixo número amostral, pois ambos coeficientes ao serem calculados levam em consideração o número de observações e suas distribuições (WISE et al., 2006a; WOLD; SJÖSTRÖM; ERIKSSON, 2001). Além do baixo número amostral que pode ter prejudicado a validação cruzada, o pré-processamento dos dados também afeta o cálculo da regressão. O pré-processamento uniformiza as relações entre as variáveis em seu banco de dados e remove ruídos que não interessam à análise (WISE et al., 2006b), podendo alterar os coeficientes, sendo necessária a realização de testes de pré-processamento adequados.

## Referências bibliográficas

- ABRÀMOFF, M. D.; MAGALHÃES, P. J.; RAM, S. J. Image Processing with ImageJ Second Edition. **Biophotonics International**, v. 11, n. 7, p. 36–42, 2004.
- AKULA, R.; RAVISHANKAR, G. A. Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. **Plant Signaling & Behavior**, v. 6, n. 11, p. 1720–1731, 2011.
- ANDERSON, C. Revision of Pterandra (Malpighiaceae). 1997.
- ARIANO, A. P. R.; SILVA, I. V. DA. Leaf anatomy of *Qualea parviflora* (Vochysiaceae) in three phytophysionomies of the Mato Grosso State, Brazil. **Acta Amazonica**, v. 46, n. 2, p. 119–126, 2016.
- ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 64, n. 3, p. 234, 1997.
- ASNER, G. P. et al. Leaf chemical and spectral diversity in Australian tropical forests. **Ecological Applications**, v. 19, n. 1, p. 236–253, 2009.
- ASNER, G. P.; MARTIN, R. E. Spectral and chemical analysis of tropical forests: Scaling from leaf to canopy levels. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3958–3970, 2008.
- BIERAS, A. C.; DAS GRAÇAS SAJO, M. Leaf structure of the cerrado (Brazilian savanna) woody plants. **Trees**, v. 23, n. 3, p. 451–471, 2009.
- CARLOS, N. A.; ROSSATTO, D. R. Leaf traits combinations may explain the occurrence of savanna herbaceous species along a gradient of tree encroachment. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 29, n. 3, p. 155–163, 5 set. 2017.
- CASTRO, K. L.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G. A. Changes in Spectral Properties, Chlorophyll Content and Internal Mesophyll Structure of Senescing *Populus balsamifera* and *Populus tremuloides* Leaves. **Sensors**, v. 8, p. 51–69, 2008.
- CASTRO-ESAU, K. L. et al. Variability in leaf optical properties of mesoamerican trees and the potential for species classification. **American Journal of Botany**, v. 93, n. 4, p. 517–530, 2006.

DANNER, M. et al. Spectral Sampling with the ASD FieldSpec 4—Theory, Measurement, Problems, Interpretation. EnMAP Field Guides Technical Report. GFZ Data Services. 2015.

EHLERINGER, J. R. J.; BJÖRKMAN, O. Pubescence and leaf spectral characteristics in a desert shrub, *Encelia farinosa*. **Oecologia**, v. 36, n. 2, p. 151–162, 1978.

EIGENVECTOR RESEARCH, I. **Solo**. Manson, WA USA 98831: [s.n.].

EITEN, G. The cerrado vegetation of Brazil. **The Botanical Review**, v. 38, n. 2, p. 201–341, 1972.

ELEMANS, M. Light, nutrients and the growth of herbaceous forest species. **Acta Oecologica**, v. 26, n. 3, p. 197–202, 2004.

FERREIRA, L. G.; HUETE, A. R. Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 10, p. 1837–1860, 2004.

FOLEY, S. et al. Foliar spectral properties following leaf clipping and implications for handling techniques. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, n. 3, p. 265–275, 2006.

FRANCENER, A. **Pterandra in Flora do Brasil 2020 em construção**. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB25721>>. Acesso em: 7 dez. 2017.

FRANCO, A. C. et al. Leaf functional traits of Neotropical savanna trees in relation to seasonal water deficit. **Trees - Structure and Function**, v. 19, n. 3, p. 326–335, 2005.

GATES, D. M. et al. Spectral Properties of Plants. **Applied Optics**, v. 4, n. 1, p. 11, 1965.

GAUSMAN, H. W. Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light. **Graduate studies/Texas Tech University (USA)**, 1985.

GIVNISH, T. J. Adaptation to Sun and Shade: A whole-plant Perspective. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 15, n. 2, p. 63–92, 1988.

- HAALAND, D. M.; THOMAS, E. V. Partial least-squares methods for spectral analyses. 1. Relation to other quantitative calibration methods and the extraction of qualitative information. **Analytical Chemistry**, v. 60, n. 11, p. 1193–1202, 1988.
- HANBA, Y. T.; KOGAMI, H.; TERASHIMA, I. The effect of growth irradiance on leaf anatomy and photosynthesis in *Acer* species differing in light demand. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, n. 8, p. 1021–1030, ago. 2002.
- HEIM, R. et al. The Effect of Epidermal Structures on Leaf Spectral Signatures of Ice Plants (Aizoaceae). **Remote Sensing**, v. 7, n. 12, p. 16901–16914, 15 dez. 2015.
- HLWATIKA, C. N. M.; BHAT, R. B. An ecological interpretation of the difference in leaf anatomy and its plasticity in contrasting tree species in Orange Kloof, Table Mountain, South Africa. **Annals of botany**, v. 89, n. 1, p. 109–114, 2002.
- HOMOLOVA, L.; MALENOVSKÝ, Z.; CLEVERS, J. Review of optical-based remote sensing for plant trait mapping. **Ecological**, 2013.
- KARLOVSKA, A. et al. **Plant reflected spectra depending on biological characteristics and growth conditions**. . In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE RURAL DEVELOPMENT 2017. 2015
- KNAPP, A. K.; CARTER, G. A. VARIABILITY IN LEAF OPTICAL PROPERTIES AMONG 26 SPECIES FROM A BROAD RANGE OF HABITATS. **American Journal of Botany**, v. 85, n. 7, p. 940–946, 1998.
- KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 1, n. 3, p. 155–159, 1970.
- KRAUS, J.; ARDUIN, M. Manual básico de métodos em morfologia vegetal. 1997.
- LOSADA GAVILANES, M. et al. MICROMORFOMETRIA FOLIAR DE *PALICOUREA RIGIDA* KUNTH.(RUBIACEAE) EM AMBIENTE DE CERRADO E CAMPO RUPESTRE. **CERNE**, v. 22, n. 2, 2016.

LU, S. **Effects of leaf surface wax on leaf spectrum and hyperspectral vegetation indices**. . In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2013 IEEE INTERNATIONAL. IEEE, 2013

MARQUES, A. R. et al. Variations in leaf characteristics of two species of *Miconia* in the Brazilian cerrado under different light intensities. **Tropical Ecology**, v. 41, n. 1, p. 47–60, 2000.

MEERDINK, S. K. et al. Linking seasonal foliar traits to VSWIR-TIR spectroscopy across California ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 186, p. 322–338, 2016.

NERI, A. V. **Gradiente pedológico-vegetacional de cerrado em Paraopeba, MG**. [s.l.] Tese (Doutorado em Botânica)–Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

PEARCY, R. W. Responses of plants to heterogeneous light environments. **Handbook of functional plant ecology**, p. 269–314, 1999.

PINHEIRO, L. F. S. L. F. S.; KOLB, R. M. R. M. R. M.; ROSSATTO, D. R. D. R. Changes in irradiance and soil properties explain why typical non-arboreal savanna species disappear under tree encroachment. **Australian Journal of Botany**, v. 64, n. 4, p. 333, 2016.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. [s.l.] Oficina de Textos, 2015.

RIBEIRO, J. F. et al. Fitofisionomias do bioma Cerrado. **Cerrado: ambiente e flora**, p. 556, 1998.

RIBEIRO, J. F., & WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. **Cerrado : ambiente e flora**, p. 556, 1998.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma cerrado in: Sano, SM; Almeida, SP; Ribeiro, JF Cerrado: Ecologia e flora. **Brasília: Embrapa Informação Tecnológica**, 2008.

RÔÇAS, G.; SCARANO, F. R.; BARROS, C. F. Leaf anatomical variation in *Alchornea triplinervia* (Spreng) Müll. Arg.(Euphorbiaceae) under distinct light and soil water regimes. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 136, n. 2, p. 231–238, 2001.

ROELOFSEN, H. D. et al. Predicting leaf traits of herbaceous species from their spectral characteristics. **Ecology and Evolution**, v. 4, n. 6, p. 706–719, mar. 2014.

ROSSATTO, D. R.; KOLB, R. M.; FRANCO, A. C. Leaf anatomy is associated with the type of growth form in Neotropical savanna plants. **Botany**, v. 93, n. 8, p. 507–518, 2015.

SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A. et al. Differences in leaf traits, leaf internal structure, and spectral reflectance between two communities of lianas and trees: Implications for remote sensing in tropical environments. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 10, p. 2076–2088, 2009.

SILVA-JÚNIOR, M. C. Composição Florística e parâmetros fitossociológicos do cerrado e sua relação com o solo na Estação Florestal de Experimentação de Paraopeba. **Viçosa, MG: UFV. 130p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)–Universidade Federal de Viçosa**, 1984.

SLATON, M. R. et al. Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. **American Journal of Botany**, v. 88, n. 2, p. 278–284, 2001.

TERASHIMA, I.; MIYAZAWA, S.-I.; HANBA, Y. T. Why are sun leaves thicker than shade leaves? —Consideration based on analyses of CO<sub>2</sub> diffusion in the leaf. **Journal of Plant Research**, v. 114, n. 1, p. 93–105, 2001.

USTIN, S. L. et al. Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. S67–S77, 2009.

WISE, B. M. et al. PLS Toolbox User Manual. Eigenvector Research. **Inc., Wenatchee, USA**, 2006a.

WISE, B. M. et al. Chemometrics tutorial for PLS\_Toolbox and Solo. **Eigenvector Research Incorporated**, v. 203, 2006b.

WOLD, S.; SJÖSTRÖM, M.; ERIKSSON, L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. **Chemometrics and intelligent laboratory systems**, v. 58, n. 2, p. 109–130, 2001.

## CONCLUSÃO GERAL

As assinaturas espectrais coletadas propiciaram o estudo das espécies do estrato herbáceo-subarbustivos de modo rápido sem a necessidade de experimentos. Claro, que para isso ocorrer houve investimentos, anteriormente, no que diz a respeito ao avanço do sensoriamento remoto.

Com o índice de vegetação tivemos acesso de maneira relativamente rápida à uma pesquisa preliminar das possíveis estratégias fisiológicas empregadas pelas espécies. Nessa exploração inicial já foi possível inferir acerca da capacidade fotossintética de cada espécie em dois ambientes considerados extremos a respeito da disponibilidade luminosa. Mesmo sob condições luminosas semelhantes, as espécies apresentaram taxas fotossintéticas diferentes ou quantidade de pigmentos diferentes. Esses resultados corroboram com a variabilidade presente entre as espécies e a diversidade do estrato herbáceo no Cerrado. O uso dos índices, mesmo que uma análise simples, parece ser promissora para investigações iniciais da flora, de forma rápida e simples.

A respeito das propriedades espectrais como preditoras de traços ainda é necessário grande estudo, principalmente para espécies herbáceas que se encontram em diversos ambientes sob condições abióticas e bióticas distintas. No presente estudo, nossas hipóteses não foram totalmente esclarecidas. O número de observações influenciou na modelagem das regressões e pode ter prejudicado as previsões, sendo necessário assim mais testes e mais observações. Mesmo com os resultados apresentados, o sensoriamento remoto se mostra uma ferramenta simples e rápida, e de grande utilidade na pesquisa multidisciplinar.