

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

TAIANA LOAN DE LIMA CAMPOS

Discriminação de espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual  
e da exótica *Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden  
utilizando dados hiperespectrais

Maringá  
2017

TAIANA LOAN DE LIMA CAMPOS

Discriminação de espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual  
e da exótica *Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden  
utilizando dados hiperespectrais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Departamento de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Área de concentração: Solos e nutrição de plantas

Orientador: Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni

Maringá

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

C198d Campos, Taiana Loan de Lima  
Discriminação de espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual e da exótica *Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden utilizando dados hiperespectrais / Taiana Loan de Lima Campos. -- Maringá, 2017.  
xix, 105 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2017.

1. Floresta Estacional Semidecidual - Mata Atlântica Brasileira - Espectroscopia de imageamento. 2. Espectrorradiômetro. 3. AisaFENIX. 4. Classificação da vegetação - Floresta Estacional Semidecidual - Mata Atlântica Brasileira. 5. Sensoriamento Remoto - Floresta Estacional Semidecidual - Mata Atlântica Brasileira. I. Nanni, Marcos Rafael, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Agrárias. Departamento de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

CDD 23.ed. 577.3

Mariza Nogami  
CRB 9/1569

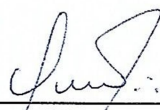
TAIANA LOAN DE LIMA CAMPOS

**DISCRIMINAÇÃO DE ESPÉCIES ARBÓREAS NATIVAS DA FLORESTA ESTACIONAL  
SEMIDECIDUAL E DA EXÓTICA *Eucalyptus urograndis* W. HILL EX MAIDEN  
UTILIZANDO DADOS HIPERESPECTRAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Mestre.

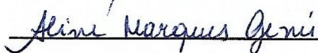
APROVADA em 27 de fevereiro de 2017.

Prof. Dr. **Marcos Rafael Nanni**  
Presidente



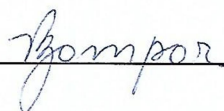
---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. **Aline Marques Genú**  
Membro



---

Prof. Dr. **Rafael Zampar**  
Membro



---

## DEDICATÓRIAS

*À minha família,  
meu amor e amigos,  
pelo apoio  
e companheirismo.  
Com vocês concretizo  
mais esse sonho.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Ana Maria de Lima Campos e João Batista Campos, pela enorme dedicação, incentivo, amor incondicional e pelos mais valiosos ensinamentos que já recebi e que carregarei comigo por toda minha jornada. À vocês, todo meu amor e gratidão.

Ainda além, agradeço a orientação de meu Pai em mais um projeto. Sua contribuição é essencial para minha formação como profissional íntegra, capaz e justa.

Ao meu irmão Rafael Moreno, pela amizade, ajuda e parceria em todos os momentos de minha vida, inclusive na concretização deste trabalho.

Ao meu companheiro Arthur de Canini Cezar, pelo carinho, zelo, paciência e por acreditar em meus sonhos e fazê-los deles, os nossos sonhos.

Ao orientador, Professor Dr. Marcos Rafael Nanni, pela oportunidade, empenho, direcionamento e por compartilhar seu vasto conhecimento conosco. Muito obrigada.

Aos colegas do Grupo Aplicado ao Levantamento e Espacialização dos Solos (GALeS), que tanto me ajudaram em todas as etapas do Mestrado, desde disciplinas à compreensão de técnicas, métodos, ferramentas e na elaboração da dissertação. Em especial, agradeço minhas queridas amigas Aline de Carvalho Gasparotto e Jessica Saldanha Souza.

À maravilhosa equipe da Estação Ecológica do Caiuá, pelo acolhimento e grande contribuição nos trabalhos de campo. Agradeço especialmente ao Valdir Leite da Silva, pelos grandes esforços nas coletas, identificação de espécies e pela sabedoria que carrega com si, muito obrigada.

Ao Instituto Ambiental do Paraná, pelo apoio à pesquisa e dedicação na conservação da biodiversidade.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá, pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho e aos funcionários, que sempre me atenderam com atenção.

Aos meus amigos, pela felicidade em compartilhar a vida com vocês.

E a todos que contribuíram e possibilitaram a realização desse trabalho.

## EPÍGRAFE

*“Ande sempre para o sol  
Olhe sempre para o sol  
E tudo que você quiser  
E tudo que você pensar será  
Iluminado como o sol  
Brilhante como o sol  
Tudo o que você encontrar  
E tudo que você amar  
Será iluminado como o sol  
Tudo foi feito pelo sol  
Viva sempre em sua luz”  
Sérgio Dias – Os Mutantes*

Discriminação de espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual  
e de espécie exótica *Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden  
utilizando dados hiperespectrais

**RESUMO**

A pressão produtiva para explorar e expandir o uso da terra, a exploração de recursos naturais e o crescimento urbano desordenado já subtraíram e fizeram desaparecer importantes ecossistemas naturais. Dentre as ações que visam à conservação *in situ* e a recuperação dos remanescentes florestais estão as Áreas de preservação permanente (APP) e Reserva legal (RL), que possuem a função de restaurar a conectividade da paisagem, auxiliando na estabilidade dos ecossistemas e processos naturais. Por isso, o desenvolvimento de técnicas que auxiliem o monitoramento da vegetação nativa e exótica, comumente utilizadas em projetos de restauração dessas áreas, torna-se necessário. O sensoriamento remoto hiperespectral tem se demonstrado como ferramenta importante no mapeamento da flora em ambientes tropicais, reduzindo custos com trabalhos de campo, otimizando a avaliação de mudanças na biodiversidade de dosséis e, conseqüentemente, auxiliando a aplicação da legislação. Contudo, a alta diversidade florística e espectral de florestas tropicais torna a discriminação de espécies uma tarefa complexa e desafiadora. Assim, os objetivos deste trabalho foram caracterizar e discriminar nove espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual (FES), Bioma Mata Atlântica, e a espécie exótica *Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden, através de dados hiperespectrais de reflectância de folhas (400 a 2.450nm), obtidos em laboratório com o espectroradiômetro ASD FieldSpec<sup>®</sup> 3 Jr; avaliar a possibilidade de utilização de imagens hiperespectrais, com alta resolução espacial, geradas pelo sensor aerotransportado AisaFENIX (SPECIM), para o mapeamento de áreas de vegetação, através da discriminação dos dosséis da FES e de área de cultivo de eucalipto, utilizando dados de reflectância de *pixels* do visível ao infravermelho médio (500 a 1.750nm); avaliar o conjunto de análises estatísticas PCA-QDA (análise de componentes principais e análise discriminante quadrática) na classificação dos dados. Em escala de folha, cada espécie nativa foi individualmente discriminada do eucalipto, gerando acurácias médias, na fase de validação, entre 94,77 e 100%. Após, todas as amostras de reflectância de folhas de espécies nativas foram reunidas em um só grupo e então discriminadas do grupo da exótica. As acurácias médias da predição e validação foram 90,68 e 94,18%, respectivamente, sendo que as espécies que mais contribuíram para os erros de classificação entre os dois grupos foram



*Aspidosperma polyneuron*, *Casearia gossypiosperma*, *Cedrela fissilis* e *Croton floribundus*. Como esperado, a acurácia da classificação dos dosséis em escala de *pixel* foi menor, por englobar outros fatores além de folhas, variando entre 84,60% na fase de predição e 81,77% na fase de validação externa. Assim, conclui-se que o conjunto de análises estatísticas PCA-QDA foi eficiente na discriminação das espécies e que dados hiperespectrais de reflectância de folhas e *pixels* de alta resolução espacial são informações que apresentam grande potencial para a discriminação de espécies arbóreas, tanto nativas da FES, como exóticas. Ainda além, é possível afirmar que imagens hiperespectrais geradas pelo sensor AisaFENIX são ferramentas promissoras para o mapeamento da distribuição espacial de espécies florestais em ambientes tropicais, podendo auxiliar os estudos florísticos que embasam projetos de conservação da biodiversidade.

**Palavras-chave:** espectrorradiômetro. Espectroscopia de imageamento. AisaFENIX. Mata Atlântica Brasileira. Classificação da vegetação.

Discrimination of tree species native to the Tropical Seasonal Semi-deciduous Forest and the exotic species *Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden using hyperspectral data

**ABSTRACT**

Productive pressure to exploit and expand the land use, natural resources exploitation and disorderly urban growth have already subtracted and eroded important natural ecosystems. Among the actions that aim the conservation *in situ* and the recovery of forest remnants are the Permanent preservation areas (APP) and Legal reserve (RL), which have the functions of restoring the landscape connectivity, aiding the ecosystems and natural processes stability. Therefore, the development of techniques that assist the monitoring of native and exotic species, commonly used in restoration projects of these areas, becomes necessary. Hyperspectral remote sensing has proved to be a very important tool in mapping the flora in tropical environments, reducing fieldwork costs, monitoring changes in canopy biodiversity and, consequently, helping the law enforcement. However, the high floristic and spectral diversity of tropical environments makes species discrimination with remote sensing data a complex and challenging task. Thus, the objectives of this research were to characterize and discriminate nine native species of the Tropical Seasonal Semi-deciduous Forest (FES), Brazilian Atlantic Forest Biome, and the exotic species *Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden, through leaf reflectance hyperspectral data (400 to 2,450nm), obtained in laboratory with the spectroradiometer ASD FieldSpec®3 Jr; evaluate the possibility of using hyperspectral images with high spatial resolution generated by the airborne sensor AisaFENIX (SPECIM), for the mapping of vegetation areas, by discriminating FES and eucalyptus cultivation area canopies using reflectance data of pixels from visible to medium infrared (500 to 1,750nm); evaluate the set of statistical analyzes PCA-QDA (principal component analysis and quadratic discriminant analysis) in the data classification. At leaf scale, each native species was individually discriminated from eucalyptus, yielding average classification accuracy, in the validation phase, between 94.77 e 100%. Afterwards, all leaf reflectance samples of native species were reunited into a single group and then discriminated from the exotic group. The prediction and validation average accuracy were 90.68 and 94.18%, respectively, and the species that most contributed to the misclassifications were *Aspidosperma polyneuron*, *Casearia gossypiosperma*, *Cedrela fissilis* and *Croton floribundus*. As expected, the accuracy of the canopy classification on pixel scale was lower,

since it included other factors besides leaves, ranging from 84.60% in the prediction phase to 81.77% in the external validation phase. Therefore, it was concluded that the set of statistical analysis PCA-QDA was efficient in discriminating tree species and that reflectance hyperspectral data of leaves and pixels with high spatial resolution are information that presents great potential for forest species discrimination, both native to FES, as exotic. Furthermore, it is possible to affirm that hyperspectral images generated by the sensor AisaFENIX are promising tools for mapping the spatial distribution of plant species in tropical environments, and may help the floristic studies that support biodiversity conservation projects.

**Keywords:** spectroradiometer. Imaging spectroscopy. AisaFENIX. Brazilian Atlantic Forest. Vegetation classification.

## LISTA DE SIGLAS

ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
AC	Acre
AD	Análise discriminante
AIS	Airborne Imaging Spectrometer
AM	Amazonas
APP	Área de preservação permanente
ASD	<i>Analytical Spectral Devices, Inc.</i>
BA	Bahia
CE	Ceará
CNCFLORA	Centro Nacional de Conservação da Flora
DAP	Diâmetro a altura do peito
DERAL	Departamento de Economia Rural
DIBAP	Diretoria de Biodiversidade e Áreas Protegidas
EI	Espectroscopia de imageamento
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENVI	<i>Environment for Visualizing Images</i>
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
FES	Floresta Estacional Semidecidual
FOV	Campo de visada
FT	Floresta tropical
Fund. SOS M.A.	Fundação SOS Mata Atlântica
GALeS	Grupo Aplicado ao Levantamento e Espacialização dos Solos
GO	Goiás
GOCNAE	Grupo de Organização da Comissão Nacional de Atividades Espaciais
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IAPAR	Instituto Agrônomo do Paraná
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPARDES	Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory (NASA)</i>

LDA	Análise discriminante linear
MG	Minas Gerais
MRH	Microrregião homogênea
MS	Mato Grosso do Sul
MT	Mato Grosso
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NIR	Infravermelho próximo
PA	Pará
PC	Componente principal
PCA	Análise de componentes principais
PCR	Regressão por componentes principais
PEVS	Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura
PLS	Regressão por mínimos quadrados parciais
PR	Paraná
QDA	Análise discriminante quadrática
RDA	Análise discriminante regularizada
REM	Radiação eletromagnética
RJ	Rio de Janeiro
RL	Reserva legal
RO	Roraima
SC	Santa Catarina
SEAB	Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento
SEMA	Secretaria Estadual do Meio Ambiente
SICAR	Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural
SIMCA	<i>Soft independent modeling of class analogy</i>
SP	São Paulo
SPECIM	<i>Spectral Imaging, Ltd.</i>
SR	Sensoriamento remoto
SRH	Sensoriamento remoto hiperespectral
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
SWIR	Infravermelho de ondas curtas
TUME	Teste de Uso Múltiplo do <i>Eucalyptus</i>
UC	Unidade de Conservação
UEM	Universidade Estadual de Maringá
UHE	Usina Hidrelétrica

UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UTM	Universal Transversa de Mercator
Vis	Visível
WGS84	<i>World Geodetic System</i> - Sistema de Referência Geodésico Global 1984

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Área de produção de espécies florestais, nos principais países produtores.....	8
<b>Tabela 2.</b> Tipos de vegetação existentes na Estação Ecológica do Caiuá.....	28
<b>Tabela 3.</b> Especificação das espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual utilizadas no presente trabalho .....	30
<b>Tabela 4.</b> Especificações do sensor hiperespectral AisaFENIX, SPECIM .....	34
<b>Tabela 5.</b> Especificações das imagens hiperespectrais utilizadas no presente estudo, coletadas com o sensor AisaFENIX, SPECIM, no dia 01/05/2016 .....	38
<b>Tabela 6.</b> Espécies caracterizadas radiometricamente no presente estudo e quantidade de espectros de reflectância de folhas coletados .....	41
<b>Tabela 7.</b> Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de capixingui ( <i>Croton floribundus</i> Spreng.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) .....	48
<b>Tabela 8.</b> Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de cedro ( <i>Cedrela fissilis</i> Vell.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden).....	50
<b>Tabela 9.</b> Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de embaúba-branca ( <i>Cecropia pachystachya</i> Trécul) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden).....	52
<b>Tabela 10.</b> Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de espeteiro ( <i>Casearia gossypiosperma</i> Briq.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) .....	55
<b>Tabela 11.</b> Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de guaritá ( <i>Astronium graveolens</i> Jacq.) e eucalipto (‘ W. Hill ex Maiden).....	57
<b>Tabela 12.</b> Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de ipê-roxo ( <i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.) Mattos) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden).....	60
<b>Tabela 13.</b> Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de jequitibá ( <i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden).....	62
<b>Tabela 14.</b> Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de pau-d’alho ( <i>Gallesia integrifolia</i> (Spreng.) Harms.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden).....	64
<b>Tabela 15.</b> Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de peroba-rosa ( <i>Aspidosperma polyneuron</i> Müll.Arg.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden).....	66
<b>Tabela 16.</b> Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, entre o grupo de espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual (nove espécies) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden).....	70

<b>Tabela 17.</b> Resultados da análise discriminante quadrática de dados hiperespectrais em escala de <i>pixel</i> , do dossel da Floresta Estacional Semidecidual e de área de plantio de eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) .....	75
---	----



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Remanescentes florestais do bioma Mata Atlântica no Estado do Paraná. Destaques em coloração rosa representam as áreas de desflorestamentos entre 2014 e 2015.....	5
<b>Figura 2.</b> Área e distribuição de plantios florestais com <i>Eucalyptus</i> nos Estados do Brasil, 2012. ....	10
<b>Figura 3.</b> Curva de reflectância espectral típica de uma folha verde sadia de <i>Aspidosperma polyneuron</i> Müll. Arg. (peroba-rosa). ....	16
<b>Figura 4.</b> (A) Amostra representada em um espaço multidimensional. (B) Componentes principais 1 e 2 em um espaço multidimensional.....	21
<b>Figura 5.</b> Localização dos municípios de Diamante do Norte e Mandaguaçu, Paraná, Brasil. ....	24
<b>Figura 6.</b> Mapa de localização da Estação Ecológica do Caiuá, Diamante do Norte, Paraná, Brasil.....	25
<b>Figura 7.</b> Área de coleta das amostras de <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden, no distrito de Pulinópolis, Mandaguaçu, PR. ....	29
<b>Figura 8.</b> Coleta de galhos de espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual. Estação Ecológica do Caiuá, Diamante do Norte, PR. ....	31
<b>Figura 9.</b> (A) 1. Espectroradiômetro FieldSpec <sup>®</sup> 3 Jr, ASD; 2. microcomputador portátil. (B) Demonstração de leitura radiométrica utilizando o acessório <i>Plant Probe</i> .....	32
<b>Figura 10.</b> Sensor hiperespectral AisaFENIX, SPECIM, acoplado em aeronave, para realização do aerolevanteamento nas áreas de estudo, no dia 01/05/2016.....	33
<b>Figura 11.</b> Aerolevanteamento da Estação Ecológica do Caiuá realizado com o sensor hiperespectral AisaFENIX, SPECIM, no dia 01/05/2016. ....	35
<b>Figura 12.</b> Imagens hiperespectrais obtidas com o sensor AisaFENIX, SPECIM, do dossel da Floresta Estacional Semidecidual (FES), Estação Ecológica do Caiuá, Diamante do Norte, PR (Zona 22 K). (R = 638,65 nm, G = 549,38 nm, B = 453,98 nm).....	36
<b>Figura 13.</b> Imagem hiperespectral obtida com o sensor AisaFENIX, SPECIM, de área de plantio de <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden. Pulinópolis - Mandaguaçu, PR (Zona 22 K). (R = 638,65 nm, G = 549,38 nm, B = 453,98 nm).....	37
<b>Figura 14.</b> Alvos padrões utilizados para a correção atmosférica das imagens geradas pelo sensor hiperespectral AisaFENIX, SPECIM. ....	38
<b>Figura 15.</b> Parâmetros para detecção de <i>outliers</i> na análise de componentes principais com base nos parâmetros variância residual de amostra (F-Resíduos) e Leverage. ....	40
<b>Figura 16.</b> Reflectância média de folhas das espécies utilizadas no presente estudo, entre as faixas Vis – SWIR (400 a 2.450nm). Em destaque estão as faixas do espectro eletromagnético do Visível (Vis), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR), dividido em duas porções. ....	42
<b>Figura 17.</b> Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de capixingui ( <i>Croton floribundus</i> Spreng.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden).....	46

<b>Figura 18.</b> Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de capixingui ( <i>Croton floribundus</i> Spreng.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden), utilizando dois componentes principais. ....	47
<b>Figura 19.</b> Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de cedro ( <i>Cedrela fissilis</i> Vell.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden). ....	49
<b>Figura 20.</b> Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de cedro ( <i>Cedrela fissilis</i> Vell.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais. ....	50
<b>Figura 21.</b> Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de embaúba-branca ( <i>Cecropia pachystachya</i> Trécul) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden). ....	51
<b>Figura 22.</b> Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de embaúba-branca ( <i>Cecropia pachystachya</i> Trécul) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais. ....	52
<b>Figura 23.</b> Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de espeteiro ( <i>Casearia gossypiosperma</i> Briq.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden). ....	54
<b>Figura 24.</b> Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de espeteiro ( <i>Casearia gossypiosperma</i> Briq.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais. ....	55
<b>Figura 25.</b> Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de guaritá ( <i>Astronium graveolens</i> Jacq.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden). ....	56
<b>Figura 26.</b> Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de guaritá ( <i>Astronium graveolens</i> Jacq.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais. ....	57
<b>Figura 27.</b> Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de ipê-roxo ( <i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.) Mattos) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden). ....	59
<b>Figura 28.</b> Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de ipê-roxo ( <i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.) Mattos) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais. ....	60
<b>Figura 29.</b> Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de jequitibá ( <i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden). ....	61
<b>Figura 30.</b> Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala, de folha de jequitibá ( <i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais. ....	62

<b>Figura 31.</b> Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de pau-d’alho ( <i>Gallesia integrifolia</i> (Spreng.) Harms.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden).	63
<b>Figura 32.</b> Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de pau-d’alho ( <i>Gallesia integrifolia</i> (Spreng.) Harms.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais.	64
<b>Figura 33.</b> Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de peroba-rosa ( <i>Aspidosperma polyneuron</i> Müll.Arg.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden).	65
<b>Figura 34.</b> Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de peroba-rosa ( <i>Aspidosperma polyneuron</i> Müll.Arg.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais.	66
<b>Figura 35.</b> Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, dos dois grupos: um composto por nove espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual e o outro referente ao eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden).	68
<b>Figura 36.</b> Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, dos dois grupos: um composto por nove espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual e o outro referente ao eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais.	69
<b>Figura 37.</b> Curvas de reflectância média de <i>pixels</i> do dossel da Floresta Estacional Semidecidual (FES) e de área de plantio de eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden), obtidas através de imagens hiperespectrais, com alta resolução espacial, geradas pelo sensor imageador AisaFENIX (SPECIM).	73
<b>Figura 38.</b> Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de <i>pixel</i> , do dossel da Floresta Estacional Semidecidual e de área de plantio de eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden).	74
<b>Figura 39.</b> Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de <i>pixel</i> , do dossel da Floresta Estacional Semidecidual e de área de plantio de eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden), utilizando dois componentes principais.	75
<b>Figura 1A.</b> <i>Croton floribundus</i> Spreng.– capixingui: (1) árvore; (2) tronco; (3) folhas face adaxial; (4) folhas face abaxial.	94
<b>Figura 2A.</b> <i>Cedrela fissilis</i> Vell.– cedro: (1) árvore; (2) tronco; (3) folha composta.	95
<b>Figura 3A.</b> <i>Cecropia pachystachya</i> Trécul – embaúba-branca: (1) árvore; (2) tronco; (3) folha face adaxial; (4) folha face abaxial.	96
<b>Figura 4A.</b> <i>Casearia gossypiosperma</i> Briq. - espeteiro: (1) árvore; (2) tronco; (3) ramo; (4) folha.	98
<b>Figura 5A.</b> <i>Astronium graveolens</i> Jacq. - guaritá: (1) árvore; (2) tronco; (3) ramo; (4) folha composta.	99

<b>Figura 6A.</b> <i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.) Mattos sinonímia <i>Tabebuia heptaphylla</i> (Vell.) Toledo – ipê-roxo: (1) árvore; (2) tronco; (3) ramo; (4) folha composta. ....	100
<b>Figura 7A.</b> <i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze - jequitibá: (1) árvore; (2) tronco; (3) ramo; (4) folha. ....	102
<b>Figura 8A.</b> <i>Gallesia integrifolia</i> (Sprengel) Harms – pau-d’alho: (1) árvore; (2) tronco; (3) ramo. ....	103
<b>Figura 9A.</b> <i>Aspidosperma polyneuron</i> Müll.Arg. – peroba-rosa: (1) copa; (2) tronco; (3) ramo; (4) folhas. ....	105

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>4</b>
2.1	COBERTURA FLORESTAL PARANAENSE.....	4
2.2	SETOR SILVICULTURAL.....	7
2.2.1	<b>O gênero <i>Eucalyptus</i></b> .....	<b>8</b>
2.3	SENSORIAMENTO REMOTO.....	11
2.3.1	<b>Sensores remotos</b> .....	<b>13</b>
2.3.2	<b>Espectrorradiometria</b> .....	<b>14</b>
2.3.3	<b>Comportamento espectral da vegetação</b> .....	<b>15</b>
2.3.4	<b>Discriminação de espécies vegetais por espectrorradiometria</b> .....	<b>18</b>
2.4	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) E ANÁLISE DISCRIMINANTE (DA) .....	20
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>24</b>
3.1	ÁREAS DE COLETA .....	24
3.1.1	<b>Estação Ecológica do Caiuá (EEC)</b> .....	<b>24</b>
3.1.2	<b>Área de plantio de <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden</b> .....	<b>29</b>
3.2	COLETAS DE FOLHAS .....	29
3.2.1	<b>Espécies nativas</b> .....	<b>29</b>
3.2.2	<b><i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden</b> .....	<b>31</b>
3.3	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS .....	31
3.3.1	<b>Aquisição e processamento dos dados obtidos com o espectrorradiômetro FieldSpec®3 Jr, ASD</b> .....	<b>32</b>
3.3.2	<b>Aquisição e processamento dos dados obtidos com a câmera hiperespectral AisaFENIX, SPECIM</b> .....	<b>33</b>
3.4	ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>41</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA EM ESCALA DE FOLHA .....	41
4.2	CLASSIFICAÇÃO EM ESCALA DE FOLHA.....	45
4.2.1	<b>Classificação de capixingui (<i>Croton floribundus</i> Spreng.) e eucalipto (<i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden)</b> .....	<b>45</b>
4.2.2	<b>Classificação de cedro (<i>Cedrela fissilis</i> Vell.) e eucalipto (<i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden).</b> .....	<b>48</b>
4.2.3	<b>Classificação de embaúba-branca (<i>Cecropia pachystachya</i> Trécul) e eucalipto (<i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden)</b> .....	<b>50</b>

4.2.4	Classificação de espeteiro ( <i>Casearia gossypiosperma</i> Briq.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) .....	53
4.2.5	Classificação de guaritá ( <i>Astronium graveolens</i> Jacq.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) .....	55
4.2.6	Classificação de ipê-roxo ( <i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.) Mattos) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) .....	58
4.2.7	Classificação de jequitibá ( <i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) .....	60
4.2.8	Classificação de pau-d'alho ( <i>Gallesia integrifolia</i> (Spreng.) Harms.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) .....	62
4.2.9	Classificação de peroba-rosa ( <i>Aspidosperma polyneuron</i> Müll.Arg.) e eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden) .....	64
4.2.10	Classificação dos espectros em grupos .....	67
4.3	CLASSIFICAÇÃO EM ESCALA DE <i>PIXEL</i> .....	72
5	CONCLUSÃO.....	78
6	RECOMENDAÇÕES.....	79
	REFERÊNCIAS .....	80
	APÊNDICE .....	93

# 1 INTRODUÇÃO

As florestas tropicais (FT) mantêm grande parte da biodiversidade mundial, contudo, atualmente representam apenas 6,4% da superfície terrestre (THOMAS et al., 2004). Inserida nesse contexto encontra-se a Floresta Estacional Semidecidual (FES), pertencente à Mata Atlântica, reconhecido internacionalmente como um dos biomas prioritário para a conservação (MYERS et al.; 2000). Contudo, mesmo havendo leis de proteção, o desflorestamento dessa formação florestal atingiu níveis alarmantes, sendo que no Estado do Paraná restam apenas 11,7% da Mata Atlântica e, mais especificamente, 3,4% da FES (FUND. SOS M.A. e INPE, 2016; PARANÁ/SEMA, 2010).

Dentre as ações que visam à conservação e recuperação dos remanescentes florestais pode-se citar a criação e manutenção de Unidades de Conservação (UC), porém, essas áreas geralmente representam pequenos fragmentos isolados. Assim, a manutenção da biodiversidade em propriedades privadas, por meio da conservação de Áreas de preservação permanente (APP) e de Reserva legal (RL), possibilita a criação de corredores ecológicos, que permitem restaurar a conectividade da paisagem, auxiliando na estabilidade dos ecossistemas e processos naturais.

No entanto, essas considerações são frequentemente ignoradas por proprietários rurais e empresas privadas e, mesmo com as obrigações previstas na legislação, as áreas de RL e APP continuam sendo suprimidas pelo corte de espécies nativas. Ainda, além disso, a legislação vigente permite que essas áreas possam ser recompostas utilizando, também, espécies exóticas. Esses dois fatos aliados podem interromper processos importantes para a efetiva conservação da biodiversidade, principalmente em áreas como a região Noroeste do Paraná, onde a pressão produtiva para explorar a terra e expandir seu uso resultou na redução da cobertura florestal a 1% da área original (CAMPOS, 1996).

Nesse contexto, torna-se necessário o desenvolvimento de métodos capazes de facilitar e otimizar o monitoramento da flora nativa e exótica em larga escala, a fim de controlar o cumprimento da legislação e elaborar planos de recuperação da biodiversidade em todas as esferas, públicas e privadas.

O sensoriamento remoto (SR) tem sido amplamente explorado como método eficiente para estudos de uso da terra, porém, somente a partir da década de 1980, o SR hiperespectral (SRH) e a espectroscopia de imageamento (EI), obtiveram expressivo avanço tecnológico. A principal característica da EI é a aquisição de dados de reflectância, de cada

*pixel* da imagem, em um grande número de bandas espectrais, estreitas e contínuas (BROOK e BEN DOR, 2011), permitindo melhor compreensão das assinaturas espectrais dos diferentes alvos.

Assim, diversos autores caracterizaram e classificaram espécies vegetais utilizando dados hiperespectrais de reflectância de folhas (COCHRANE, 2000; CASTRO-ESAU et al., 2004; CLARK et al., 2005; KALACSKA et al., 2007), sendo que atualmente, a EI aliada a altas resoluções espaciais tem se demonstrado como ferramenta importante no mapeamento da flora em ambientes tropicais (FÉRET e ASNER, 2013; BALDECK et al.; 2015; FERREIRA et al., 2016), otimizando custos, tempo e informações.

Acompanhando os avanços tecnológicos na área, recentemente, a Universidade Estadual de Maringá (UEM) adquiriu o sensor hiperespectral AisaFENIX (SPECIM, *Spectral Imaging*, Ltd., Oulu - Finlândia), trazendo uma nova realidade para a EI no país, destacando-se o monitoramento da vegetação em FTs, considerando sua alta complexidade e elevada densidade florestal.

Diante disso, a hipótese testada nesse estudo é que é possível discriminar espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual da espécie exótica *Eucalyptus urograndis*, com o uso de dados hiperespectrais de reflectância de folhas e, de imagens hiperespectrais com alta resolução espacial, obtidas com o sensor AisaFENIX.

Assim, tem-se como objetivo geral, compreender e avaliar os potenciais usos do sensor hiperespectral aerotransportado AisaFENIX no mapeamento de espécies arbóreas nativas da FES e da exótica *Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden, amplamente utilizada em projetos de recomposição de APPs e RLs, na região Noroeste do Paraná. Dentre os objetivos específicos tem-se:

- Caracterizar espectralmente e discriminar nove espécies nativas da FES da exótica *E. urograndis*, através de dados hiperespectrais de reflectância de folhas obtidos em laboratório com o espectraloradiômetro FieldSpec<sup>®</sup>3 Jr., ASD (*Analytical Spectral Devices*, Inc.), acoplado ao acessório *Plant Probe*, nas faixas do visível ao infravermelho de ondas curtas (Vis ao SWIR: 400 a 2.450nm),

- Avaliar a possibilidade de utilização de imagens hiperespectrais, com alta resolução espacial, geradas pelo sensor aerotransportado AisaFENIX, para a caracterização de áreas de vegetação, através da discriminação dos dosséis da FES e de área de cultivo *E. urograndis*, utilizando dados de reflectância de *pixels* do Vis ao SWIR1 (500 a 1.750nm).



- Avaliar o conjunto de análises estatísticas PCA-QDA (análise de componentes principais e análise discriminante quadrática) na classificação dos dados.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 COBERTURA FLORESTAL PARANAENSE

A pressão produtiva para explorar e expandir o uso da terra já subtraiu e fez desaparecer importantes ecossistemas naturais em todo o planeta. No Brasil, a expansão de fronteiras agrícolas foi calcada no uso inadequado do solo, no estímulo à expansão horizontal das propriedades e pela inobservância das leis de proteção ambiental (proteção das áreas de preservação permanente e reserva legal) e critérios de ordem conservacionista.

Aliado a esse fato, a exploração dos recursos naturais – notadamente madeira e minérios, o crescimento urbano desordenado, o barramento de rios para a construção de hidrelétricas, a poluição e outras atividades antropogênicas levaram essas regiões a um grave estágio de degradação ambiental e degeneração da biodiversidade (CAMPOS, 2006).

Ademais, ainda segundo Campos (2006), o Estado do Paraná engloba solos altamente férteis, com feições geomorfológicas e condições climáticas adequadas à produção agropecuária, o que o coloca em destaque entre os maiores produtores de grãos do Brasil, situação que, quando aliada ao descaso para com nosso patrimônio ambiental, falta de planejamento e consciência da importância dos serviços ambientais prestados pelos ecossistemas e, ainda, à pressão de grandes multinacionais do setor agrícola, também gera supressão dos ecossistemas naturais.

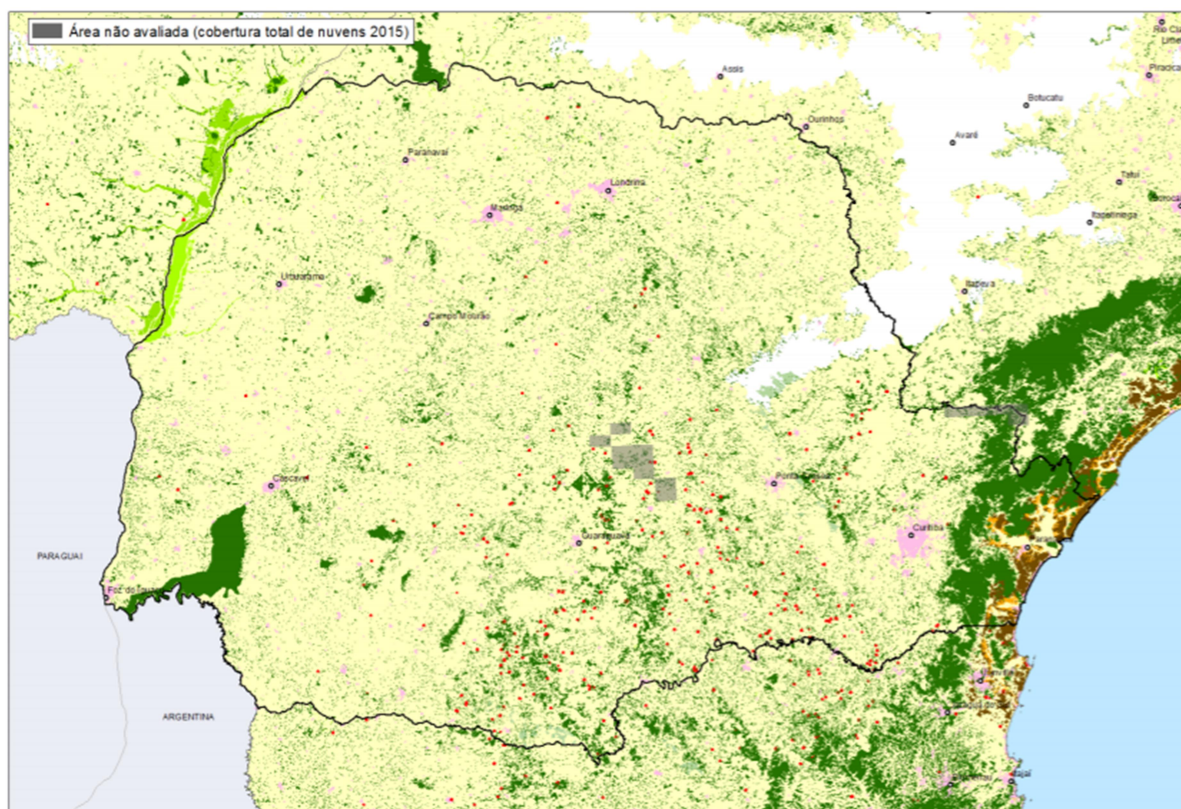
Segundo a Fundação SOS Mata Atlântica e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2016), 99% do território paranaense se enquadra na chamada Lei da Mata Atlântica (nº 11.428/2006), que dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do bioma. Nesse âmbito, Maack (1968) descreve alguns momentos históricos da ocupação do estado do Paraná, com a conseqüente fragmentação dos ecossistemas e os sérios riscos que esse processo representa à biodiversidade.

Em 1895 o Paraná dispunha de uma área de florestas secundárias equivalente a 83,41% (16.782.400 ha) da superfície de seu território. Com o avanço do processo de colonização, 58,65% da cobertura original foram desmatados, entre os anos de 1930 e 1955, sendo que em 1965 restavam apenas 4.813.600 ha de florestas remanescentes. Entre as três décadas subsequentes, o desmatamento atingiu proporções gigantescas, reduzindo a superfície florestal a apenas 7,59%, concentrados no Parque Nacional do Iguaçu e na Serra do Mar, além

de uma infinidade de pequenos fragmentos (MAACK, 1968; FUND. SOS M. A. e INPE, 1998).

O último relatório técnico da Fund. SOS M.A./INPE (2016) registrou uma área de vegetação de 11,7% em todo o território paranaense (Figura 1), não significando, porém, um aumento dos remanescentes e, sim, a inclusão das ilhas do rio Paraná na área do Estado e algumas mudanças na metodologia dos cálculos.

Na realidade, o oposto é verdadeiro, já que o mesmo relatório apontou um desflorestamento de 1.988 hectares de Mata Atlântica no Estado, significando um aumento de 116% no desmatamento em relação ao período anterior (2013 – 2014). Em escala nacional, a supressão desse bioma também continua, uma vez que houve aumento de 1% no desmatamento, considerando todos os 17 estados inseridos na Lei da Mata Atlântica.



**Figura 1.** Remanescentes florestais do bioma Mata Atlântica no Estado do Paraná. Destaques em coloração rosa representam as áreas de desflorestamentos entre 2014 e 2015.

**Fonte:** Fund. SOS M. A. e INPE, 2016.

A criação de unidades de conservação para a proteção de habitats naturais corresponde a mais básica e efetiva forma de proteção da biodiversidade (MACHADO et al., 2004), porém as áreas protegidas nunca serão mais que uma pequena porcentagem da superfície da Terra, entre 7% a 10% (PRIMACK e RODRIGUES, 2001).

Atualmente, as UCs de proteção integral do Estado do Paraná, aquelas que só permitem o uso indireto dos recursos naturais, somam apenas 1,84% da área originalmente com cobertura florestal, ademais, são pequenas reservas do patrimônio natural e encontram-se isoladas, o que pode ocasionar graves problemas futuros em relação à manutenção da variabilidade natural das espécies, da diversidade genética, dos ecossistemas e dos processos naturais (CAMPOS e COSTA FILHO, 2006).

Dentre as três grandes regiões florestais ocorrentes no Estado, Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista e Floresta Estacional Semidecidual, as ações de implementação de UCs priorizaram a região da Floresta Ombrófila Densa em detrimento de outras, resultando em uma situação extremamente crítica nas regiões Norte e Noroeste paranaense, que apresentam menos de 1% da cobertura florestal original pertencente à FES (CAMPOS, 1996; PARANÁ/SEMA, 2010).

Dessa maneira, a criação de Unidades de Conservação, apesar de ser um dos principais instrumentos aplicados à conservação da biodiversidade *in situ*, não se apresenta como solução completa para eliminar a crescente perda de biodiversidade (FERREIRA et al., 2004) e, considerando que os fragmentos podem ser drasticamente afetados pela paisagem circundante (PIRES et al., 2006), proteger apenas essas áreas pode significar sua inviabilidade a longo prazo (RODRIGUES, 1998).

Sendo assim, em 1934, com o intuito de ampliar as formas de conservação da biodiversidade *in situ*, proteger áreas de risco e áreas prioritárias à conservação e ordenar a expansão agrícola em nosso país, o governo Getúlio Vargas cria a Lei de Proteção da Vegetação Nativa, que foi reformulada em 1965, sancionando a Lei Federal 4.771. Após anos de debates e confrontos entre conservacionistas e ruralistas a legislação foi novamente reformulada, sendo a Lei Federal 12.651 sancionada em 25 de maio de 2012 (BRASIL, 2012).

De acordo com a legislação e Carpanezzi et al. (2006), as APPs se destinam à preservação *strictu sensu* e ocupam posições críticas do relevo – ao longo dos rios, topos de morros, ao redor de nascentes e outras – ou tratam de ecossistemas frágeis, como dunas e mangues. A RL consiste, no caso do Paraná, de 20% da superfície da propriedade, onde o uso é condicionado ao manejo sustentável.

Franco (2005) considera que a utilização integrada das áreas de APP, RL, remanescentes florestais e UC, possibilita um melhor resultado à proteção da biodiversidade e, considerando a existência de legislação específica para as áreas de entorno das UCs (Lei 9.985/2000), há condições legais e estratégicas bastante favoráveis para a aplicação da

sinergia entre essas unidades e outras áreas legalmente protegidas, visando à conservação de paisagens fragmentadas (BRASIL, 2000; TOREZAN, 2007).

Contudo, mesmo com as legislações vigentes, o cenário ambiental em nosso país é crítico. Segundo dados do Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR, 2016) a área total de RL e APP a regularizar, em todo o país, abrange 155.300.991,13 e 3.544.891,08 hectares, respectivamente.

Assim, considerando a importância da conservação de áreas nativas inseridas em propriedades privadas, a Lei Estadual 18.295, de 10 de novembro de 2014 (PARANÁ, 2014) estipula normas para a regularização das áreas de RL e APP, visando estimular e possibilitar aos proprietários de imóveis rurais o cumprimento da legislação de forma consistente com seu uso econômico. Uma das formas de regularização permite a utilização de até 50% de espécies exóticas (lenhosas, perenes ou de ciclo longo) em sistema agroflorestal com espécies nativas de ocorrência regional.

Neste contexto torna-se evidente a importância do monitoramento da vegetação nativa e exótica em larga escala, a fim de assegurar a conservação da biodiversidade não apenas em UCs, mas sim, ao longo de todo o território, considerando que outras formas de conservação da biodiversidade *in situ* garantem a proteção de áreas de risco e de áreas prioritárias à conservação, possuem a função de ordenar a expansão agrícola e, destacadamente, participam da restauração da conectividade da paisagem através dos corredores ecológicos, reduzindo a fragmentação e facilitando o fluxo genético entre populações.

## 2.2 SETOR SILVICULTURAL

Um dos setores agropecuários em ascensão atualmente, tanto a nível internacional, como nacional, é a silvicultura. O Brasil é o país que ocupa a sexta posição em áreas silviculturais, representando 3% da área de espécies florestais plantadas em todo o mundo (Tabela 1), ou cerca de 7,74 milhões de hectares (FAO, 2010; IBÁ, 2015). Dessa área, 93% são ocupados por plantios das espécies pertencentes aos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, sendo 5,1 milhões de ha de eucalipto e 1,6 milhão de ha de pinus. Acácia, seringueira, paricá, teca, araucária e pópulos ocupam os 522,1 mil ha restantes (ABRAF, 2013).

**Tabela 1.** Área de produção de espécies florestais, nos principais países produtores

País	Área Plantada (milhões ha)	%
China	77	29
EUA	25	10
Rússia	17	6
Japão	10	4
Índia	10	4
Brasil	7	3

Fonte: FAO, 2010.

Ainda segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF), em 2012, o valor bruto da produção do setor, a nível nacional, foi de 56,3 bilhões de reais, sendo que mais da metade da receita é proveniente da celulose (52%), 20% provem da madeira, 20% do papel e 8% de móveis. O país destaca-se pelo posto de terceiro maior produtor mundial de celulose (proveniente da fibra curta de eucalipto) e o nono maior produtor mundial de papel.

O Paraná ocupa o posto de segundo maior produtor de lenha e madeira em tora para produção de papel e celulose do Brasil (IBGE/PEVS, 2015), significando uma área destinada ao plantio de espécies florestais exóticas de aproximadamente 1,5 milhão de hectares, correspondente a 7% do solo paranaense.

Em 2012, mesmo com o decréscimo de 0,47% da renda de alguns produtos florestais, houve um aumento na produção tanto de pinus, quanto de eucalipto, sendo que a trajetória econômica aponta para um aumento da produção de eucalipto e redução do pinus (SEAB/DERAL, 2014).

### **2.2.1 O gênero *Eucalyptus***

Em 1788 o botânico francês Charles Louis L'Héritier de Brutelle publicou a primeira descrição botânica do gênero *Eucalyptus*. Este gênero inclui mais de setecentas espécies de grande expressão nos campos de produção econômica florestal. Originárias da Austrália, com exceção de um pequeno número de espécies, que possuem como países de origem Nova Guiné, Indonésia e Filipinas, representam um gênero de grande plasticidade fenotípica, adaptando-se satisfatoriamente em uma grande diversidade de condições edafoclimáticas (TUME, 2003; EMBRAPA, 2014; ANDRADE, 1991; DEL QUIQUI et al., 2001).

O *Eucalyptus spp.* possui a seguinte classificação taxonômica:

Divisão: Magnoliophyta (Angiospermae)

Classe: Dicotyledoneae

Ordem: Myrtales

Família: Myrtaceae

Subfamília: Leptospermoidae

A maioria das espécies desse gênero possui folhagem persistente e apresentam dimorfismo foliar, ou seja, as plantas jovens apresentam folhas opostas, ovais a arredondadas e, após um a dois anos, os indivíduos passam a apresentar folhas alternadas, lanceoladas a falciformes e estreitas (TUME, 2003).

Com relação às plantações florestais, *Eucalyptus* é um dos gêneros mais disseminados em todo o mundo, devido ao seu rápido crescimento, ampla adaptabilidade e utilização, como na fabricação de papel e celulose, produção de energia (lenha e carvão), madeira de qualidade e extração de óleos essenciais.

Devido à semelhança das latitudes tropicais e subtropicais do Brasil e Austrália, tornou-se possível a introdução e o cultivo com fins comerciais de espécies de eucalipto em nosso país (SILVA, 1983), sendo que, incentivos fiscais iniciados na década de 60 culminaram com a expansão da cultura do Estado de São Paulo para todo o centro e sul do país.

Segundo relatório da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2015), a área de plantio de *Eucalyptus* totalizou 5,56 milhões de hectares em 2014, representando 71,9% da área de plantios florestais no Brasil, localizadas principalmente nos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Bahia, Rio Grande do Sul, Espírito Santo e Paraná (Figura 2), que em 2012 detinham 83,6% dos plantios do gênero em questão (ABRAF, 2013).



**Figura 2.** Área e distribuição de plantios florestais com *Eucalyptus* nos Estados do Brasil, 2012.

**Fonte:** ABRAF, 2013.

Dados estatísticos referentes ao ano de 2012, divulgados pela ABRAF, indicam que o Estado do Paraná possuía uma área plantada de *Pinus* e *Eucalyptus* de 619.731 ha (75,8%) e 197.835 ha (24,2%), respectivamente. Apesar da predominância de cultivos de *Pinus* no Paraná, o eucalipto tem se destacado na produção madeireira no Estado, principalmente na região Noroeste, que apresenta solos e condições climáticas que proporcionam elevadas produções.

Considerando que o Paraná não apresenta nenhuma restrição hídrica no zoneamento de riscos climáticos (IAPAR, 1978), as baixas temperaturas no inverno caracterizam o maior impedimento para o desenvolvimento da cultura, sendo um fator de risco diminuto na região noroeste. Além disso, diversas empresas do setor energético estão instaladas no Noroeste paranaense, sendo o setor que mais consome matéria-prima florestal no Estado, na forma de lenha e carvão.

Segundo Paludzyszyn Filho et al. (2006) as espécies recomendadas para o plantio no Estado do Paraná são: *Eucalyptus grandis*, *E. dunnii*, *E. benthamii*, *E. saligna*, espécies essas que apresentam boa aptidão para a produção madeireira para fins energéticos e/ou sólidos



madeiráveis. Outro grupo de espécies que também merece atenção é formado por *E. viminalis*, *E. camaldulensis*, *E. cloeziana*, *E. badjensis*, *Corymbia citriodora* (antiga denominação do *E. citriodora*) e o híbrido entre *E. benthamii* e *E. dunnii*. Outro híbrido adaptado e bastante utilizado na região é o *E. urograndis*, híbrido de *E. urophylla* e *E. grandis*.

Como já mencionado, devido à permissão legislativa, espécies de eucalipto estão ultrapassando as barreiras relacionadas às áreas de plantio, ocupando até 50% das áreas de APP e RL, principalmente no Noroeste paranaense. Essa situação, somada a todo histórico de supressão de áreas de vegetação nativa que o Estado do Paraná sofreu, influencia negativamente um dos principais objetivos da manutenção da biodiversidade em APPs e RLs, que é a restauração da conectividade de remanescentes florestais e, a consequente facilitação do fluxo genético entre populações de fauna e flora.

Para que o monitoramento, tanto da biodiversidade e da influência desse método de recomposição florestal nas populações de flora e fauna nativas, quanto do cumprimento da legislação, seja efetivo, torna-se extremamente necessária a utilização de tecnologias eficazes em distinguir espécies florestais, que otimizem recursos e tempo.

A ciência do SR destaca-se como uma das mais bem sucedidas tecnologias de coleta automática de dados para o levantamento e monitoração dos recursos terrestres em escala global (MENESES, 2012), demonstrando ser uma estratégia eficiente e de baixo custo para a avaliação da diversidade biológica vegetal. Para que essa avaliação seja eficiente, é necessária a caracterização espectral de espécies vegetais.

### 2.3 SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto foi definido por Lillesand e Kiefer (1994) como a ciência que possui o objetivo de obter informações sobre um objeto, área ou fenômeno, através de equipamentos que não estão em contato com a situação sob investigação, ou seja, é uma ciência que utiliza tecnologias para a coleta de dados de forma remota, sem que haja qualquer tipo de contato físico entre o sensor e o objeto.

A origem do SR está relacionada com o desenvolvimento da fotografia e à pesquisa espacial. A primeira fotografia aérea relatada na literatura data de 1839, sendo que em 1840 já se aplicava em levantamentos topográficos, caracterizando o primeiro produto do SR (NOVO e PONZONI, 2001).

Porém, somente em 1960 o termo sensoriamento remoto foi mencionado na literatura científica. A década de 60 ficou conhecida como a década da corrida espacial, devido ao impulso de diversos satélites ao espaço, com variados objetivos, dos quais os meteorológicos foram os pioneiros. A evolução dos sensores dos satélites meteorológicos significou o início das pesquisas relacionadas às diferentes feições de nosso planeta, alavancando a ciência do SR.

Além disso, a década de 60 foi também marcada pelas primeiras fotografias da superfície terrestre obtidas, a nível orbital, pelo próprio homem, utilizando câmeras fotográficas manuais, quando satélites tripulados, como Mercury, Gemini e Apollo asseguraram o futuro dessa ciência (MENESES, 2012).

Contudo, para garantir o armazenamento e a transmissão de dados da superfície terrestre, tornou-se necessário o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos que coletassem dados em formatos digitais, gerando, assim, os chamados sensores imageadores. O primeiro satélite de SR que combinou as duas tecnologias, satélite artificial e sensor imageador, foi o chamado ERTS-1, posteriormente renomeado Landsat 1, colocado em órbita em julho de 1972, caracterizando um marco extremamente importante para a era do SR moderno (MENESES, 2012).

Ainda sob a perspectiva espacial, em nosso país, a pesquisa nessa área iniciou-se com a criação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em 1961, então denominado Grupo de Organização da Comissão Nacional de Atividades Espaciais (GOCNAE). Logo em 1969, o grupo Sensoriamento Remoto é criado dentro do órgão, consolidando o pioneirismo brasileiro, no hemisfério sul, no domínio dessa tecnologia. A missão 96 (década de 70) é um dos exemplos desse pioneirismo, em que, em colaboração com a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), foi realizado um levantamento experimental aerotransportado na região do Quadrilátero Ferrífero (MG), utilizando vários tipos de sensores imageadores. Ainda em destaque nacional, tem-se a inauguração da estação de recepção de imagens de SR de Cuiabá, em 1973, tornando o Brasil o terceiro país a receber imagens do satélite Landsat. Desde o início, o Instituto desenvolveu grupos de pesquisa em padrão excelência, formando os primeiros pesquisadores nacionais especializados na área e contribuindo para a consolidação de diversas metodologias, desde a aquisição até a interpretação de dados, alavancando a ciência em todo o território nacional e, também, influenciando a pesquisa internacional (MENESES, 2012; CÂMARA, 2011).

Da escala orbital para a escala aérea, um enorme passo foi dado quando a NASA JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) introduziu o conceito de espectroscopia de imageamento (EI), com o desenvolvimento do primeiro sensor hiperespectral aerotransportado, o *Airborne Imaging Spectrometer* (AIS), lançado em 1983 (GOETZ, 2009).

Assim, com o avanço das técnicas, os trabalhos passaram a incluir quantificação e caracterização de parâmetros geofísicos e bioquímicos, ao invés de somente mapear determinada feição da superfície terrestre, sendo que atualmente, existem diversos tipos de sensores imageadores e não-imageadores, com diferentes níveis de aquisição de dados e com os mais variados parâmetros de resolução espectral, espacial e temporal (NOVO e PONZONI, 2001; MENESES, 2012), fazendo do SR uma ciência interdisciplinar que engloba profissionais de dezenas áreas, apresentando aplicabilidade em incontáveis ramos da pesquisa e monitoramento, como mapeamentos e caracterizações de recursos naturais (LEE et al, 1999; BRANDO e DEKKER, 2003; NANNI e DEMATTÊ, 2006; CHICATI, 2011), mineração e exploração geológica (KRUSE et al.; 2003; LI e NARAYANAN, 2004), monitoramento de fauna e flora (BURTENSCHAW et al., 2004; CLARK, 2005; BONTER e DONOVAN, 2009; AMARAL, 2014), acompanhamento de produções agropecuárias (GROFF et al., 2013; NEIRO, 2013; GASPAROTTO, 2014; SILVA JUNIOR, 2016), monitoramento de fenômenos e desastres ambientais e climatológicos (VOOGT e OKE, 2003; CLARK et al., 2003; TRALLI et al.; 2005; KOKALY et al.; 2007; TOMZHINSKI et al.; 2011), entre muitos outros exemplos.

### **2.3.1 Sensores remotos**

De acordo com Moreira (2003), os sensores remotos podem ser divididos em: ativos ou passivos; e imageadores ou não imageadores. Os sensores ativos possuem fonte própria de radiação eletromagnética (REM), como os radares e o espectraloradiômetro FieldSpec, ASD, quando utilizado com a extensão *Plant Probe*, ao passo que sensores passivos dependem de uma fonte externa de REM para operarem, sendo o sol a principal fonte (ex.: TM, OLI, AVIRIS, HYPERION, AisaFENIX, entre outros).

Os sensores imageadores, como o nome já diz, fornecem imagem do alvo, a qual contém as informações de interesse, já sensores não imageadores apresentam as informações de forma numérica, sendo os gráficos mais utilizados. Os sensores também podem ser

classificados com relação ao nível de aquisição de dados: laboratorial, terrestre, aéreo e orbital.

Contudo, em destaque está a resolução espectral. Os referidos sensores são agrupados em multi ou hiperespectrais. Sensores remotos multiespectrais foram desenvolvidos para que a coleta de dados seja realizada nas chamadas janelas atmosféricas, em que grande quantidade da REM atinge a superfície terrestre, possibilitando a obtenção de curvas espectrais somente em algumas faixas do espectro eletromagnético.

Já os sensores hiperespectrais apresentam grande vantagem em relação aos multiespectrais por coletarem dados em um grande número de bandas espectrais, sendo elas estreitas e contínuas, através das porções visível, infravermelho próximo e médio e infravermelho termal do espectro eletromagnético, possibilitando melhor caracterização espectral dos alvos de interesse, através de espectros de reflectância ou emitância contínuos (LILLESAND et al., 2014).

Além disso, essa tecnologia permite que a interferência atmosférica seja caracterizada e removida de todo o espectro obtido (GOETZ, 2009; BEN-DOR et al., 2013). Sensores hiperespectrais imageadores ainda possuem a vantagem de gerar informações em forma de imagem, podendo assim, extrair espectros detalhados de cada *pixel* da cena.

Com relação ao nível de aquisição, sensores orbitais apresentam limitações quanto às resoluções temporais e espaciais, assim, a espectroscopia de imageamento a nível aéreo permite conciliar elevada resolução espectral, espacial e temporal, pois, a aquisição de dados pode ser programada sempre que necessário, facilitando o planejamento e desempenho de pesquisas.

### **2.3.2 Espectrorradiometria**

Segundo a definição clássica citada anteriormente, no SR não existe contato físico entre o sensor e o objeto de estudo, assim, a radiação eletromagnética é o elo entre os dois fatores. Devido às diferentes composições físico-químicas dos objetos, a REM interage de modo diferenciado com cada tipo de alvo, cabendo ao sensor, receber a energia refletida ou emitida por determinado alvo e transformá-la em informação, seja em formato de imagem, numérico, gráfico, entre outros.

Mais especificamente, cada material possui uma estrutura atômica e molecular particular, assim, a distribuição dos elétrons em diferentes níveis energéticos, ao redor dos

núcleos dos átomos, influencia a quantidade de energia da REM absorvida pela matéria, implicando, conseqüentemente, na quantidade de energia refletida. Essa interação entre a REM e determinado alvo é conhecida como comportamento espectral ou assinatura espectral (FIGUEIREDO, 2005). Assim, a espectrorradiometria é o estudo da dinâmica e da estrutura molecular através da análise dos espectros de absorção, transmissão e reflexão da radiação pelos diferentes tipos de materiais (NOVO e PONZONI, 2001).

Com relação às grandezas radiométricas, que são a base da espectrorradiometria, são definidas: irradiância, radiância, reflectância, absorvância e transmitância. Irradiância é definida como o fluxo radiante solar (principal fonte de REM no SR) incidente na superfície do terreno, sendo que radiância é o fluxo radiante que deixa um elemento da superfície do terreno, medido pelo sensor.

Quando a REM atinge a superfície dos materiais, parte da energia é refletida, parte é absorvida e ainda, outra parte é transmitida. A relação entre essas grandezas pode ser explicada pela lei da conservação da energia:  $\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t$ .

A fração do fluxo incidente ( $\phi_i$ ) que é refletida ( $\phi_r$ ) expressa a reflectância ( $\rho$ ), a fração absorvida ( $\phi_a$ ) expressa absorvância ( $\alpha$ ) e a transmitida ( $\phi_t$ ) representa a transmitância ( $\tau$ ) (SLATER, 1980). Desta forma, a somatória dos três processos é igual a um:  $1 = \rho + \alpha + \tau$  (ALVARENGA et al., 2003; MENESES, 2012; NOVO e PONZONI, 2001).

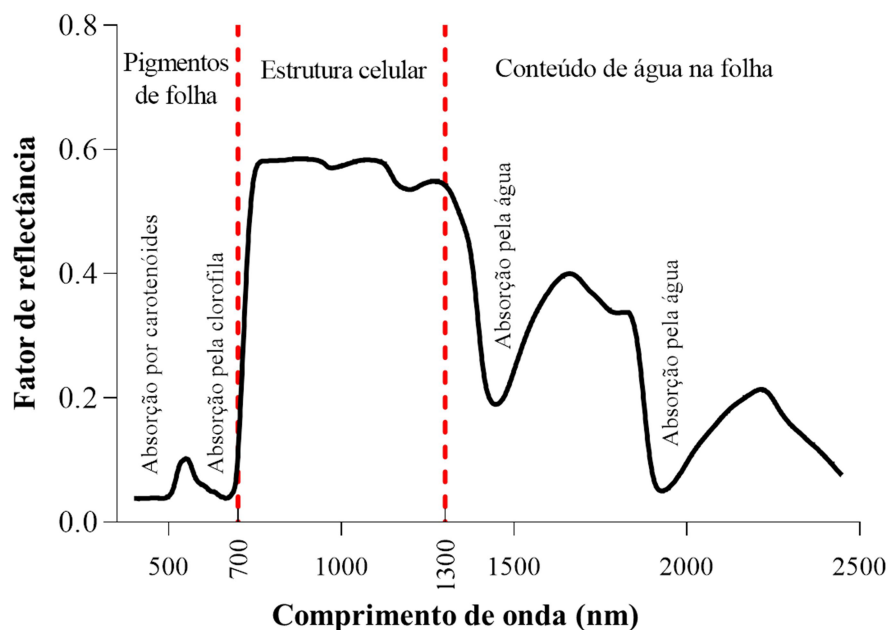
### **2.3.3 Comportamento espectral da vegetação**

De todos os elementos constituintes da vegetação, a folha representa o principal deles, quando se considera o processo de interação com a REM. Um fluxo de radiação incidente sobre qualquer elemento da vegetação, como folhas, galhos, flores, frutos, entre outros, está sujeito ao espalhamento e absorção, sendo que o processo de espalhamento pode ser dividido em processos de reflexão e transmissão através do elemento (NOVO e PONZONI, 2001).

Os três tecidos básicos de uma folha são: epiderme, mesófilo fotossintético e tecido vascular, e o seu comportamento espectral depende justamente de sua composição, morfologia e estrutura interna, havendo, portanto, diferenças no comportamento espectral entre grupos geneticamente distintos (GATES et al., 1965), sendo esse, o fundamento básico que justifica a utilização de técnicas do SR para distinguir espécies vegetais e caracterizar coberturas florestais e áreas agrícolas.

Em 1918, Willstatter e Stol desenvolveram uma teoria, ainda válida atualmente, sobre a trajetória da REM em uma folha (ALLEN et al., 1973). A epiderme é responsável pela reflexão de uma pequena quantidade de REM, sendo que a maior parte é transmitida para o mesófilo esponjoso, onde os raios podem incidir nas paredes celulares e serem transmitidos através da folha ou refletidos de forma aleatória, pois, no geral, as células dos tecidos foliares possuem uma estrutura irregular, sendo orientadas espacialmente em diversos ângulos, principalmente as células do mesófilo esponjoso.

A Figura 3 representa a curva de reflectância característica de uma folha verde sadia de peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg.), abrangendo a região do visível (Vis) ao infravermelho de ondas curtas (SWIR, *short wave infrared*).



**Figura 3.** Curva de reflectância espectral típica de uma folha verde sadia de *Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg. (peroba-rosa).

**Fonte:** Adaptado de Novo, 2010.

Na faixa do Vis (entre 350 e 700nm aproximadamente) os pigmentos dominam a reflectância espectral, sendo eles clorofila, carotenos e xantofilas. A primeira banda de absorção da REM nessa faixa, próxima aos 480nm, refere-se à presença de carotenóides e xantofilas e a segunda, próxima aos 680nm, é devido ao processo de fotossíntese da vegetação, relacionado às clorofilas. Ainda na faixa do visível, a cor verde está relacionada com o comprimento de onda próximo a 500nm, por isso observa-se um pequeno pico de reflectância nessa região, justificando a coloração verde da maioria das folhas.

A estrutura interna da folha, mais especificamente a estrutura do mesófilo, está relacionada com os comprimentos de onda entre 700 e 1.300nm, aproximadamente (região do infravermelho próximo (NIR, *near infrared*). Nessa região do espectro, observa-se que o fator de reflectância é elevado e constante, comportamento relacionado com a não utilização dessa radiação nos diversos processos de crescimento dos vegetais, havendo a necessidade de manutenção do equilíbrio energético no interior da planta, evitando o superaquecimento e, conseqüentemente, a destruição da clorofila. De modo geral, quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno da radiação incidente, e conseqüentemente, maior será a reflectância.

No NIR também é possível observar dois pontos de suave inflexão da curva, em 980 e 1.200 nm, aproximadamente. Essas duas regiões estão associadas à presença de água na folha, ou seja, com as ligações O-H.

Por fim, na região do SWIR, entre 1.300 e 2.500 nm, verifica-se duas regiões de grande absorção da REM, devido, também, à presença de água na folha, em torno de 1.400 e 1.900nm, sendo que, quanto maior for a quantidade de água na folha, menor será a reflexão da radiação ao longo do SWIR.

Compostos estruturais, como lignina e celulose, também estão relacionados com a faixa do SWIR, contudo, a presença de água em folhas verdes saudáveis mascara a influência desses fatores na resposta espectral (GATES et al., 1965; CURRAN, 1989; NOVO e PONZONI, 2001; GASPAROTTO, 2014; SILVA JUNIOR, 2014).

Ainda pouco se conhece sobre as variações bioquímicas entre pigmentos, água, nutrientes e carbono foliar das espécies tropicais, contudo, é evidente que esses fatores afetam diretamente as propriedades ópticas foliares (ASNER, 2008; ASNER e MARTIN, 2008).

Quando a escala analisada é ampliada, outros elementos influenciam os dados gerados. Há de se considerar que um dossel é constituído por muitos elementos da própria vegetação, como folhas, galhos, frutos e flores. O destino do fluxo radiante incidente sobre um destes elementos é dependente das características do fluxo (comprimentos de onda, ângulo de incidência e polarização) e das características físico-químicas dos mesmos.

Assim, Demattê (1999) e Ben-Dor et al. (2009) ressaltam que, antes de trabalhar com respostas espectrais obtidas a nível aéreo e orbital, é necessário compreender as variações nos dados através de medidas radiométricas realizadas em laboratório, para que, com dados espectrais padrões, seja possível validá-los e extrapolá-los para sensores suborbitais e orbitais.

Como já mencionado, um sensor que possibilita a caracterização de alvos a nível terrestre é o espectrorradiômetro FieldSpec, sendo que, a nível laboratorial ou com a extensão *Plant Probe*, a aquisição de dados é realizada de maneira controlada, eliminando qualquer influência atmosférica e variações de luminosidade, gerando dados extremamente confiáveis (BEN DOR et al., 2009).

Com relação aos demais níveis de aquisição de dados, sensores hiperespectrais orbitais e aerotransportados são utilizados em detrimento aos multiespectrais quando se deseja adquirir informações da superfície terrestre com qualidade comparável aos dados obtidos a campo, permitindo correlacioná-los com espectros padrões de referência.

#### **2.3.4 Discriminação de espécies vegetais por espectrorradiometria**

Devido à escassa disponibilidade de informações espacial e temporalmente completas, o monitoramento, conservação e manejo de florestas tropicais têm sido negligenciados em todas as esferas (CLARK et al., 2005).

A utilização do SR hiperespectral (SRH) nesse âmbito encontra-se em estágio inicial, devido à disponibilidade limitada dos dados, a dificuldade de acesso às áreas de interesse e a grande complexidade dessas formações florestais (SÁNCHEZ-AZOFEIFA et al., 2009). Ainda, dados com elevada resolução espacial englobam gastos elevados com aerolevantamentos ou na aquisição de imagens orbitais, dificultando ainda mais a evolução do conhecimento na área.

Contudo, a espectroscopia de imageamento é, atualmente, a mais promissora tecnologia para mapeamento e monitoramento de espécies vegetais. O princípio de que dados espectrais possam ser utilizados para a classificação de vegetais componentes de FT, que apresentam alta diversidade, baseia-se no pressuposto de que a variabilidade espectral entre espécies excede a variabilidade espectral referente a uma única espécie, como constatado por Clark et al. (2005), Castro-Esau et al. (2006) e Ferreira et al. (2013).

O SRH também é capaz de detectar, além de apenas espécies, grupos funcionais, ou seja, indivíduos que manifestam respostas similares a diversos fatores ambientais, como espécies de hábitos variados (KALACSKA et al., 2007; HESKETH e SÁNCHEZ-AZOFEIFA, 2012) e espécies invasoras (USTIN e GAMON, 2010).



Cochrane (2000) foi um dos primeiros autores a utilizar dados hiperespectrais para a classificação de espécies de floresta tropical úmida, em que onze espécies foram discriminadas, em escala de folha, com 94% de acurácia.

A partir de então, outros autores colaboraram para a compreensão das características ópticas de folhas, ampliando o conhecimento e provando o potencial da utilização de dados hiperespectrais na classificação de espécies vegetais (FUNG et al., 2003; CASTRO-ESAU et al., 2004; CLARK, 2005; RIVARD et al., 2008, FÉRET e ASNER, 2011).

Com a evolução da tecnologia, trabalhos focados em escala de folha auxiliaram a expansão da escala de discriminação para *pixels*, dosséis e indivíduos, aperfeiçoando o mapeamento de FTs.

Thenkabail et al. (2004) compararam dados multi e hiperespectrais na discriminação de classes de espécies pertencentes à FT africana. Através da análise discriminante, os dados multiespectrais provenientes dos sensores orbitais IKONOS, ALI e ETM+ geraram acurácias na classificação entre 42 a 51%. A acurácia passou a 96% quando dados do sensor Hyperion foram utilizados.

Assim, Clark et al. (2005) avaliaram a utilidade de alta resolução espectral e espacial na classificação de espécies em escala de copa, em uma área de FT na Costa Rica. Como esperado, a acurácia na discriminação de sete espécies decaiu de acordo com a escala de coleta de dados, contudo a análise discriminante linear (LDA) proporcionou acurácia de 92% na classificação em escala de copa, destacando a vantagem da utilização de imagens hiperespectrais aliadas à alta resolução espacial.

Féret e Asner (2012) também obtiveram sucesso na classificação em escala de copa, em áreas de FT havaiana, utilizando EI, sendo que, em trabalho posterior (2013), os mesmos autores constataram que métodos de classificação paramétricos (LDA, RDA) e *Support Vector Machines* (SVMs) apresentaram superioridade na identificação.

Ademais, Naidoo et al. (2012), Ferreira et al. (2014), Amaral (2014) e Baldeck et al. (2015), observaram a vantagem da utilização de dados hiperespectrais aliados a altas resoluções espaciais, para auxiliar a discriminação de espécies em ambientes tropicais, com elevada diversidade florística.

Com relação ao método estatístico análise discriminante (AD), além dos trabalhos já citados, Lehmann et al. (2015) também utilizaram esse classificador, após redução dos dados por análise de componentes principais (PCA), para identificação de espécies exóticas

invasoras na região do Mediterrâneo, obtendo 98,90% de acurácia utilizando dados hiperespectrais obtidos no campo.

Zhang et al. (2014) utilizaram o coeficiente  $R^2$ , PCA e *stepwise* para selecionar bandas ideais para a classificação hiperespectral de espécies de mangues, obtendo 90% de acurácia através da análise discriminante.

Silva Junior (2016) obteve resultados similares na discriminação de variedades de soja utilizando dados hiperespectrais, sendo que o acerto global da análise discriminante linear, em escada de folha, foi em média 99,28%.

Outro trabalho recente foi realizado por Ferreira et al. (2016), em que os autores discriminaram e mapearam oito espécies da FES, utilizando imagens hiperespectrais geradas pelos sensores AisaEAGLE e AisaHAWK, também produzidos por SPECIM. LDA foi o método classificador que apresentou melhor acurácia a nível de *pixel*, atingindo 84%, sendo que uma variação de SVM foi o método que melhor mapeou as espécies, identificando corretamente 84,9% das copas.

Diversos outros autores utilizaram a análise discriminante para a classificação de espécies vegetais (DATT, 2000; RIVARD et al., 2008; PAPES et al.; 2010), além de métodos de redução de dados espectrais para posterior discriminação (CASTRO-ESAU et al., 2004; KALÁCSKA et al., 2007).

Assim, aliando dados com elevada resolução espectral e espacial, para a discriminação de espécies arbóreas nativas da FES e da espécie exótica eucalipto, tanto em escala de folha, como *pixel*, o presente trabalho buscou avaliar a PCA, como método de redução de dados espectrais e a análise discriminante, como classificador, ampliando o conhecimento espectral dessa diversidade florística, para posterior mapeamento e avaliação do uso e ocupação da terra na região noroeste do Paraná.

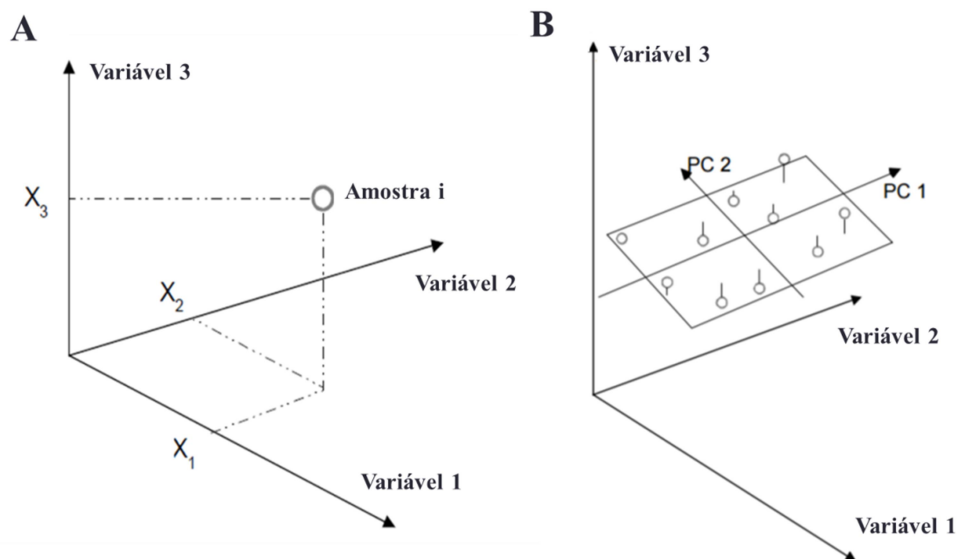
#### 2.4 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) E ANÁLISE DISCRIMINANTE (DA)

A análise de componentes principais (PCA, *principal component analysis*) é um método bastante utilizado para análise de dados que carregam grande quantidade de informações, que são parcialmente ocultas devido à sua alta complexidade. Assim, a PCA é um método de projeção dos dados que auxilia na interpretação de toda informação contida nos mesmos.

Com esse método é possível identificar diferenças e similaridades entre amostras, como padrões e agrupamentos, se as variáveis do modelo estão correlacionadas ou são independentes e quais variáveis mais contribuem para construção de modelos de classificação (análise discriminante linear - LDA, análise discriminante quadrática - QDA, *soft independent modeling of class analogy* - SIMCA) e regressão (regressão por mínimos quadrados parciais - PLS, regressão por componentes principais - PCR), por exemplo.

A PCA realiza uma transformação linear ortogonal, transformando o conjunto de variáveis (no caso, a curva espectral) em coeficientes descorrelacionados (componentes principais) em um novo plano de coordenadas. Para melhor entendimento, é possível supor que cada amostra é representada por um ponto em um espaço multidimensional, sendo que, o que determina seu local nesse espaço são suas respostas para cada variável, ou seja, cada variável representa um eixo de coordenadas no espaço multidimensional, como representando na Figura 4A (CAMO, 2006).

Assim sendo, cada componente principal é uma combinação linear de todas as variáveis originais, composta por um autovetor e um autovalor. As componentes são independentes entre si e estimadas com o propósito de reter o máximo de informação, em termos da variação total, contida nos dados. Utilizando o exemplo, as PCs formam um novo conjunto (e menor) de eixos de coordenadas, porém, ainda envolvendo os dados originais agrupados, de forma que se tenha uma boa aproximação das informações contidas nos mesmos (Figura 4B).



**Figura 4.** (A) Amostra representada em um espaço multidimensional. (B) Componentes principais 1 e 2 em um espaço multidimensional.

Fonte: CAMO, 2006.

As PCs são computadas de maneira interativa, sendo que a primeira PC é a que carrega a maior quantidade de informação (possui a maior variância total explicada). A segunda PC irá representar o máximo da informação residual possível, que não foi levada em conta na PC1, e assim por diante, priorizando a interpretação de forma ranqueada. O ideal é que se utilize o número de componentes principais que acumule 70% ou mais de proporção da variância total (REGAZZI, 2000).

Com os dados representados em forma de matriz, o modelo segue a seguinte equação:

$$X = T P^T + E$$

Onde a matriz original  $X$  é decomposta em um produto de duas matrizes menores, uma matriz de *Scores* ( $T$ ) e uma matriz de *Loadings* ( $P$ ), sendo  $E$  a matriz relacionada ao erro (WOLD adaptado, 1987). A matriz de *Scores* traz informações das amostras na nova base vetorial, enquanto a matriz de *Loadings* carrega informações relacionadas às variáveis.

O conjunto de *Scores* e *Loadings* é denominado Componentes Principais, ou seja, é a parte estrutural do modelo. O restante é denominado resíduo ou erro e representa a fração da variação que não pode ser interpretada.

A partir da PCA é possível construir modelos de discriminação e classificação de objetos, como a análise discriminante. Essa técnica da estatística multivariada estuda a possibilidade de separação de objetos de uma população em duas ou mais classes, utilizando características capazes de diferenciar ou agrupar amostras em diferentes grupos previamente definidos (KHATTREE e NAIK, 2000; JOHNSON e WICHERN, 2000). Ou seja, contrária às análises de regressão, que são utilizadas para prever valores quantitativos de uma ou mais variáveis, os modelos de classificação são úteis quando a resposta é uma categoria que determinada amostra pode, ou não pertencer.

Fisher (1936) foi quem inicialmente abordou a questão, postulando que a análise discriminante possui o objetivo de classificar um indivíduo  $X$  em uma de várias populações  $\pi_i$  ( $i=1, 2, \dots, g$ ) previamente definidas, utilizando como base um número  $p$  de características, buscando minimizar a probabilidade de classificar erroneamente um indivíduo.

A classificação de uma observação em uma das populações previamente definidas baseia-se em um vetor de variáveis para cada observação. A distância entre a observação e o centroide de cada população é calculada e então, a amostra é alocada na população ao qual apresentou menor distância (COLEMAN e TADESSE, 1995).

Dentre as funções mais conhecidas, temos a função discriminante linear de Fisher, que assume que as populações possuem distribuição normal e a mesma matriz de covariâncias. Contudo, a média e a variância das populações são, normalmente, desconhecidas, havendo a necessidade de estimação desses parâmetros, sendo que, quando as variâncias das populações não são iguais, têm-se funções discriminantes quadráticas.

A função discriminante possui o papel de definir uma fronteira entre as populações em questão, contudo, no mundo real, essa delimitação não está exatamente definida, ocorrendo sobreposições. Uma boa classificação deve resultar em uma pequena probabilidade de má classificação.

Com relação ao tipo de função a ser utilizada, segundo Johnson e Wichern (2000), é possível aplicar testes para a igualdade das matrizes de covariâncias das populações, contudo, os resultados desses testes não apresentam condições suficientes para selecionar o modelo da função discriminante (linear ou quadrático), sendo então recomendada a aplicação de um teste de validação, utilizando uma fração das amostras, para decidir qual o melhor modelo a ser adotado.

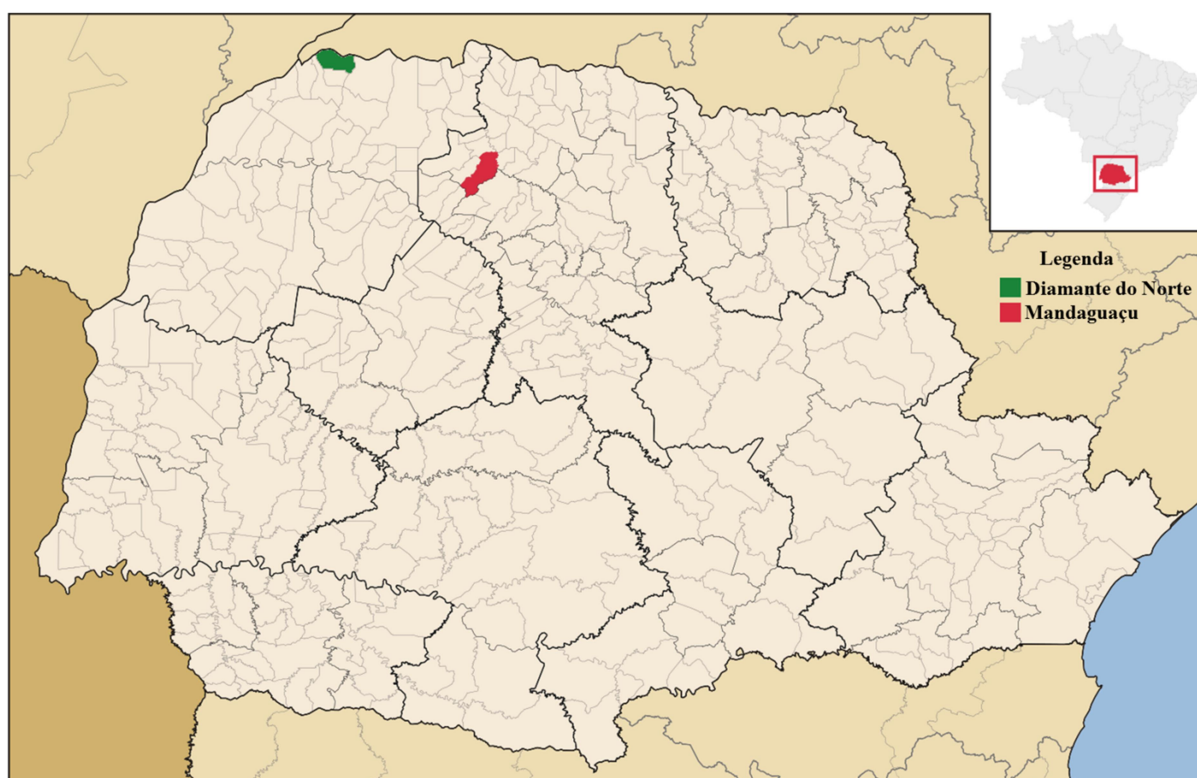
Modelos de classificação envolvem dois passos básicos: a construção de modelos e a classificação de novas amostras nesses modelos. Para a construção de um modelo confiável é necessário que se tenha amostras suficientes para cada classe (número variável conforme o tipo de dado a ser trabalhado) e ainda, variáveis que descrevam as amostras com acurácia. Na fase de classificação, as decisões são tomadas com base em testes de significância, aplicados com base nas distâncias entre o objeto e o modelo construído.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREAS DE COLETA

As coletas de amostras de folhas das espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual foram realizadas na Estação Ecológica do Caiuá, no município de Diamante do Norte, PR.

As amostras de *Eucalyptus urograndis* foram coletadas em uma área de plantio para fins madeireiros e energéticos no distrito de Pulinópolis, Mandaguaçu, PR. As localizações de ambos os municípios são demonstradas na Figura 5.



**Figura 5.** Localização dos municípios de Diamante do Norte e Mandaguaçu, Paraná, Brasil.  
**Fonte:** Adaptado de IPARDES, 2017.

##### 3.1.1 Estação Ecológica do Caiuá (EEC)

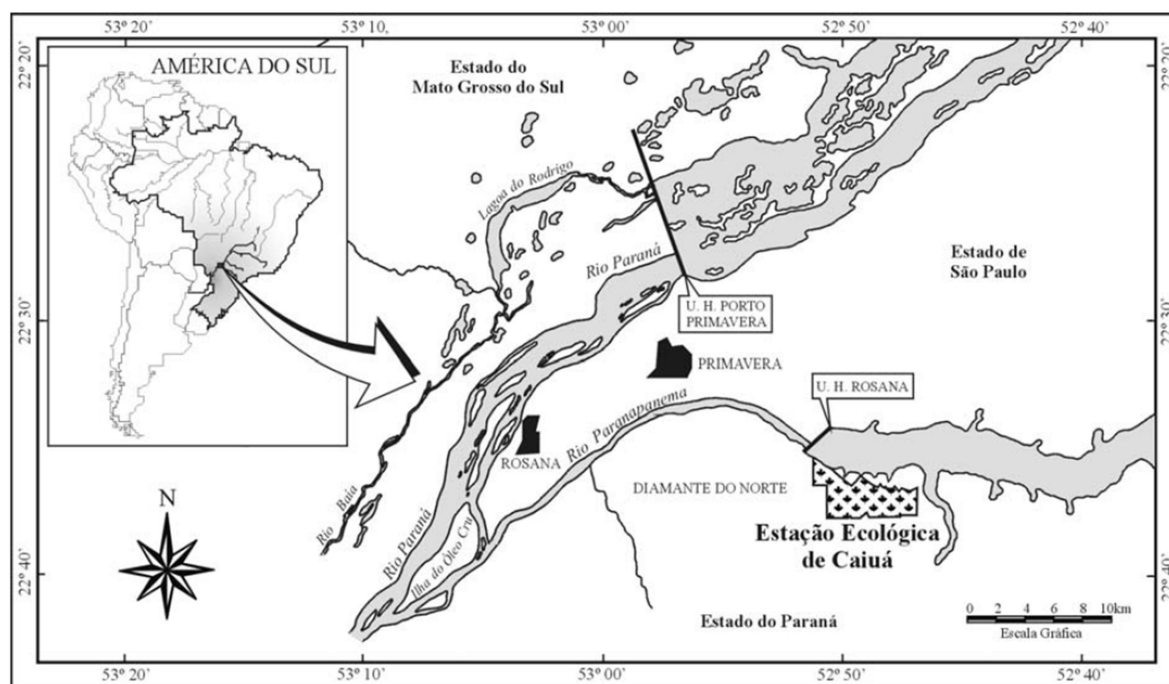
As informações referentes à Estação Ecológica do Caiuá apresentadas a seguir foram baseadas no Plano de Manejo da UC (IAP/DIBAP, 2009).

A Estação Ecológica do Caiuá (EEC) situa-se na região Noroeste do Estado do Paraná, abrangendo parte do Município de Diamante do Norte, estando inserida entre a zona de amortecimento e transição da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica - Rio Paraná.

O título de Reserva da Biosfera, concedido em 1991 e 2002 pela UNESCO, à Floresta Atlântica, enfatiza sua importância, sendo uma das sete unidades de habitats prioritárias para a conservação da biodiversidade (DINERSTEIN et al., 1995).

Nesse contexto, a EEC foi criada em 21 de novembro de 1994, através do Decreto Estadual nº 4.263, com uma área de 1.427,30 ha e ampliada através do Decreto Estadual nº 3.932 de 04 de dezembro de 2008, passando a ter área de 1.449,48 ha. Recentemente, outras áreas foram incorporadas à Estação, somando um total de 1.581,92 ha, porém, ainda aguarda-se a publicação do Decreto oficial.

A estação está localizada na bacia do baixo Paranapanema - margem esquerda - às margens do reservatório da UHE de Rosana, entre a latitude 7497659,00 m e longitude 308090,00 m (UTM-WGS84).. A EEC insere-se integralmente no município de Diamante do Norte (Figura 6).



**Figura 6.** Mapa de localização da Estação Ecológica do Caiuá, Diamante do Norte, Paraná, Brasil.

**Fonte:** COSTA FILHO, 2004.

Inserida na micro-região homogênea do Norte Novíssimo de Paranavaí (MRH 283 - IBGE), encontra-se às margens da PR 182, a 5 km do Município de Diamante do Norte, no trecho Diamante do Norte - Ponte sobre o rio Paranapanema.

### **Justificativa da escolha da área**

A EECaiuí abrange uma das últimas amostras de Floresta Estacional Semidecidual em estágio primário e, devido sua conformidade espacial, permite a realização de estudos de caracterização da flora nativa sem os efeitos das ocupações marginais (efeito de borda).

Assim, é uma UC que constitui uma fonte ímpar de recursos genéticos passíveis de serem utilizados em programas de recuperação ambiental (IAP, 1997), sendo que, a caracterização espectral das espécies vegetais pode auxiliar na identificação e localização desses recursos de forma rápida e eficiente, podendo, posteriormente, extrapolar para outras áreas dessa formação florestal.

Ainda além, a categoria de manejo “Estação Ecológica” pertence ao grupo de Unidades de Proteção Integral, tendo como objetivo a preservação da natureza e a realização de pesquisas científicas, dispondo, portanto, facilidades para a execução do trabalho.

### **Clima**

Segundo a classificação climática de Köeppen, a região Noroeste do Paraná possui clima do tipo Cfa - mesotérmico, úmido, sem estação seca e com verões quentes. A temperatura média do mês mais frio é abaixo de 18°C e a temperatura média do mês mais quente é acima dos 22° C (MAACK, 1968). A precipitação média anual varia entre 1.200 e 1.400 mm, sendo o trimestre mais chuvoso dezembro, janeiro e fevereiro. A umidade relativa do ar, (média anual) é de 75% e a evaporação potencial anual: 1.000 a 1.100 mm (IAP/DIBAP, 2009).

### **Geologia**

A EEC localiza-se no terceiro planalto paranaense. Essa região, que se estende da Serra da Esperança até o Rio Paraná, possui menos de 150 milhões de anos de idade e ocupa cerca de dois terços da área do Estado, englobando as formações areníticas São Bento Inferior ou Botucatu, com aproximadamente 15.000 km<sup>2</sup> de área, onde está inserida a área em questão (MAACK,1968; IAP/DIBAP, 2009).



## **Solos**

O material de origem da maioria dos solos presentes na EEC é o Arenito Caiuá - série São Bento – Cretáceo, ocorrendo também, solos derivados de sedimentos fluviais. Em levantamento realizado pelo IAP, foram identificadas as seguintes classes: ARGISSOLO, GLEISSOLOS, LATOSSOLO e NEOSSOLOS (COSTA FILHO, 2004; IAP/DIBAP, 2009).

## **Hidrografia**

A EEC é banhada pelo reservatório da UHE e pelo rio Paranapanema, em seu trecho lótico. Possui ainda três nascentes em seu interior, denominadas água do Scherer, Conceição e a terceira sem denominação (IAP/DIBAP, 2009).

## **Vegetação**

A EEC está localizada no Bioma Mata Atlântica, na formação Floresta Estacional Semidecidual, cuja vegetação apresenta um conceito ecológico condicionado à dupla estacionalidade climática: uma tropical, com intensas chuvas de verão seguidas por estiagem e uma subtropical, sem período seco, mas com seca fisiológica provocada pelas baixas temperaturas de inverno (IBGE, 1992).

Assim, a semidecidualidade na estação desfavorável do ano é a principal característica fisionômica dessa unidade fitogeográfica, ou seja, no período de baixa precipitação volumétrica, 20 a 50% das árvores do dossel perdem suas folhas, modificando fortemente a fisionomia da vegetação (RODERJAN et al., 2002).

A maior parte da EEC é ocupada por uma associação vegetal primária da Floresta Estacional Semidecidual, com predominância da formação Submontana e uma pequena faixa de formação aluvial influenciada pelas inundações periódicas do Rio Paranapanema. Também são encontradas áreas de vegetação secundária (capoeirão), áreas de reflorestamento e uma área de pastagem artificial (Tabela 2), sendo essas últimas formações decorrentes de ações antrópicas, ocorridas em época anterior à criação da Unidade de Conservação (IAP, 1997).

**Tabela 2.** Tipos de vegetação existentes na Estação Ecológica do Caiuá

TIPOLOGIAS	ÁREA (%)
<b>Floresta Estacional Semidecidual</b>	
Submontana	77,16
Aluvial	0,57
<i>TOTAL</i>	77,73
<b>Áreas Antropizadas</b>	
Vegetação Secundária	14,49
Reflorestamento	1,45
Área de Recuperação	4,80
Pastagem abandonada	1,53
<i>TOTAL</i>	22,27
<b>TOTAL DE ÁREAS</b>	<b>100</b>

**Fonte:** adaptado de IAP/DIBAP, 2009.

Dentre as duas maiores áreas estão a FES Submontana e a vegetação secundária. A área caracterizada como Submontana apresenta duas situações diferenciadas; a associação mais densa tem como espécie predominante do estrato superior a *Aspidosperma polyneuron*, acompanhada por alguns indivíduos de *Astronium graveolens*, *Casearia gossypiosperma*, *Savia dictyocarpa* e *Balfourodendron riedelianum*. Já na porção mais aberta da floresta, existem indicativos de possível intervenção seletiva no passado, devido à presença de poucos indivíduos de *Cedrela fissilis* e *Handroanthus avellanadae*.

As formações secundárias são áreas de regeneração natural, que se sucederam a cortes rasos da floresta com o objetivo do cultivo agrícola, que não foi efetivado, ocorrendo, assim, rebrotas e estabelecimento de indivíduos primitivos, como *Croton floribundus*, *Eugenia uniflora*, *Cecropia pachystachya*, *Casearia gossypiosperma*, *Pterogyne nitens*, *Nectandra falcifolia*, *Handroanthus heptaphyllus*, *Gallesia integrifolia*, *Alchornea triplinervea*, *Cedrela fissilis*, entre outros.

É importante salientar que a EEC constitui fonte ímpar de recursos genéticos, em meio a uma região onde as áreas florestais foram drasticamente reduzidas a menos de 1% de sua área original, podendo, esses recursos, serem utilizados em programas de recuperação ambiental. Por exemplo, a espécie arbórea mais expressiva da Floresta Estacional Semidecidual, a peroba (*Aspidosperma polyneuron*), está bem representada em algumas porções da UC, com indivíduos apresentando mais de 1m DAP, com fustes retos e cilíndricos de altura superior a 20m. Além da peroba, o amendoim, guaritá, cedro, ipê-roxo, canafistula, jatobá, jequitibá e o pau-d'alho podem ser observados em condições semelhantes, embora não tão numerosos (IAP/DIBAP, 2009).

### 3.1.2 Área de plantio de *Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden

As amostras de *E. urograndis* foram coletadas em uma pequena área de plantio (aproximadamente 2,5 hectares), localizada no distrito de Pulinópolis, município de Mandaguaçu, nas coordenadas UTM 398181,00m; 7422837,00m (Zona 22 K), devido a disponibilidade de imagem hiperespectral da mesma.

As mudas do híbrido foram transplantadas em 2011, em espaçamento 2 x 2 metros, ou seja, no momento da coleta apresentavam idade aproximada de 5 anos.

O solo da área é caracterizado como LATOSSOLO (EMBRAPA, 2013), sendo que as condições climáticas da região são as mesmas já descritas para a EEC.

A área está representada em destaque na Figura 7.



**Figura 7.** Área de coleta das amostras de *Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden, no distrito de Pulinópolis, Mandaguaçu, PR.  
**Fonte:** Google Earth, 2016.

## 3.2 COLETAS DE FOLHAS

### 3.2.1 Espécies nativas

As amostras de folhas das espécies arbóreas nativas, componentes do dossel de fragmentos florestais da EEC - FES foram coletadas em três diferentes campanhas, nas datas:

10-13/11/2015; 8-11/12/2015 e 30/05-03/06/2016. Procurou-se coletar amostras em todas as tipologias presentes na UC, com exceção da área de pastagem abandonada.

A escolha das espécies arbóreas nativas da FES utilizadas nesse trabalho foi feita com base na recomendação de espécies para restauração de áreas degradadas, do Instituto Ambiental do Paraná, além da disponibilidade de indivíduos para coleta (Tabela 3). O apêndice A contém a caracterização de cada espécie e, para facilitar a leitura, as mesmas serão referidas pelo nome popular no decorrer do texto.

Ainda, somente espécies que apresentavam largura da folha ou folíolo maior ou igual a 1,5cm foram estudadas, devido a compatibilidade da abertura do dispositivo *Plant Probe*, acoplado ao espectroradiômetro FieldSpec<sup>®</sup>3 Jr, ASD, que foi utilizado nas medições radiométricas feitas em laboratório.

**Tabela 3.** Especificação das espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual utilizadas no presente trabalho

<b>Família</b>	<b>Espécie</b>	<b>Sucessão</b>
Euphorbiaceae	capixingui <i>Croton floribundus</i> Spreng.	Pioneira
Cecropiaceae	embaúba-branca <i>Cecropia pachystachya</i> Trécul	Pioneira
Meliaceae	cedro <i>Cedrela fissilis</i> Vell.	Secundária
Salicaceae	espeteiro <i>Casearia gossypiosperma</i> Briq.	Secundária
Anacardiaceae	guaritá <i>Astronium graveolens</i> Jacq.	Secundária
Bignoniaceae	ipê-roxo <i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.) Mattos	Secundária
Lecythidaceae	jequitibá <i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze	Secundária
Phytolaccaceae	pau-d'alho <i>Gallesia integrifolia</i> (Spreng.) Harms	Secundária
Apocynaceae	peroba-rosa <i>Aspidosperma polyneuron</i> Müll.Arg.	Clímax

Assim, com o auxílio de uma tesoura de poda alta, foram coletados ramos da parte superior ou lateral da copa dos indivíduos, que estavam em contato direto com o sol (Figura 8), de acordo com as limitações de altura do referido instrumento, sendo que o mesmo é composto por seis hastes de dois metros cada, atingindo altura total de 12m.

Os ramos foram acondicionados em caixas térmicas e umedecidos constantemente, para que não ocorresse perda de vigor, o que poderia comprometer a integridade dos dados de reflectância. Cada indivíduo coletado foi identificado e georreferenciado, com o auxílio do GPS Trimble GeoExplorer 2008 Series e então, levados ao laboratório da flora da EEC, para a realização das leituras radiométricas.



**Figura 8.** Coleta de galhos de espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual. Estação Ecológica do Caiuá, Diamante do Norte, PR.

### 3.2.2 *Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden

As amostras de eucalipto foram coletadas no dia 2 de Setembro de 2016, da mesma forma que descrito anteriormente, sendo que as leituras radiométricas foram realizadas no laboratório do GALeS (Grupo Aplicado ao Levantamento e Especialização dos Solos), localizado na UEM.

## 3.3 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

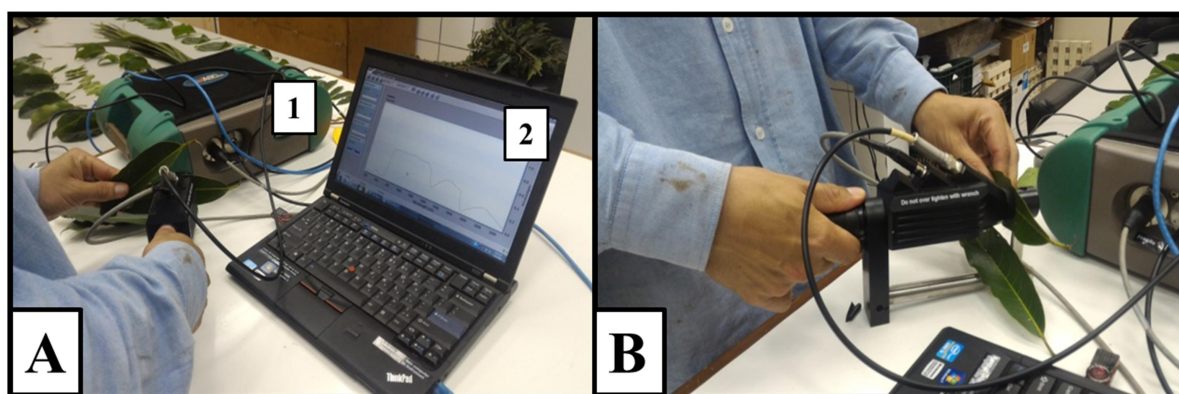
A aquisição dos dados foi realizada utilizando dois sensores remotos: o espectroradiômetro modelo FieldSpec<sup>®</sup>3 Jr, marca ASD, com o acessório *Plant Probe* e a câmera hiperespectral AisaFENIX, do fabricante SPECIM, a bordo de avião.

### 3.3.1 Aquisição e processamento dos dados obtidos com o espectroradiômetro FieldSpec<sup>®</sup> 3 Jr, ASD

Esse sensor portátil opera na faixa do espectro eletromagnético que se estende do Vis ao SWIR (350 a 2.500nm) e, quando utilizado com o acessório *Plant Probe*, possui fonte de luz própria (sensor ativo).

Segundo o fabricante (ASD, 2008), o equipamento apresenta resolução espectral de 3nm na faixa espectral de 350 a 700nm e de 10nm na faixa de 1.400 a 2.100nm. Entre 350 a 1.050nm o intervalo de leitura é de 1,4nm e na faixa de 1.000 a 2.500nm o intervalo passa a ser de 2 nm (Figura 9A).

Sua principal característica é coleta de dados de forma proximal, sendo que a utilização do *Plant Probe*, projetado para medições espectrais de contato com matérias sólidas (Figura 9B), permite o controle de luminosidade, minimizando interferências externas.



**Figura 9.** (A) 1. Espectroradiômetro FieldSpec<sup>®</sup> 3 Jr, ASD; 2. microcomputador portátil. (B) Demonstração de leitura radiométrica utilizando o acessório *Plant Probe*.

De cada ramo coletado, de cada indivíduo, foram extraídas dez folhas saudáveis (quando possível) de diferentes porções do ramo, no momento da leitura espectral, a fim de se obter curvas representativas de folhas de todas as idades. As leituras de cada folha foram realizadas após, no máximo, quatro horas a partir da coleta, sendo que cada folha individual foi inserida do lado adaxial no equipamento.

As leituras foram realizadas em fator de reflectância, podendo variar de 0 a 100% em todas as faixas do espectro eletromagnético medidas, por isso, o equipamento foi otimizado, antes das leituras de cada indivíduo, utilizando uma placa espectralon (referência de reflectância próxima a 1 (100%) inserida no próprio *Plant Probe*.

Cada curva de reflectância obtida representa uma média de 50 leituras. Os dados obtidos passaram por correção “*Splice*”, que possui o objetivo de minimizar variações na curva espectral nas faixas em que ocorre mudança de sensor (em 1.000 e 1.800nm aproximadamente). Após esse procedimento, os dados foram armazenados em micro computador portátil e convertidos de extensão .asd para .txt pelo programa *View Spec Pro* (ASD, 2008).

Para as análises estatísticas, regiões ruidosas da curva foram eliminadas, resultando em dados espectrais entre 400 e 2.450nm (Vis-SWIR) e 2.051 bandas.

### **3.3.2 Aquisição e processamento dos dados obtidos com a câmera hiperespectral AisaFENIX, SPECIM**

O sensor hiperespectral AisaFENIX, fabricado pela empresa finlandesa SPECIM, é classificado como um sensor passivo e imageador, podendo ser operado em três níveis de aquisição de dados, laboratorial (acoplado a uma plataforma), campo (acoplado a tripé) e suborbital, a bordo de aeronaves (Figura 10). Suas principais especificações são apresentadas na Tabela 4.



**Figura 10.** Sensor hiperespectral AisaFENIX, SPECIM, acoplado em aeronave, para realização do aerolevanteamento nas áreas de estudo, no dia 01/05/2016.

**Tabela 4.** Especificações do sensor hiperespectral AisaFENIX, SPECIM

FOV	32,3°			
Altitude de voo para <i>pixel</i> de 1m	660m			
	VNIR		SWIR	
Faixa espectral	380 – 970nm		970 – 2.500nm	
Resolução espectral	3,5nm		12nm	
Armazenamento de dados	2x	4x	8x	-
Número de bandas	348	174	87	274
Amostragem espectral	1,7nm	3,4nm	6,8nm	5,7nm

Fonte: SPECIM, 2017.

AisaFENIX opera nas faixas do espectro eletromagnético do Vis, NIR a SWIR. Sua resolução espectral é de 3,5nm entre 380 a 970nm e de 12nm entre 970 e 2.500nm. O número de bandas depende da opção de armazenamento de dados (definido de acordo com o nível de aquisição) e do número de quadros coletados por segundo, que, em aerolevantamentos, é influenciado pela velocidade de voo. A resolução espacial é dependente da altitude de voo, voos com altitude de 660 m resultam em *pixels* de 1 m. O campo de visada do referido sensor (FOV) é de 32,3°. Em aeroimageamentos, acopla-se ao sensor AisaFENIX, o GPS modelo OXTS – RT3050, com elevada precisão, possibilitando a aquisição de imagens georreferenciadas.

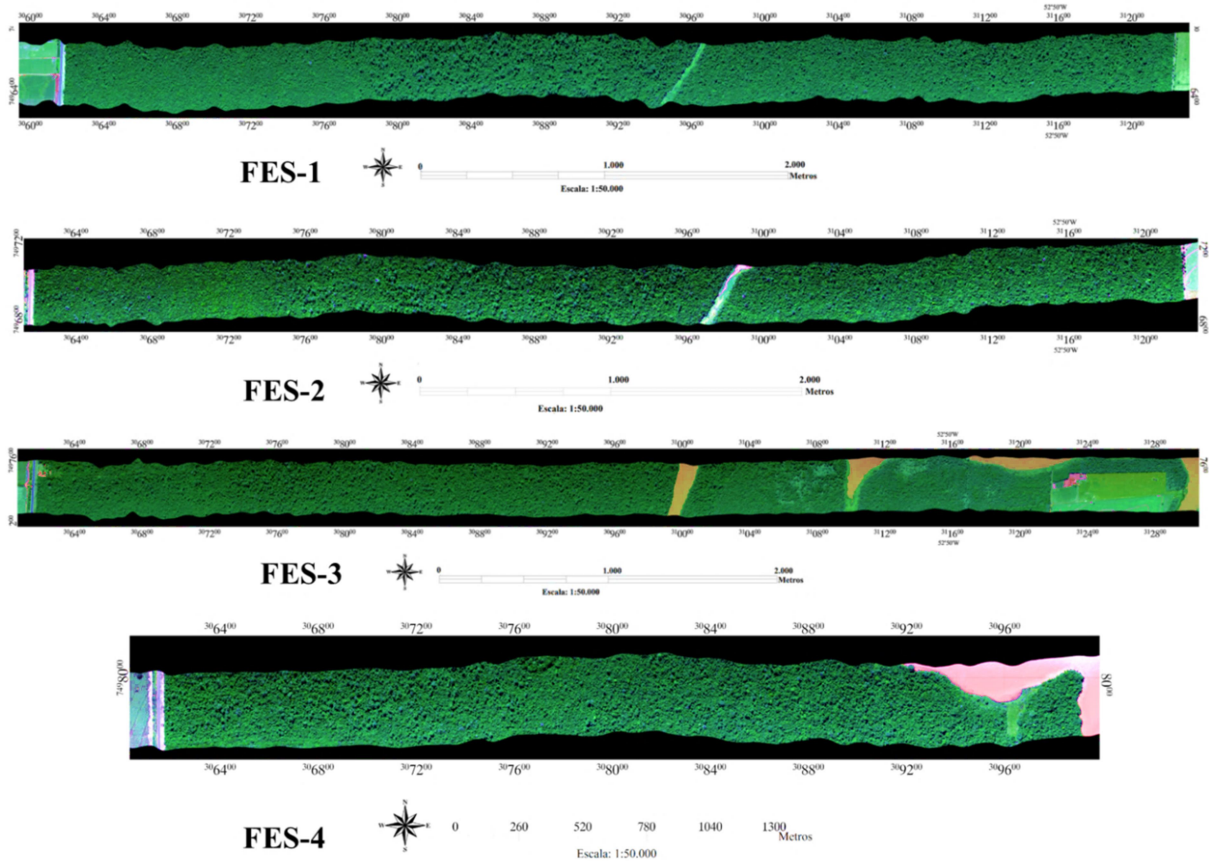
As imagens hiperespectrais utilizadas no presente trabalho foram coletadas através de um aerolevantamento realizado no dia 1º de Maio de 2016 (Figura 11). Durante o voo as condições climáticas eram consideradas ótimas (céu claro e sem nuvens), permitindo altura de voo entre 780 e 836 metros em relação ao nível do mar. A opção de armazenamento de dados recomendada para imageamentos aéreos é de 8x, assim, os dados radiométricos adquiridos apresentaram 361 bandas, conforme número de quadros/segundo.



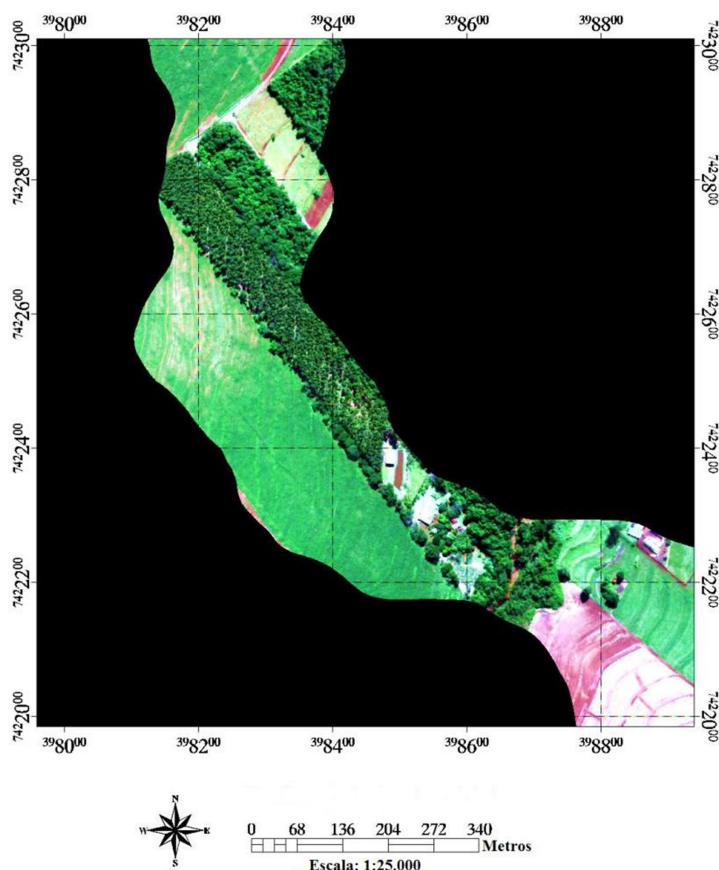


**Figura 11.** Aerolevantamento da Estação Ecológica do Caiuá realizado com o sensor hiperespectral AisaFENIX, SPECIM, no dia 01/05/2016.

Nesse estudo foram utilizadas quatro imagens referentes à Estação Ecológica do Caiuá, contendo o dossel de espécies nativas da FES (Figura 12) e uma imagem referente à área de coleta de amostras de eucalipto (Figura 13).



**Figura 12.** Imagens hiperespectrais obtidas com o sensor AisaFENIX, SPECIM, do dossel da Florestal Estacional Semidecidual (FES), Estação Ecológica do Caiuá, Diamante do Norte, PR (Zona 22 K). (R = 638,65 nm, G = 549,38 nm, B = 453,98 nm).



**Figura 13.** Imagem hiperespectral obtida com o sensor AisaFENIX, SPECIM, de área de plantio de *Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden. Pulinópolis - Mandaguaçu, PR (Zona 22 K). (R = 638,65 nm, G = 549,38 nm, B = 453,98 nm).

As imagens geradas foram corrigidas radiométrica e geometricamente com o auxílio do software CaliGEO Pro 2.2 (SPECIM, 2013). Nessa etapa, todas as imagens foram reamostradas para apresentarem resolução espacial final de 0,35m, a fim de padronizar os dados de acordo com parâmetros utilizados para a correção atmosférica.

A correção atmosférica, para transformação dos dados de radiância em reflectância, foi realizada utilizando o software ATCOR-4, versão 6.3.0 (RICHTER e SCHLÄPFER, 2012), Nessa etapa, dados radiométricos de alvos padrões, como lonas de diferentes colorações e placa de sulfato de bário (Figura 14), gerados pelo mesmo sensor, foram utilizados, conforme Souza (2017). As especificações de cada imagem estão apresentadas na Tabela 5.



**Figura 14.** Alvos padrões utilizados para a correção atmosférica das imagens geradas pelo sensor hiperespectral AisaFENIX, SPECIM.

**Tabela 5.** Especificações das imagens hiperespectrais utilizadas no presente estudo, coletadas com o sensor AisaFENIX, SPECIM, no dia 01/05/2016

<b>Imagem</b>	<b>Altitude média do terreno (m)</b>	<b>Altitude média de voo (m)</b>	<b>Tamanho de pixel (m)</b>	<b>Ângulo Solar Zenital</b>	<b>Ângulo Solar Azimutal</b>
Eucalipto <sup>a</sup>	425,0	836,0	0,35	38,9°	9,6°
FES-1 <sup>b</sup>	330,0	823,0	0,35	38,8°	348,6°
FES-2 <sup>b</sup>	330,0	780,0	0,35	38,4°	346,7°
FES-3 <sup>b</sup>	330,0	805,0	0,35	38,6°	345,2°
FES-4 <sup>b</sup>	330,0	796,0	0,35	38,9°	343,3°

<sup>a</sup>Imagem referente à área de plantio de *Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden. Pulinópolis - Mandaguaçu, PR (Zona 22 K). <sup>b</sup>Imagens referentes à Floresta Estacional Semidecidual. Estação Ecológica do Caiuá, Diamante do Norte, PR (Zona 22 K).

Após correções, as imagens foram manipuladas no software ENVI Classic 5.0 (ENVI, 2012) para coleta das curvas de reflectância de *pixels*. As curvas foram coletadas de maneira aleatória, sendo que cada curva representa uma média de quatro *pixels*.

Os dados de reflectância foram separados em duas classes distintas: nativas e eucalipto e exportadas em formato texto. Faixas do espectro eletromagnético em torno de 1.400 e 1.800nm foram removidas, devido a forte absorção da REM pelo vapor atmosférico.

As faixas anteriores a 500nm e posteriores a 1.900nm também foram removidas, devido à elevada presença de ruídos, provavelmente, decorrentes da interferência atmosférica que não foi possível eliminar durante a fase de correção das imagens.

Assim, para as análises estatísticas foram utilizadas curvas de reflectância entre 501,55 e 1.750nm (Vis-SWIR1), com 180 bandas espectrais.

### 3.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As análises estatísticas foram realizadas em três etapas:

- Classificação dois a dois em escala de folha. Cada espécie nativa da FES, inserida no estudo, foi discriminada perante a espécie exótica eucalipto, utilizando dados de reflectância em escala de folha (coletados com o espectrorradiômetro), havendo assim, duas classes a serem discriminadas, por exemplo, capixingui e eucalipto;

- Classificação de grupos em escala de folha. Amostras das nove espécies arbóreas nativas da FES foram agrupadas em uma só classe e então discriminadas perante o grupo de amostras da exótica eucalipto, utilizando dados de reflectância em escala de folha (coletados com o espectrorradiômetro).

- Classificação de grupos em escala de *pixel*. Utilizando as imagens hiperespectrais geradas pelo sensor AisaFENIX, dados de reflectância de *pixels* do dossel da FES foram coletados e discriminados de *pixels* referente ao dossel da área de plantio de eucalipto.

Inicialmente os dados foram divididos em dois grupos, de maneira aleatória (sorteio), para que posteriormente fosse possível realizar a validação externa dos modelos estimados através da análise discriminante. 70% das amostras participaram da construção e predição do modelo e os 30% restantes foram utilizados para a validação do mesmo (validação externa).

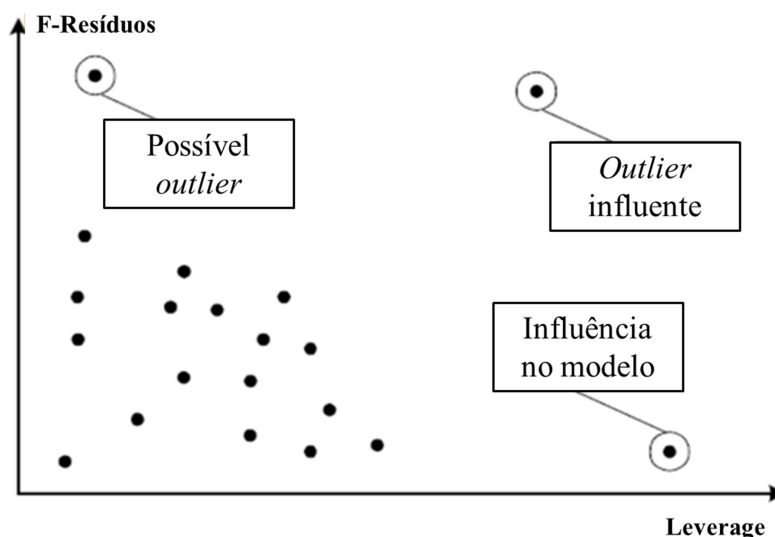
Os dados de reflectância foram analisados pelo software Unscrambler X 10.4.1 (CAMO, 2016). A princípio, todos os dados foram centralizados em relação à média, para que os objetos no espaço multidimensional fossem alocados ao redor da origem dos vetores (componentes principais). A Análise de Componentes Principais (PCA) foi realizada utilizando o algoritmo NIPALS e para a validação utilizou-se o método de validação cruzada completa.

Na validação cruzada, as amostras são usadas tanto para a estimação do modelo, quando para testá-lo. Algumas amostras são deixadas de fora do grupo de calibração e então, o modelo é calibrado com as amostras remanescentes. Após, os valores para as amostras excluídas são preditos e os resíduos da predição são computados. Esse processo é repetido até que todas as amostras tenham sido excluídas da construção do modelo e, então, todos os resíduos da predição são combinados para computar a variância residual da validação. No caso da validação cruzada completa (*full cross validation*) somente uma amostra é retirada por vez.

A avaliação de *outliers* foi realizada através dos testes Hotelling  $T^2$ , F-Resíduos e Leverage, todos com  $\alpha$  igual a 0,05 (95% de confiança). As amostras que não estão inseridas na elipse de Hotelling  $T^2$  (presente no gráfico de *Scores*) possivelmente são *outliers*, contudo os testes devem ser analisados de maneira conjunta.

O teste F-Resíduos demonstra como as amostras se encaixam no modelo, ou seja, amostras com elevado resíduo não são bem descritas pelo mesmo.

O parâmetro Leverage avalia o potencial de determinada amostra influenciar o modelo, significando que amostras com altos valores de Leverage possuem alta influência, podendo, ou não, representar *outliers*. Assim, *outliers* influentes, que podem prejudicar o modelo, são detectados conforme Figura 15 (NAES et al., 2002; CAMO, 2006).



**Figura 15.** Parâmetros para detecção de *outliers* na análise de componentes principais com base nos parâmetros variância residual de amostra (F-Resíduos) e Leverage.

**Fonte:** adaptado de CAMO, 2006.

Com relação à análise discriminante, o modelo adotado para a classificação foi o quadrático (QDA), devido à observação de melhores resultados em avaliações teste. Todas as análises foram repetidas três vezes, não havendo alteração entre os resultados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

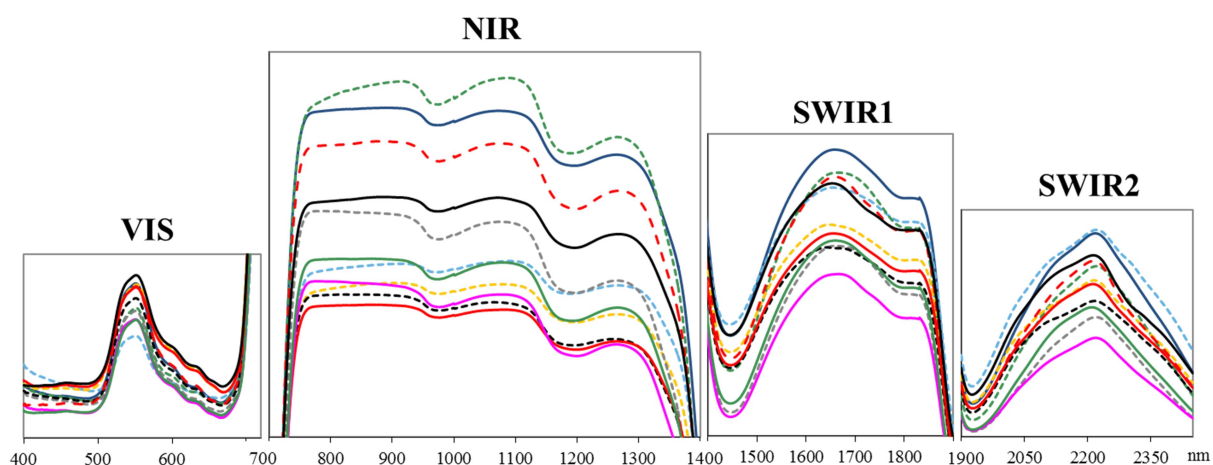
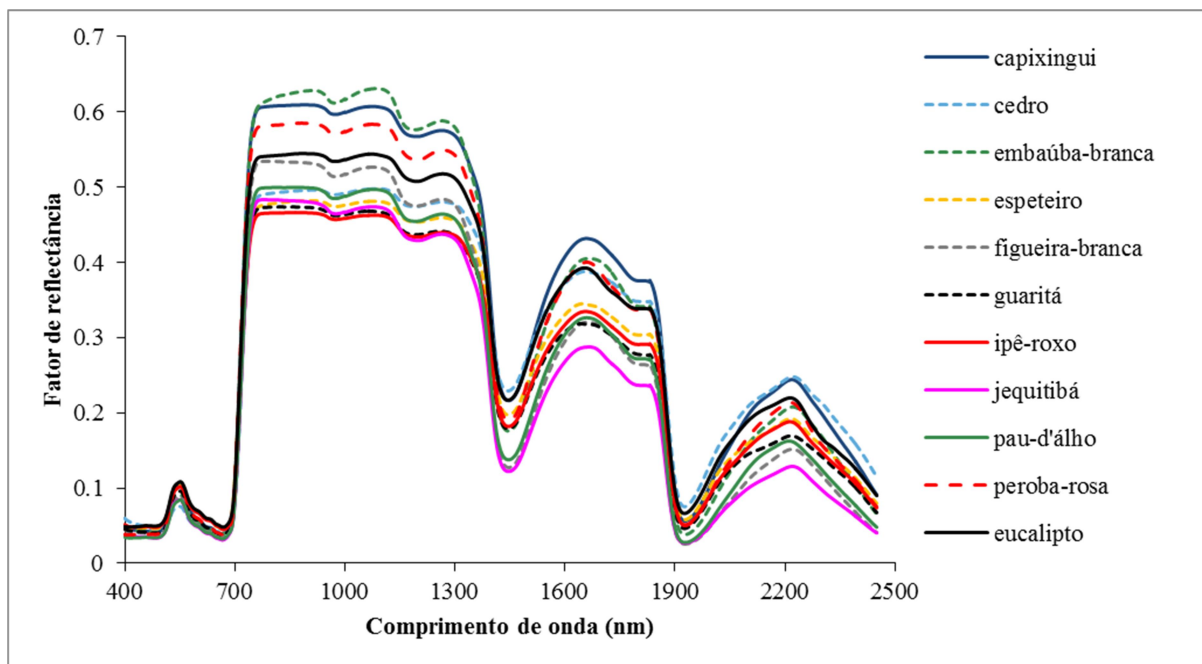
As quatro campanhas de coleta de dados resultaram em um total de 1.241 amostras de reflectância de folhas, sendo 1.009 amostras pertencentes ao grupo das espécies nativas e 232 amostras de *E. urograndis*. Como mencionado no tópico material e métodos, 70% das amostras participaram da construção do modelo discriminante (amostras de treinamento) e 30% das amostras foram utilizadas para a validação externa do mesmo (Tabela 6).

**Tabela 6.** Espécies caracterizadas radiometricamente no presente estudo e quantidade de espectros de reflectância de folhas coletados

Espécie	Amostras total (100%)	Amostras treinamento (70%)	Amostras validação (30%)
capixingui <i>Croton floribundus</i> Spreng.	214	150	64
cedro <i>Cedrela fissilis</i> Vell.	45	31	14
embaúba-branca <i>Cecropia pachystachya</i> Trécul	37	26	11
espeteiro <i>Casearia gossypiosperma</i> Briq.	157	110	47
guaritá <i>Astronium graveolens</i> Jacq.	124	87	37
ipê-roxo <i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.) Mattos	109	76	33
jequitibá <i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze	178	125	53
pau-d'alho <i>Gallesia integrifolia</i> (Spreng.) Harms	88	62	26
peroba-rosa <i>Aspidosperma polyneuron</i> Müll.Arg.	57	40	17
eucalipto <i>Eucalyptus urograndis</i> W. Hill ex Maiden	232	162	70
<b>TOTAL</b>	<b>1.241</b>	<b>869</b>	<b>372</b>

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA EM ESCALA DE FOLHA

Na Figura 16 é possível observar as curvas de reflectância de folhas de cada espécie arbórea. Cada curva representa a reflectância média de todas as amostras coletadas, de cada espécie utilizada no presente estudo.



**Figura 16.** Reflectância média de folhas das espécies utilizadas no presente estudo, entre as faixas Vis – SWIR (400 a 2.450nm). Em destaque estão as faixas do espectro eletromagnético do Visível (Vis), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR), dividido em duas porções.

Todas as curvas apresentaram comportamentos típicos: baixa reflectância na região do visível devido à absorção da irradiância pela clorofila e outros pigmentos (carotenoides e xantofilas); alta e constante reflectância no NIR, como mecanismo de equilíbrio térmico, e pequenos picos de absorção em 980 e 1.200nm devido à presença de água na folha; e moderada reflectância no SWIR, com picos de absorção pela água em 1.400 e 1.900nm (GAUSMAN, 1985; ROBERTS et al., 2004).

Na faixa do Vis, a curva média do eucalipto apresentou maior reflectância no pico referente ao comprimento de onda da luz visível verde, sendo que abaixo dela, as espécies



capixingui, espeteiro, peroba-rosa e ipê-roxo apresentaram comportamento muito similar. O cedro foi a espécie que apresentou menor reflectância nessa faixa, também se diferenciando das demais espécies na faixa de absorção relacionada aos carotenoides e xantofilas (próxima a 480nm).

Ainda no pico relacionado à cor verde, guaritá demonstrou curva de reflectância média facilmente distinguível das demais. Embaúba e figueira-branca se também se distinguem, porém, se sobrepõem entre si. Já as espécies jequitibá e pau-d'algo apresentaram comportamento muito similar em toda faixa do Vis do espectro eletromagnético.

Entre 400 e 480nm eucalipto, ipê-roxo e espeteiro se confundem, assim como capixingui, embaúba, figueira e guaritá, sendo possível diferenciar, parcialmente, cedro, jequitibá, pau-d'algo e peroba.

Na região que está relacionada com a absorção da irradiância pela clorofila (após o pico do verde, em torno de 680nm) as espécies eucalipto, ipê-roxo e espeteiro apresentaram maior reflectância do que as demais, ocorrendo sobreposição entre elas.

No infravermelho próximo (NIR), é possível notar que a variação entre as curvas é maior do que a variação observada na faixa do visível. Essa variabilidade é maior entre embaúba-branca, capixingui, peroba-rosa, eucalipto e figueira-branca, porém, as espécies cedro, espeteiro, guaritá, ipê-roxo, jequitibá e pau-d'algo apresentam menor reflectância em todo o NIR e sobreposições.

No início do NIR, pau-d'algo e cedro apresentam maior similaridade, sendo que, na segunda inflexão devido à presença de água na folha (em torno de 1.200nm), cedro e figueira-branca passam a se sobrepor, ao passo que a curva de pau-d'algo assemelha-se à do espeteiro. Ipê-roxo e guaritá foram as espécies que apresentaram menor reflectância no NIR, sendo que as curvas de jequitibá e espeteiro apresentaram grande similaridade a essas duas espécies, em diversas porções do NIR

Com relação à primeira porção do infravermelho de ondas curtas (SWIR1), cedro, juntamente com capixingui, e jequitibá foram as espécies que apresentaram maior e menor reflectância, respectivamente. Espeteiro apresenta reflectância média, também se diferenciando das demais. Nessa faixa, de maneira geral, observa-se dois grupos de sobreposições, o primeiro envolvendo cedro, embaúba, eucalipto e peroba-rosa e o segundo as demais espécies, figueira-branca, guaritá, ipê-roxo e pau-d'algo.

Na segunda porção do SWIR também é possível observar sobreposições, contudo a variabilidade entre espécies é maior, facilitando a distinção. No pico referente ao

comprimento de onda de 2.200nm, somente ipê-roxo e espeteiro apresentam maior similaridade, sendo que jequitibá, figueira-branca e pau-d'algo se destacam pela baixa reflectância.

Nas regiões que estão associadas à absorção da irradiância pela água (em torno de 1.400 e 1.900nm), jequitibá, figueira e pau-d'algo, cedro capixingui e eucalipto apresentaram as menores e maiores reflectâncias, respectivamente. Na faixa de 1.400nm, capixingui e eucalipto apresentam o mesmo comportamento. Espeteiro, peroba, ipê, embaúba e guaritá também se sobrepõem.

Em 1.900nm as sobreposições de curvas ocorrem entre jequitibá, figueira-branca e pau-d'algo, assim como guaritá, ipê-roxo, capixingui, peroba e espeteiro, ou seja, embaúba, eucalipto e cedro apresentaram comportamentos singulares nessa região.

Segundo Price (1992) é realmente complicado distinguir dados espectrais de vegetação, pois um pequeno número de variáveis independentes é responsável por esse comportamento espectral, ou seja, diferentes espécies vegetais apresentam composição química similar, significando que os dados de reflectância são altamente correlacionados (PORTIGAL et al., 1997).

Em estudo realizado por Clark et al. (2005), em escala de folha, 90% das principais bandas utilizadas para a discriminação de espécies arbóreas da FT encontravam-se nas regiões NIR e SWIR1, sendo que SWIR2 apresentou menor variabilidade porém, maior que Vis, que contribuiu apenas com as bandas relacionadas à absorção do azul (449nm), ao pico do verde (568nm) e ao limite do vermelho (719nm).

Ferreira et al. (2016) obteve acurácia de 70% na discriminação de espécies arbóreas da FES utilizando dados obtidos na faixa VNIR (450 a 919nm). Quando se acrescentou dados do SWIR (1.045 a 2.400nm) a acurácia passou para 84%. No mesmo estudo, a seleção de bandas por procedimento *stepwise* indicou as bandas que mais influenciaram a discriminação, que foram os comprimentos de onda aproximadamente localizados em 550nm (pico do verde), 650nm (absorção no vermelho) e regiões do SWIR (1.200, 1.700, 2.100, 2.300nm).

A avaliação visual das curvas de reflectância realizada anteriormente se relaciona com os resultados obtidos por Clark et al. (2005) e Ferreira et al. (2016), em que a maior variabilidade entre os dados e, conseqüente, diferenciação das curvas, é observada tanto no NIR quanto no SWIR.

Contudo, essa avaliação visual das curvas considerou apenas dados médios de reflectância. Quando todos os dados obtidos no presente trabalho são plotados, é possível observar grande variação interespecífica.

Diversos fatores podem causar variação entre dados espectrais de folhas da mesma espécie, como a concentração de clorofila e água, mudanças no mesófilo foliar, arquitetura e composição química da folha, que são fatores afetados pela idade da mesma, além de ataques de herbívoros, manchas foliares e necroses causadas por diversos fatores (fungos, bactérias, danos físicos, senescência, entre outros). Fatores ambientais também afetam os dados espectrais, como mudanças no micro e macro clima e características edáficas (CLARK et al., 2005; PORTIGAL et al., 1997).

Assim, dado que a variabilidade é um fator natural quando se trata de reflectância de vegetações (COCHRANE, 2000), buscou-se, nesse trabalho, utilizar ferramentas para auxiliar a compreensão desses comportamentos na discriminação de espécies, como dados hiperespectrais, alta resolução espacial e máxima quantidade possível de amostras, permitindo separação de grupos de treinamento e validação para as análises estatísticas.

## 4.2 CLASSIFICAÇÃO EM ESCALA DE FOLHA

Como já mencionado, inicialmente os espectros de reflectância de cada espécie nativa foram discriminados dos espectros de eucalipto. Após as análises desses resultados, todos os espectros, de todas as espécies nativas, foram reunidos em um só grupo e então discriminados do grupo da espécie exótica. A seguir são apresentados os resultados de cada análise.

### **4.2.1 Classificação de capixingui (*Croton floribundus* Spreng.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)**

A análise de componentes principais demonstrou que dois PCs são suficientes para as análises posteriores, pois a variância total explicada atingiu 94%, 79 e 15%, para PC1 e PC2, respectivamente.

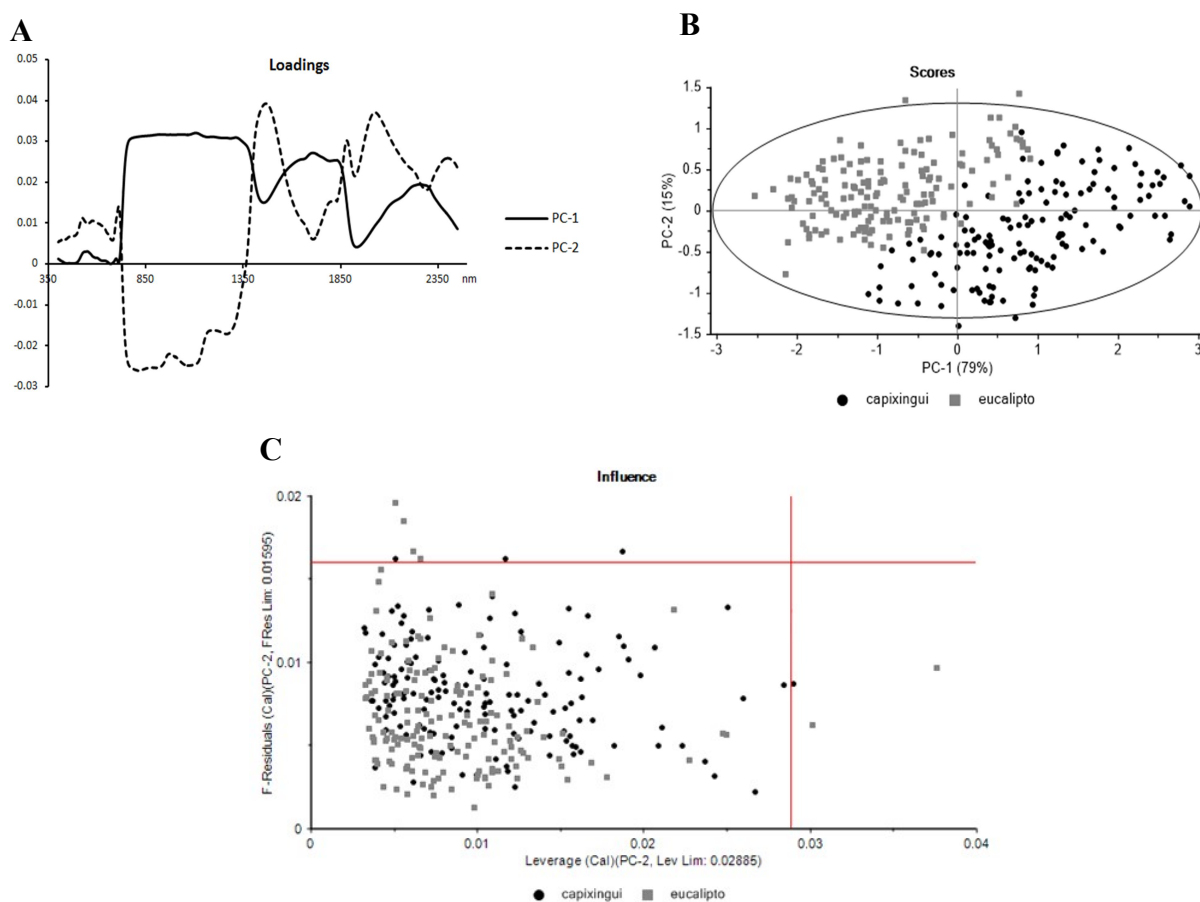
O gráfico de *Loadings* auxilia essa tomada de decisão, pois demonstra a importância das diferentes variáveis com relação aos componentes principais. Na Figura 17A é possível observar que os *Loadings* referentes ao PC1 são muito similares à curva de reflectância de

folhas (como apresentado anteriormente), sendo que os *Loadings* do PC2 já estão relacionados aos resíduos de cada variável.

Castro-Esau et al. (2004) observaram que o uso de autovetores (componentes principais) além dos dois primeiros foi ineficaz ou prejudicial para a classificação de espécies arbóreas e lianas de duas florestas tropicais do Panamá, corroborando com a decisão de utilização de apenas dois PCs.

O gráfico de *Scores* descreve a estrutura dos dados, em que cada amostra possui um *Score* em cada PC, possibilitando a análise de padrões e grupos. Na Figura 17B observa-se um padrão de distribuição dos *Scores* referentes ao capixingui e eucalipto, possibilitando distinção dos dois grupos no hiperplano formado pelos dois vetores (componentes).

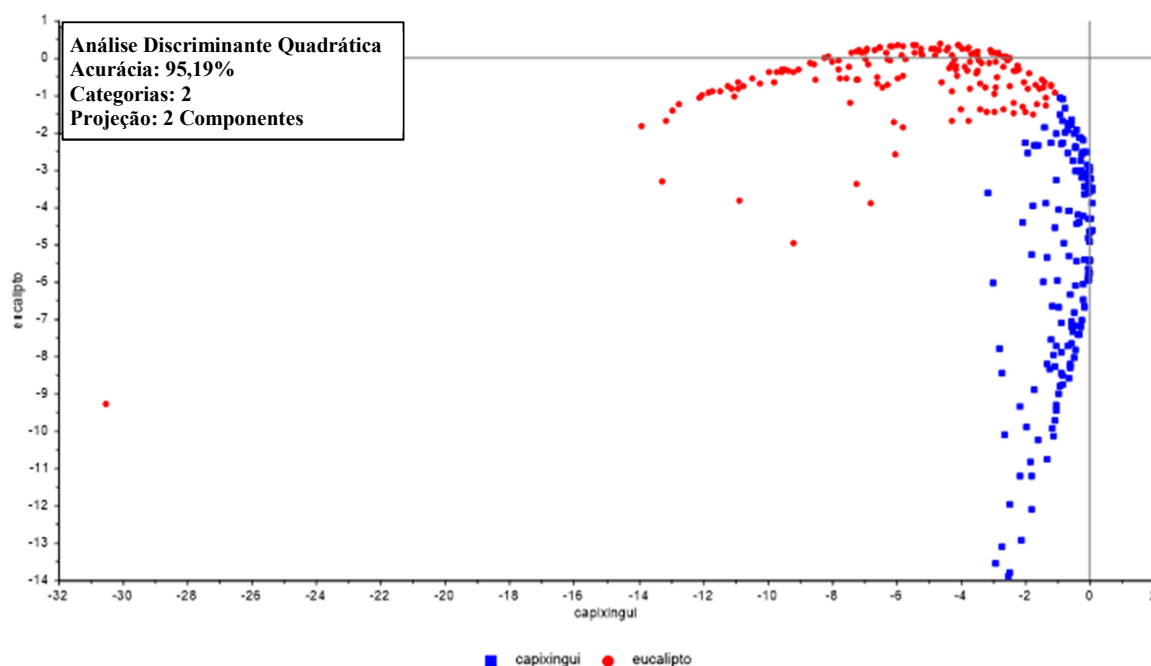
A elipse representada no mesmo gráfico refere-se ao teste Hotelling  $T^2$  a 95% de confiança, significando que as amostras que não estão inseridas na elipse possivelmente são *outliers*. Essa avaliação está conectada ao gráfico de influência (Figura 17C), que demonstra limites para a variância residual das amostras (F-Resíduos  $\alpha = 0,05$ ) e Leverage ( $\alpha = 0,05$ ).



**Figura 17.** Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de capixingui (*Croton floribundus* Spreng.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden).

Com a avaliação dos gráficos de *Scores* e Influência e testes de identificação de *outliers*, decidiu-se manter todas as amostras, devido a não observação de *outliers* influentes, à proximidade de todas as amostras à elipse e, ainda, às possíveis importantes variações que cada amostra carrega, para a construção de um modelo confiável para essas espécies.

Após análise dos resultados da PCA, realizou-se a análise discriminante quadrática utilizando duas componentes principais e todas as amostras de treinamento. Nessa segunda fase, obteve-se acurácia de 95,19% (Figura 18).



**Figura 18.** Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de capixingui (*Croton floribundus* Spreng.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden), utilizando dois componentes principais.

Seguindo a calibração do modelo discriminante, a predição do mesmo resultou em 142 amostras de capixingui classificadas corretamente, sendo que, apenas 8 amostras foram classificadas como eucalipto. Com relação ao eucalipto, das 162 amostras, 155 foram classificadas como eucalipto, havendo apenas 7 erros de classificação.

Na validação externa do modelo discriminante (utilizando 30% das amostras), somente três amostras de capixingui e quatro de eucalipto foram classificadas erroneamente. Resultando em um acerto de 95,32% para o grupo da nativa e 94,29% para o grupo englobando as amostras de eucalipto, ou seja, acerto global de 94,77%. Os resultados estão apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7.** Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de capixingui (*Croton floribundus* Spreng.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

	PREDIÇÃO (70%)			VALIDAÇÃO EXTERNA (30%)		
	capixingui	eucalipto	Total	capixingui	eucalipto	Total
<b>Acertos</b>	142 (94,66%)	155 (95,67%)	95,19%	61 (95,31%)	66 (94,28)	94,77%
<b>Erros</b>	8 (5,34%)	7 (4,32%)	4,81%	3 (4,69%)	4 (5,71%)	5,23%
<b>Total</b>	150	162	-	64	70	-

Datt (2000) utilizou dados de reflectância de folha de seis diferentes espécies de eucalipto para a discriminação das mesmas. Através do procedimento de seleção de bandas *stepwise*, o autor identificou as bandas que melhor discriminaram as espécies utilizadas: 500, 540, 550, 590, 680, 1.170, 1.270, 1.280, 1.460, 1.720, 1.930 e 2.200nm.

Essa seleção de bandas corrobora com resultados obtidos por diversos outros autores, sendo que a maioria delas está relacionada com as bandas de absorção da REM por pigmentos (carotenoides, xantofilas e clorofilas), aos comprimentos de onda do azul, verde, vermelho, as bandas de absorção devido à presença de água e algumas outras bandas do NIR e SWIR.

Assim, considerando que cada espécie possui uma composição bioquímica e física específica e, que essas características estão relacionadas com algumas bandas espectrais, é possível justificar o sucesso na discriminação entre duas espécies.

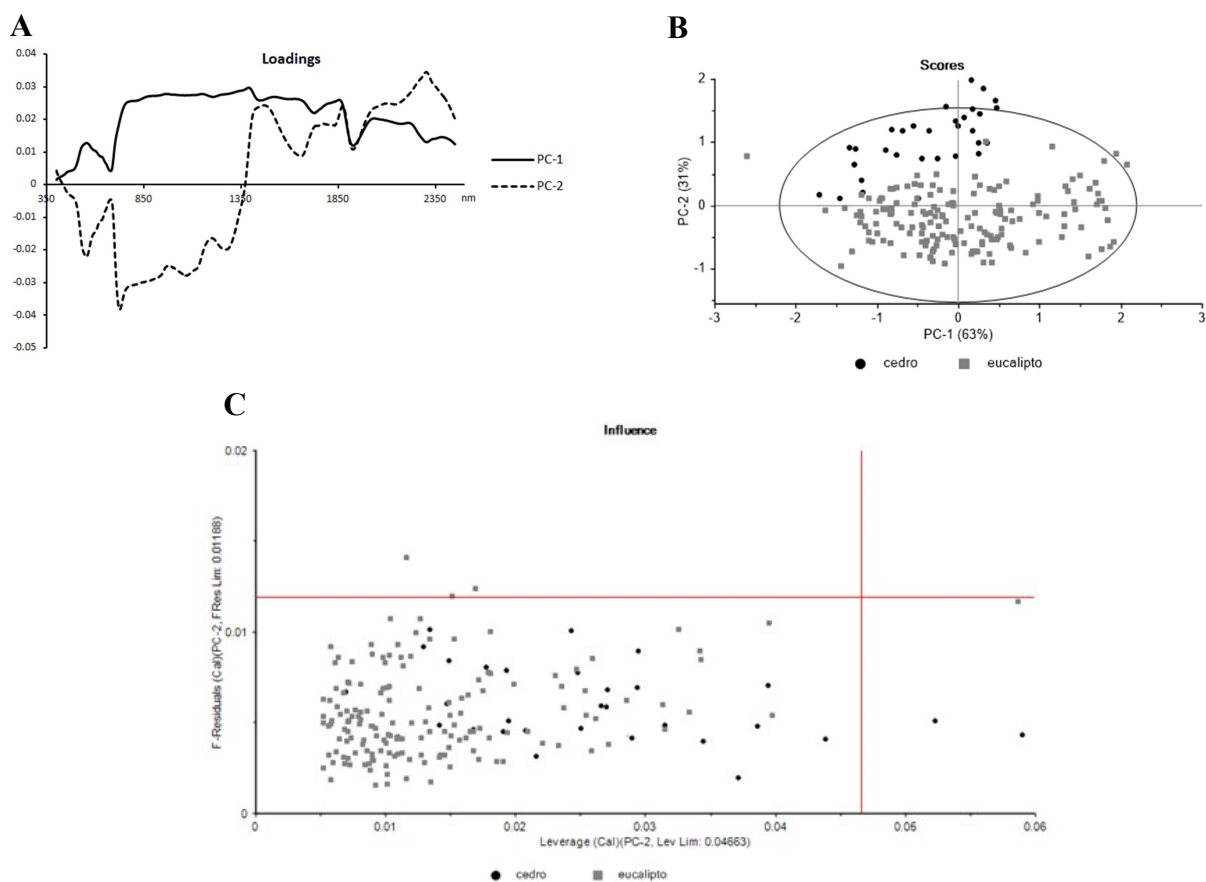
Na Figura 16 observa-se que as curvas de capixingui e eucalipto se sobrepõem em algumas regiões consideradas importantes por Datt (2000) para a discriminação de eucalipto, como em torno de 1.400nm (absorção pela água), sendo essa, a possível explicação para as confusões observadas na QDA.

#### **4.2.2 Classificação de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden).**

A análise por componentes principais entre cedro e eucalipto demonstrou que 63% da variância dos dados foi explicada pelo PC1 e 31% pelo PC2. Através do gráfico de *Loadings* (Figura 19A) é possível observar que os dois componentes se complementam, pois representam faixas semelhantes à curva espectral de folhas e também resíduos. O PC1 está relacionado, em partes, às variáveis das três faixas do espectro eletromagnético, Vis, NIR e SWIR, enquanto o PC2 relaciona-se com o NIR e SWIR.

Na Figura 19B é possível observar dois grupos distintos de dados. Porém, nota-se também sobreposições de *Scores* de cedro e eucalipto, podendo caracterizar possíveis confusões de discriminação entre amostras dos dois grupos.

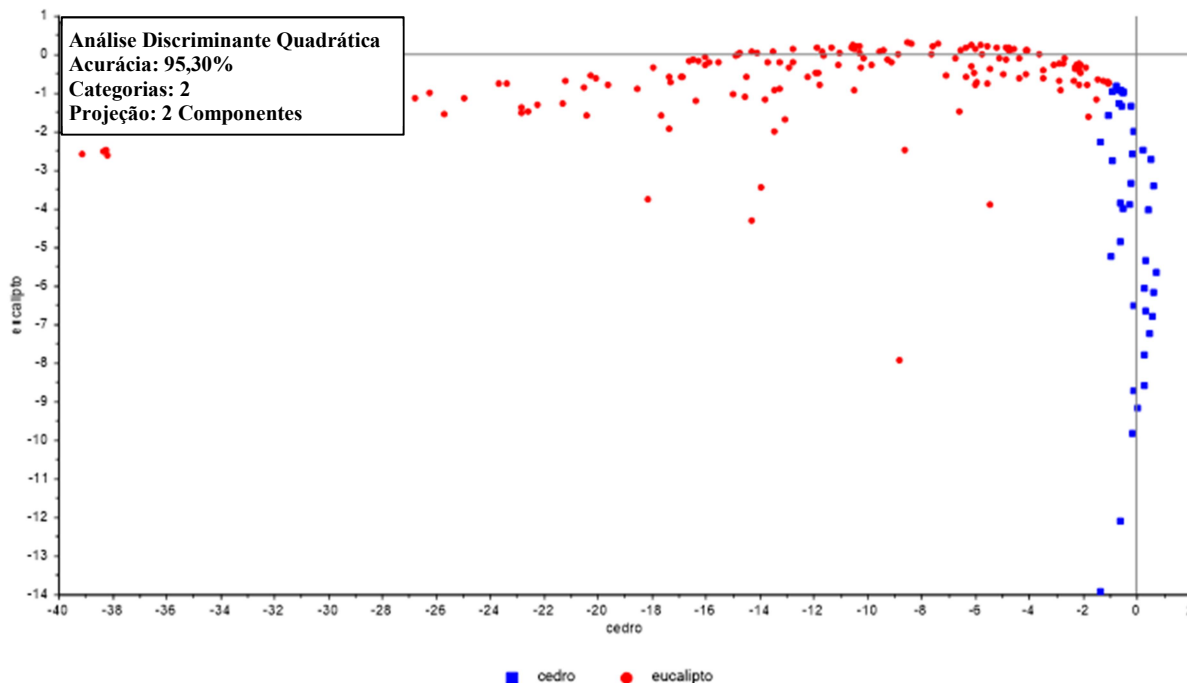
Ainda com relação aos *Scores*, algumas amostras de ambos os grupos estão localizadas fora da elipse de Hotellings  $T^2$  ( $\alpha = 0,05$ ). Contudo, de acordo com o gráfico de Influência (Figura 19C), nenhuma amostra é caracterizada como *outlier* influente, justificando a decisão de manter todas as amostras para as análises seguintes.



**Figura 19.** Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden).

Assim, o modelo de predição da análise discriminante quadrática entre cedro e eucalipto foi determinado utilizando duas PCs e todas as amostras de treinamento. Após calibração do modelo, a predição do mesmo gerou acurácia de 94,30% (Figura 20), em que 96,77% das amostras de cedro foram discriminadas corretamente, assim como 92,59% das amostras de eucalipto. A validação externa do modelo resultou em 97,62% de acertos, não

havendo nenhum erro de classificação para as amostras de cedro e apenas dois erros para o grupo do eucalipto (Tabela 8).



**Figura 20.** Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais.

**Tabela 8.** Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

	PREDIÇÃO (70%)			VALIDAÇÃO EXTERNA (30%)		
	cedro	eucalipto	Total	cedro	eucalipto	Total
<b>Acertos</b>	30 (96,77%)	152 (92,59%)	94,30%	14 (100%)	68 (97,14)	97,62%
<b>Erros</b>	1 (3,23%)	10 (7,41%)	5,70%	0 (0%)	2 (2,86%)	2,38%
<b>Total</b>	31	162	-	14	70	-

#### 4.2.3 Classificação de embaúba-branca (*Cecropia pachystachya* Trécul) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

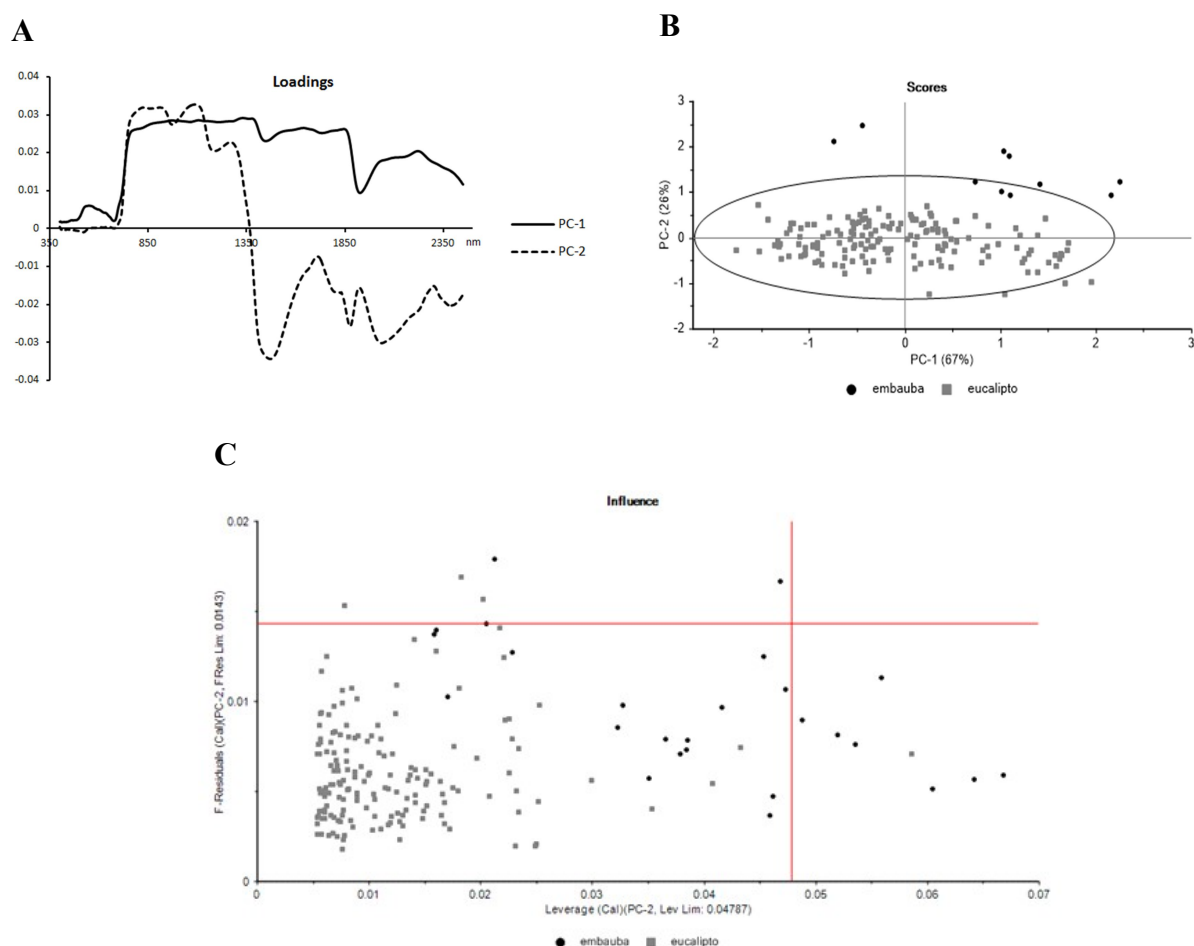
Na análise de componentes principais de embaúba-branca e eucalipto os destaques são as análises para identificação de *outliers*. No gráfico de *Scores* (Figura 21B), observa-se que diversas amostras de embaúba se comportam como *outliers*, de acordo com o teste de Hotellings  $T^2$  ( $\alpha = 0,05$ ).



No teste Leverage (Figura 21C), algumas amostras da mesma espécie são classificadas como influentes, ou seja, possuem potencial de influenciar o modelo. Contudo, nenhuma amostra representa um *outlier* influente.

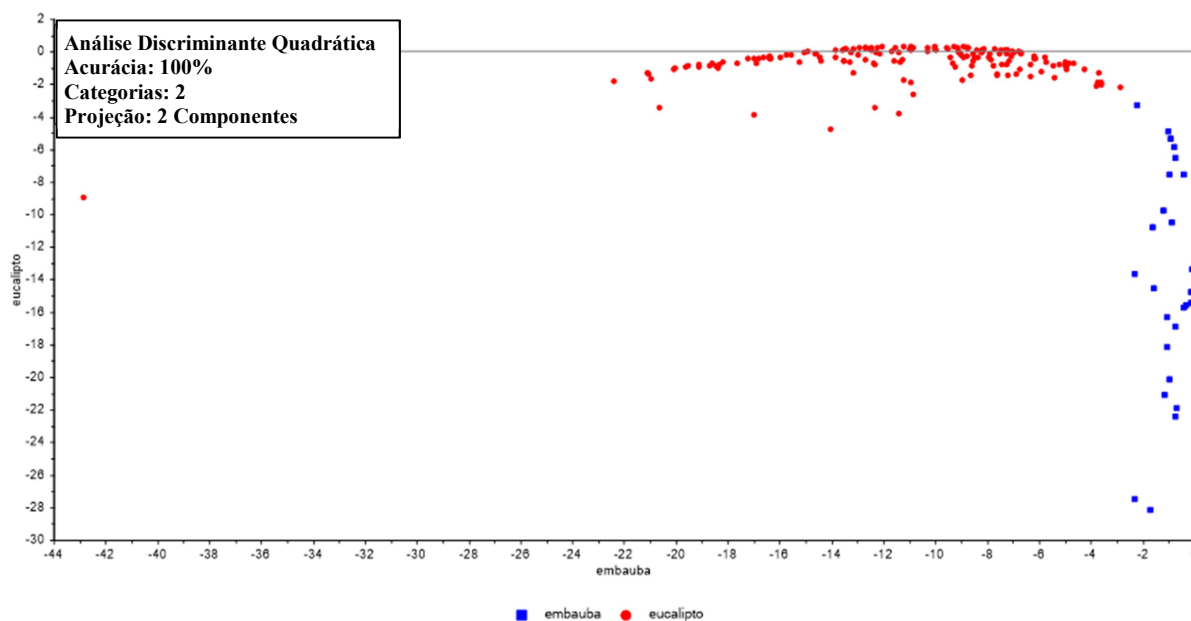
As folhas de embaúba são totalmente diferentes de todas as outras folhas estudadas, como observado na figura 3A, presente no anexo A, sendo que suas características únicas podem influenciar fortemente seu comportamento espectral. Com isso, supõe-se que o modelo gerado não englobe, totalmente, as variações inerentes a ambos os grupos, classificando algumas amostras de embaúba como *outliers*.

Portanto, decidiu-se prosseguir com as análises, já que amostras externas a elipse de Hotellings  $T^2$  não são necessariamente caracterizadas como *outliers*. Além de que é possível observar diferenciação dos grupos através do gráfico de *Scores*.



**Figura 21.** Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de embaúba-branca (*Cecropia pachystachya* Trécul) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden).

Como previsto devido a grande diferença entre as amostras foliares, os dados de reflectância de embaúba-branca e eucalipto foram distinguidos com acurácia de 100% (Figura 22), tanto na fase de predição, quanto na validação do modelo (Tabela 9).



**Figura 22.** Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de embaúba-branca (*Cecropia pachystachya* Trécul) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais.

**Tabela 9.** Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de embaúba-branca (*Cecropia pachystachya* Trécul) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

	PREDIÇÃO (70%)			VALIDAÇÃO EXTERNA (30%)		
	embaúba	eucalipto	Total	embaúba	eucalipto	Total
<b>Acertos</b>	26 (100%)	162(100%)	100%	11 (100%)	70(100%)	100%
<b>Erros</b>	0 (0%)	0 (0%)	0%	0 (0%)	0 (0%)	0%
<b>Total</b>	26	162	-	11	70	-

Esses resultados afirmam que as amostras possuem diferenças espectrais capazes de distingui-las, sendo necessária a aplicação de outros métodos de classificação em estudos futuros, que indiquem quais variáveis e como elas influenciam o modelo discriminante de cada espécie, a fim de melhor compreender as variações interespecíficas.

Outro tipo de análise que pode otimizar, tanto os trabalhos a campo, como a classificação de espécies, é o cálculo de tamanho amostral, pois algumas espécies são amostradas frequentemente de maneira desnecessária, enquanto outras possuem o conjunto amostral subestimado, dificultando sua caracterização espectral. Esse tipo de análise também

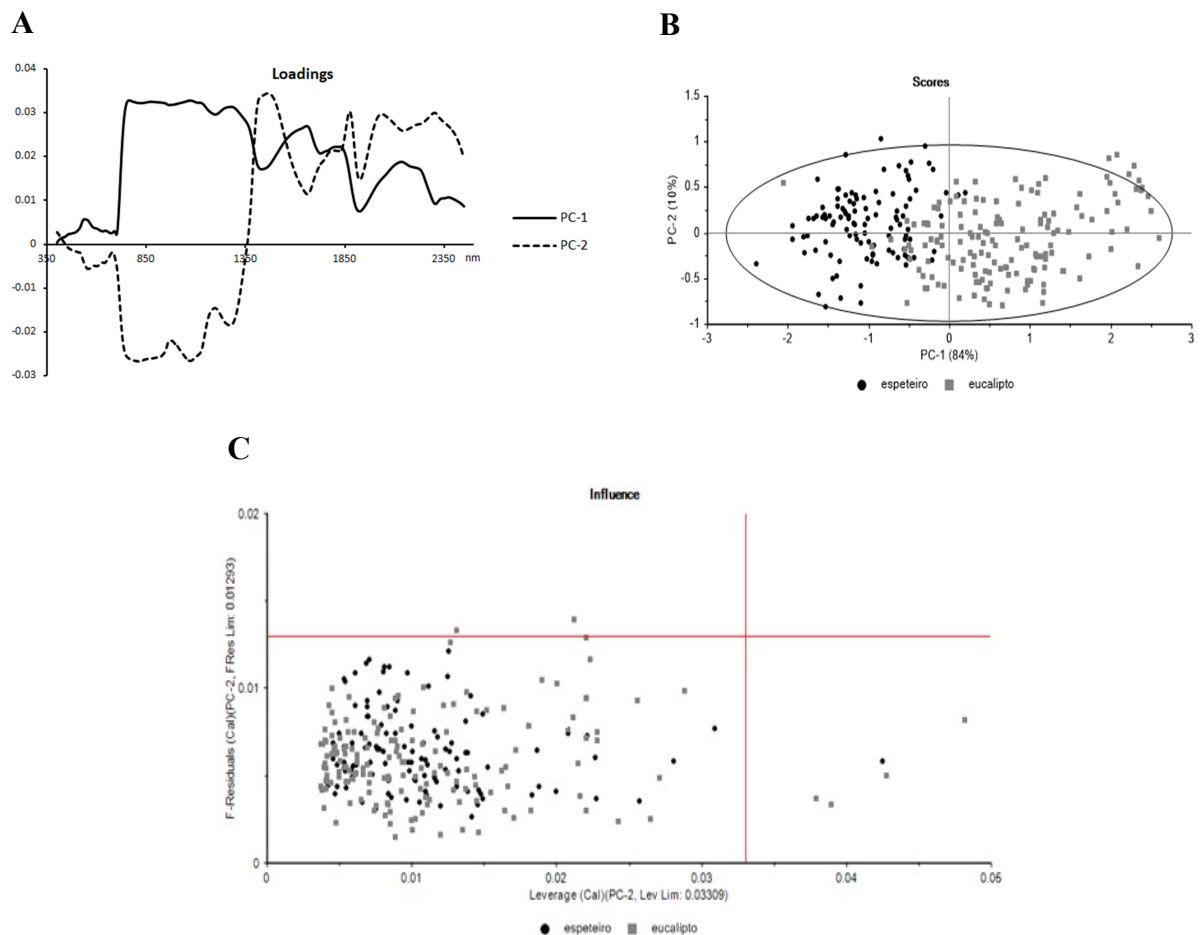
deve levar em consideração a tipologia e o estágio sucessional da floresta, assim como a fenologia das espécies estudadas, pois, utilizando o presente caso como exemplo, a FES encontra-se em estágios avançados de desenvolvimento na maioria dos locais de coleta, limitando o número de amostras de espécies pioneiras, como a embaúba.

#### **4.2.4 Classificação de espeteiro (*Casearia gossypiosperma* Briq.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden).**

Nessa análise, a variância total explicada por dois componentes principais foi de 94%. O PC1 engloba a maior variância explicada (84%), como observado no gráfico de *Loadings* (Figura 23A), em que a curva do PC1 relaciona-se com a curva de reflectância de folhas verdes sadias, sendo que o PC2 relaciona-se às variáveis da região do espectro eletromagnético entre 1.600 a 1850nm e à porção final do SWIR, entre 2.200 e 2.450nm, aproximadamente.

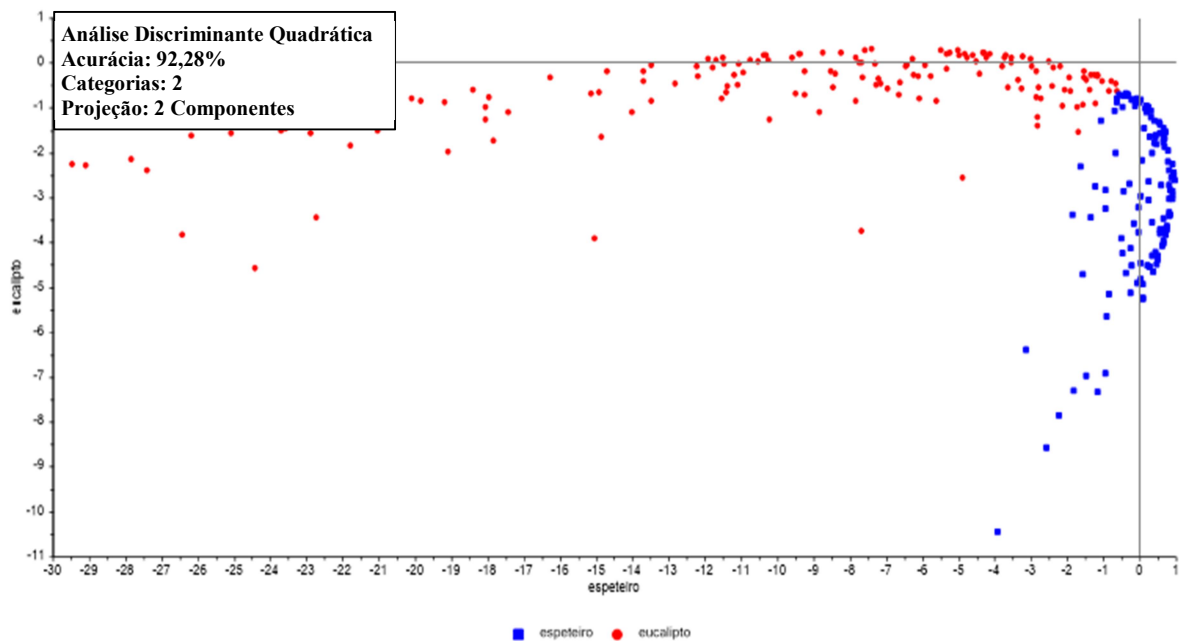
No gráfico de *Scores* (Figura 23B) observa-se claramente a distinção dos grupos de amostras de espeteiro e eucalipto, apontando para possível sucesso na análise discriminante. Contudo, nota-se sobreposições no centro da elipse, o que pode diminuir a porcentagem de acerto na classificação.

Nenhuma amostra foi retirada do grupo de predição, pois poucas ficaram próximas ao limite externo da elipse de Hotellings  $T^2$  ( $\alpha = 0,05$ ), e nenhuma foi considerada um *outlier* influente, de acordo com os testes F-Resíduos e Leverage (gráfico de Influência, Figura 23C).



**Figura 23.** Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de espeteiro (*Casearia gossypiosperma* Briq.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden).

Portanto, a análise discriminante quadrática foi gerada a partir de dois componentes principais, englobando todas as amostras para calibração e predição (70% do total). Conforme a Figura 24 e Tabela 10, a QDA resultou em acurácia de 92,28%. Na fase de predição do modelo, 94,54% das amostras de espeteiro foram classificadas corretamente, assim como 90,74% das amostras de eucalipto. Utilizando 30% das amostras que não participaram da calibração do modelo realizou-se a validação externa, resultando em 97,87% de acertos de classificação para a espécie nativa e 94,28% para a espécie exótica.



**Figura 24.** Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de espeteiro (*Casearia gossypiosperma* Briq.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais.

**Tabela 10.** Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de espeteiro (*Casearia gossypiosperma* Briq.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

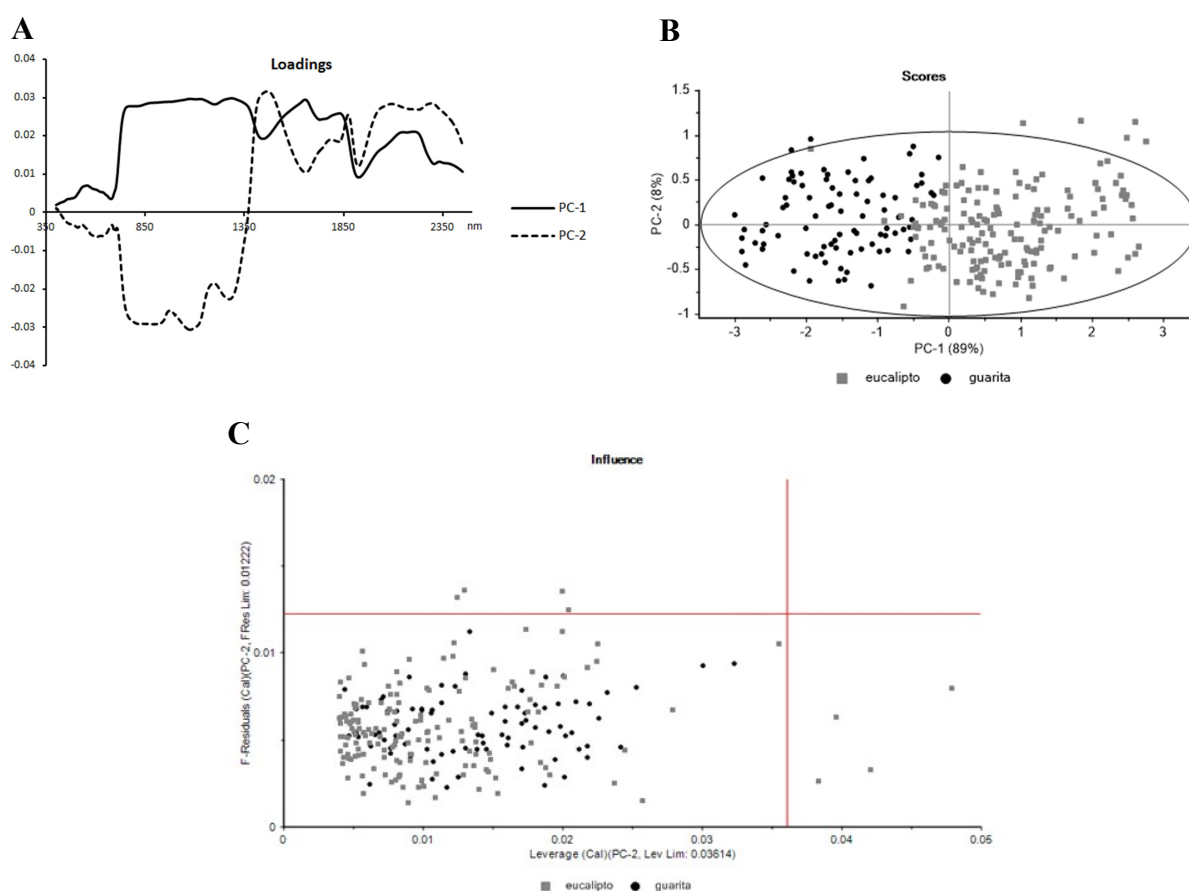
	PREDIÇÃO (70%)			VALIDAÇÃO EXTERNA (30%)		
	espeteiro	eucalipto	Total	espeteiro	eucalipto	Total
<b>Acertos</b>	104 (94,54%)	147 (90,74%)	92,28%	46 (97,87%)	66 (94,28)	95,73%
<b>Erros</b>	6 (5,45%)	15 (9,25%)	7,72%	1 (2,12%)	4 (5,71%)	4,27%
<b>Total</b>	110	162	-	47	70	-

#### 4.2.5 Classificação de guaritá (*Astronium graveolens* Jacq.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

A PCA realizada com os grupos de amostras de guaritá e eucalipto apresentou 97% da variância total explicada com apenas dois componentes, PC1: 89% e PC2: 8%. Na representação dos *Loadings* (Figura 25A) é possível observar que tanto o PC1 quanto o PC2 possuem porções relacionadas ao comportamento espectral de folhas verdes saudáveis, assim como de resíduos que as variáveis carregam. O primeiro componente principal apresenta relação com todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético utilizados nesse trabalho. O segundo componente principal está relacionado com as variáveis do SWIR, abrangendo também resíduos.

Os dois grupos de amostras apresentam-se distintos no gráfico de *Scores* (Figura 25B), havendo sobreposições no centro da elipse, ao longo do autovetor PC2, indicando similaridades espectrais entre algumas amostras nesse PC.

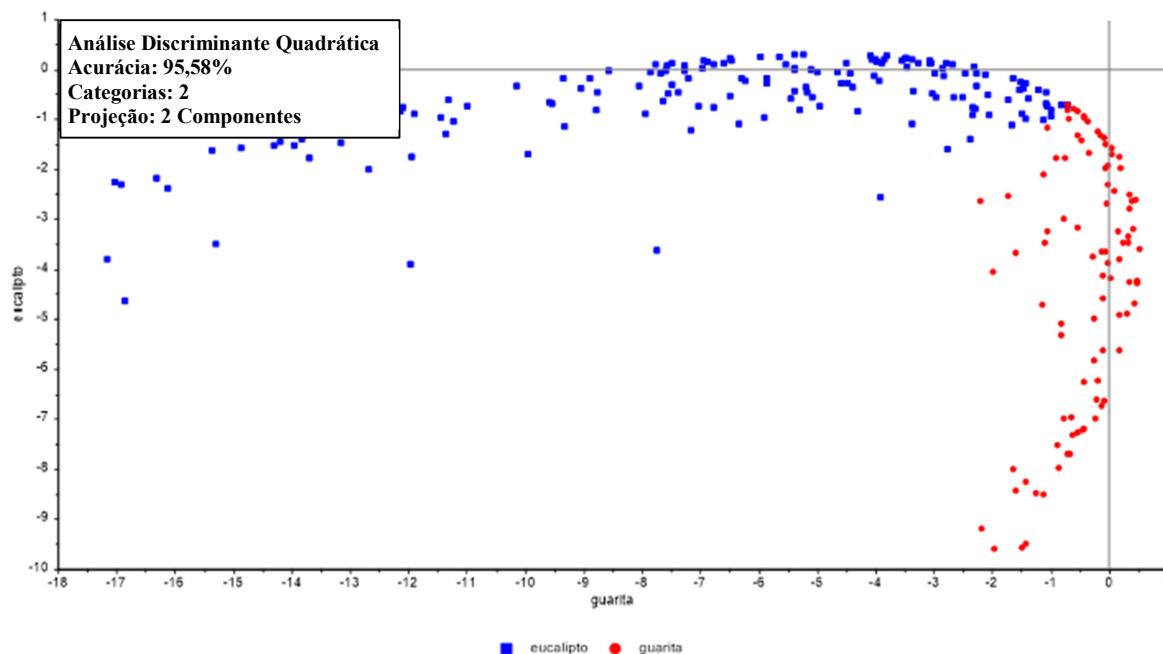
Em referência aos *outliers*, nota-se que algumas amostras de eucalipto não foram englobadas pelo teste Hotellings  $T^2$  ( $\alpha = 0,05$ ), todavia, nenhuma amostra foi caracterizada como *outlier* influente, pelos testes F-Resíduos e Leverage (Figura 25C). Além disso, a tentativa de retirada de *outliers* reduziu acertos na análise discriminante, indicando que cada amostra carrega informações importantes para a calibração do modelo.



**Figura 25.** Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de guaritá (*Astronium graveolens* Jacq.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden).

Dessa maneira, o modelo discriminante quadrático foi elaborado com base em dois PCs e 100% das amostras destinadas à calibração e predição (70% do total de amostras coletadas), sendo capaz de classificar corretamente 96,55% das amostras de guaritá e 95,06% das amostras de eucalipto, gerando uma acurácia total na fase de predição do modelo de

95,58% (Figura 26). Com relação à validação externa, os resultados também foram extremamente satisfatórios, em que 100% e 95,71% das amostras de guaritá e eucalipto, respectivamente, foram classificadas corretamente (Tabela 11).



**Figura 26.** Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de guaritá (*Astronium graveolens* Jacq.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais.

**Tabela 11.** Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de guaritá (*Astronium graveolens* Jacq.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

	PREDIÇÃO (70%)			VALIDAÇÃO EXTERNA (30%)		
	guaritá	eucalipto	Total	guaritá	eucalipto	Total
<b>Acertos</b>	84 (96,55%)	154 (95,06%)	95,58%	37 (100%)	67 (95,71%)	97,20%
<b>Erros</b>	3 (3,45%)	8 (4,94%)	4,42%	0 (0%)	3 (4,29%)	2,80%
<b>Total</b>	87	162	-	37	70	-

Na Figura 16 é possível observar que a espécie guaritá apresenta baixa reflectância na região do NIR, assim como o ipê-roxo e jequitibá. Castro-Esau et al. (2006) observaram a mesma característica para guaritá e a explicaram através da morfologia foliar. Segundo os autores, essa espécie apresenta baixa porcentagem de espaços intercelulares, mesófilo esponjoso muito compacto e estreito, assim como a largura da folha, permitindo que a REM interaja de maneira restrita com as interfaces ar e parece celular. Portanto, essas características específicas da espécie auxiliam sua discriminação, refletindo em elevada acurácia de classificação.

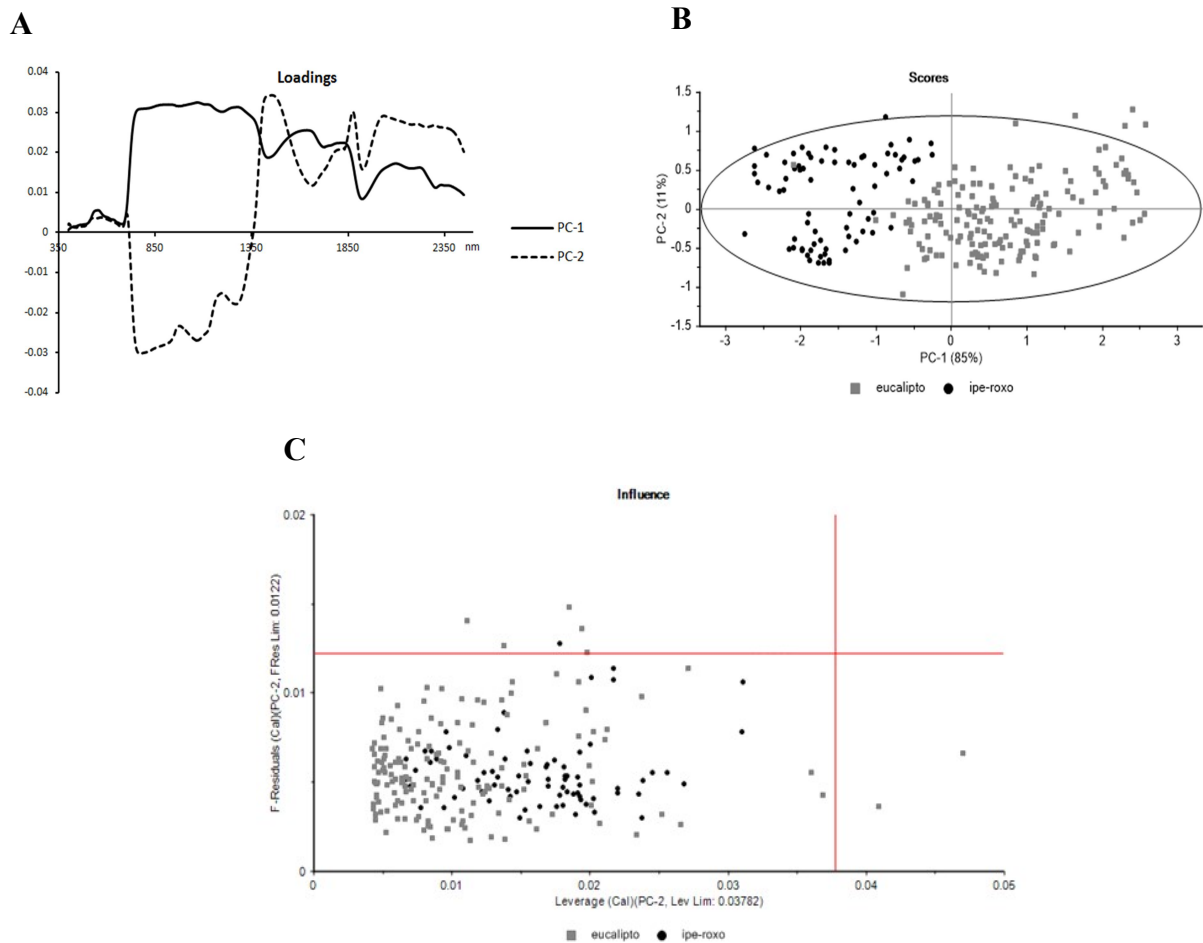
#### 4.2.6 Classificação de ipê-roxo (*Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

A primeira fase de análise de dados, a PCA, resultou em uma projeção dos dados ao longo de dois componentes principais, dado que 96% da variância total foram explicados (PC1: 86% e PC2: 11%).

Na avaliação da importância das variáveis utilizadas (gráfico de *Loadings*, Figura 27A), é possível notar que o PC1 assemelha-se à curva de reflectância da vegetação, portanto, o PC2 está relacionado com as informações residuais que cada variável influencia, exceto pela região do visível e final da SWIR, que sofrem contribuições dos dois PCs.

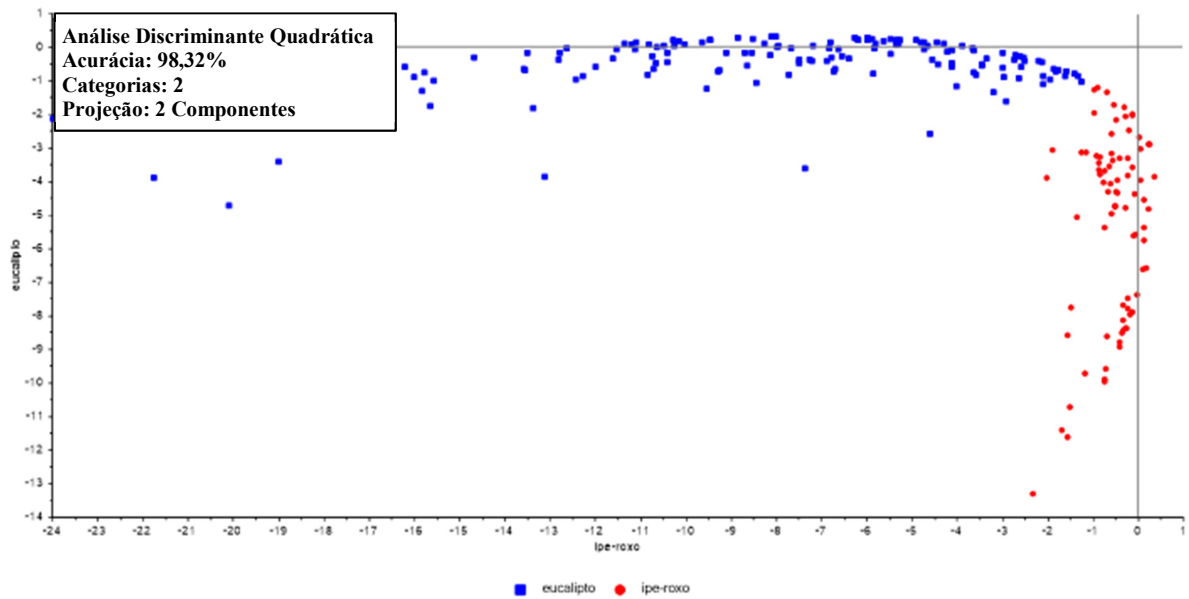
A distribuição das amostras ao longo dos componentes principais (gráfico de *Scores*, Figura 27B) demonstra dois agrupamentos que distinguem as espécies. Poucas amostras de ipê-roxo estão no limite da elipse que representa o teste Hotellings  $T^2$  ( $\alpha = 0,05$ ) para detecção de *outliers*, ao passo que as amostras de eucalipto não englobadas pela elipse não representam *outliers* que influenciam o modelo de maneira negativa, optando, então, por mantê-las na análise subsequente (Figura 27C).





**Figura 27.** Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de ipê-roxo (*Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden).

Desse modo, a QDA foi realizada com base em dois PCs e com o total de amostras destinadas à calibração do modelo. Com acurácia de 98,32% (Figura 28), a análise discriminante quadrática resultou em uma classificação, na predição, com 100% de acerto para a espécie nativa ipê-roxo, sendo que para o eucalipto, o acerto foi de 97,53%. Na validação externa do modelo gerado obteve-se um acerto de 100% e 97,14%, para o ipê-roxo e eucalipto, respectivamente, representando resultados extremamente satisfatórios (Tabela 12).



**Figura 28.** Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de ipê-roxo (*Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais.

**Tabela 12.** Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de ipê-roxo (*Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

	PREDIÇÃO (70%)			VALIDAÇÃO EXTERNA (30%)		
	ipê-roxo	eucalipto	Total	ipê-roxo	eucalipto	Total
<b>Acertos</b>	76 (100%)	158 (97,53%)	98,32%	36 (100%)	68 (97,14%)	98,11%
<b>Erros</b>	0 (0%)	4 (2,47%)	1,68%	0 (0%)	2 (2,86%)	1,89%
<b>Total</b>	76	162	-	36	70	-

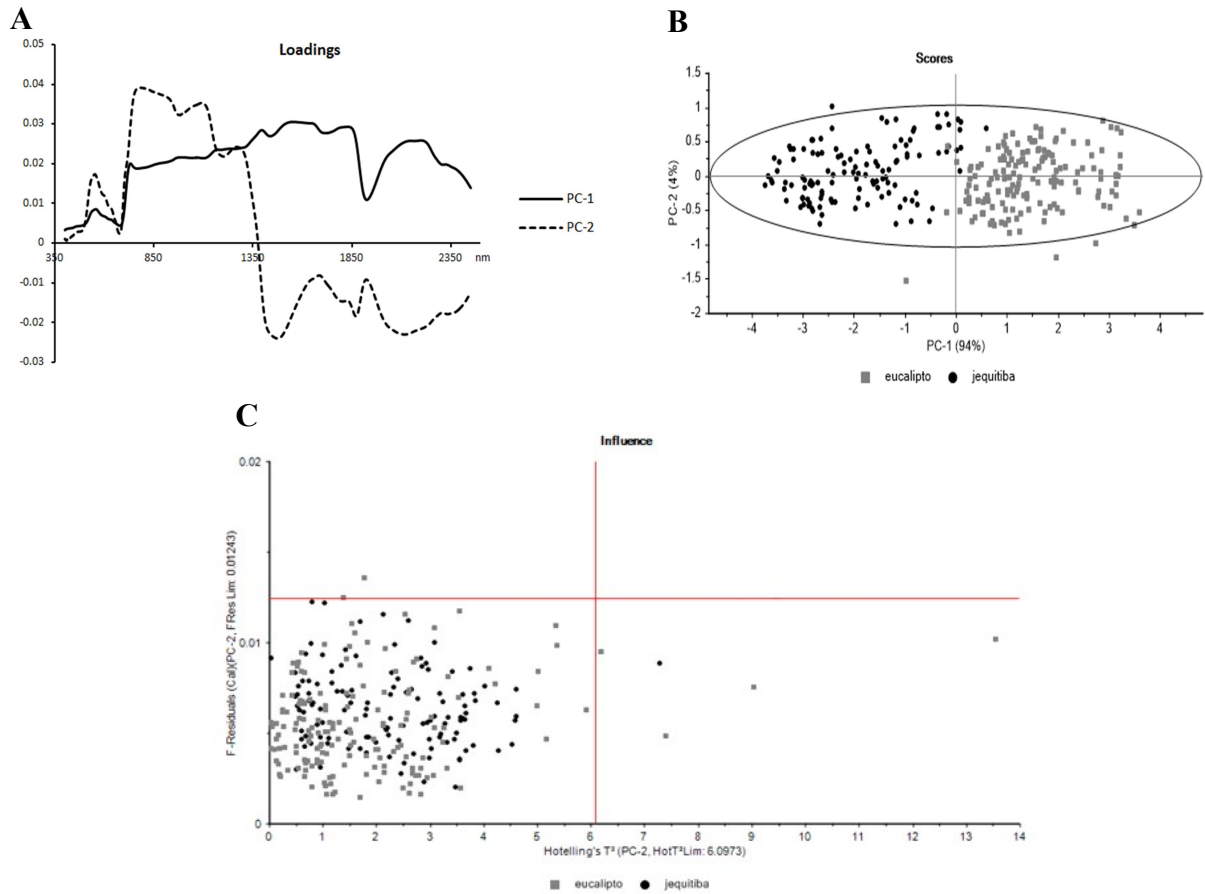
#### 4.2.7 Classificação de jequitibá (*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

A análise de componentes principais das amostras de jequitibá e eucalipto se comportou da mesma forma que as outras PCAs já descritas anteriormente, em que dois PCs foram suficientes para explicar mais de 90% da variação total dos dados.

Em consideração às variáveis, constata-se que elas influenciam tanto o PC1, quanto o PC2 (Figura 29A). A região do visível do espectro eletromagnético relaciona-se a ambos PCs, a faixa do NIR relaciona-se com o PC2 e a do SWIR, ao PC1.

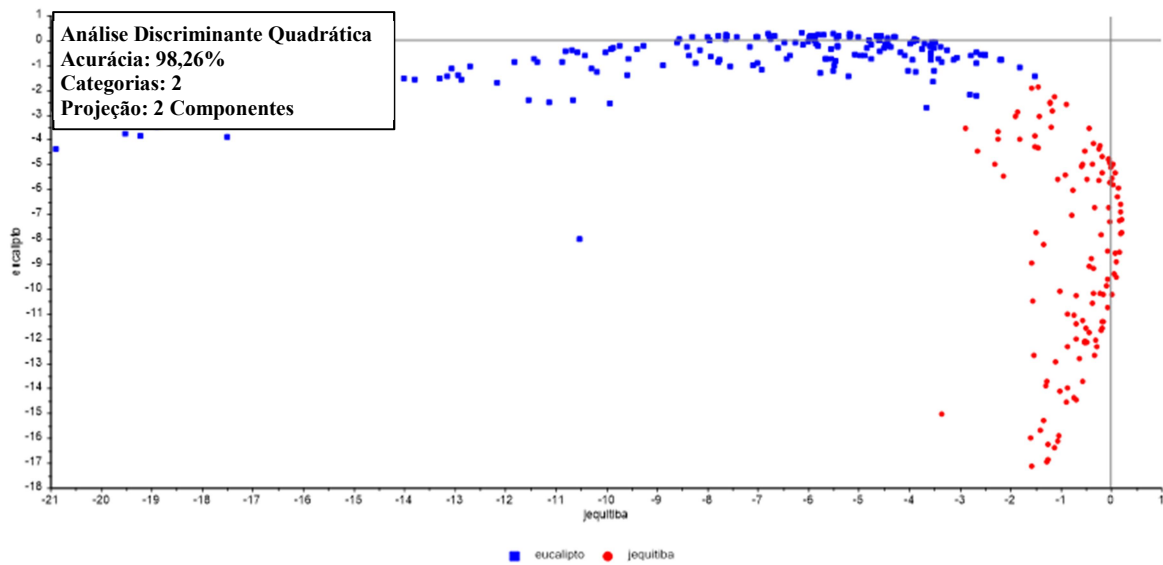
De acordo com a localização de cada amostra no novo plano de coordenadas formado pelos PCs (*Scores*, Figura 29B), é possível distinguir os dois grupos de espécies arbóreas, indicando êxito na discriminação dessas espécies com base em dados de reflectância de folhas.

Ainda conforme os dados gerados pela PCA, optou-se por manter todas as amostras no modelo de calibração, pois nenhuma foi considerada um *outlier* com influência negativa no modelo, de acordo com os testes F-Resíduos e Leverage (Figura 29C).



**Figura 29.** Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de jequitibá (*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden).

Conforme previsto pela PCA, a QDA aplicada nesses dois grupos também gerou resultados extremamente satisfatórios (Figura 30), apresentando apenas 3,20% de erro na predição do modelo para a espécie nativa conhecida como jequitibá, e 0,62% para a espécie exótica eucalipto. A validação externa do modelo confirmou os ótimos resultados, em que 98,11% das amostras de jequitibá e 97,14% das amostras de eucalipto foram classificadas corretamente, gerando uma acurácia de 97,56% (Tabela 13).



**Figura 30.** Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala, de folha de jequitibá (*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais.

**Tabela 13.** Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de jequitibá (*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

	PREDIÇÃO (70%)			VALIDAÇÃO EXTERNA (30%)		
	jequitibá	eucalipto	Total	jequitibá	eucalipto	Total
<b>Acertos</b>	121 (96,80%)	161 (99,38%)	98,26%	52 (98,11%)	68 (97,14%)	97,56%
<b>Erros</b>	4 (3,20%)	1 (0,62%)	1,74%	1 (1,89%)	2 (2,86%)	2,44%
<b>Total</b>	125	162	-	53	70	-

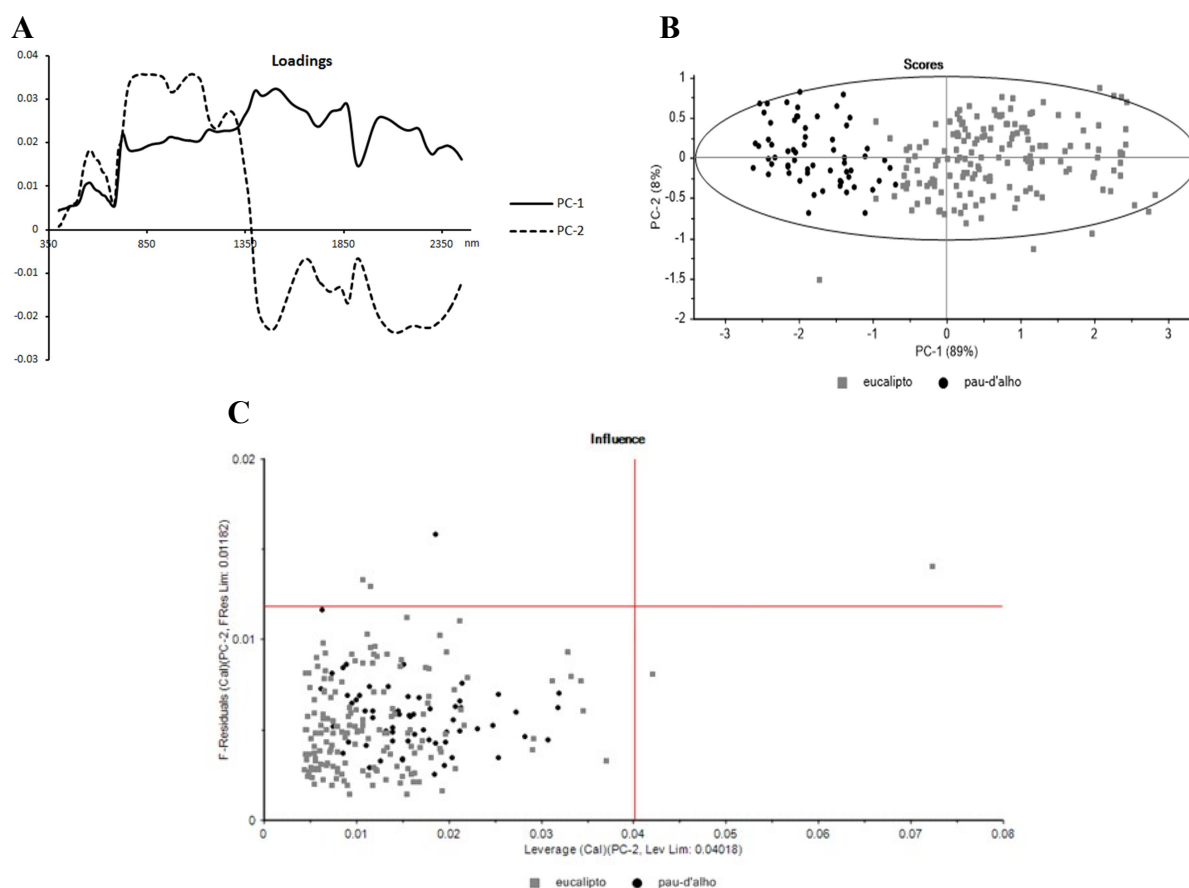
#### 4.2.8 Classificação de pau-d’alho (*Gallesia integrifolia* (Spreng.) Harms.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

Utilizando a reflectância das amostras de folhas desses dois grupos de espécies arbóreas gerou-se a análise por componentes principais. A variância total explicada por dois PCs foi de 97%, gerando uma variância total residual de apenas 3%, variação mínima que não é explicada pelos PC1 e PC2. O PC2 está relacionado com as variáveis correspondentes às regiões do espectro eletromagnético Vis e NIR, devido a similaridade com a curva de reflectância de folhas, de modo que as regiões também do Vis e do SWIR estão relacionadas ao PC1 (Figura 31A).

Conforme a distribuição das amostras ao redor dos dois componentes principais é possível diferenciar os dois grupos, ocorrendo poucas sobreposições (Figura 31B) e ainda

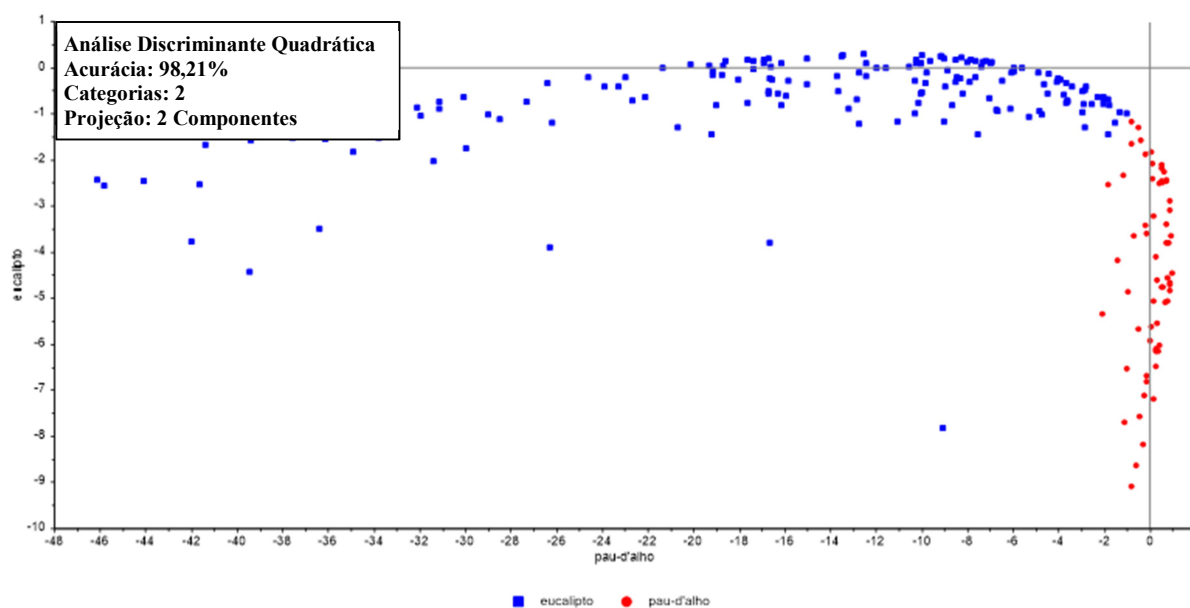
identificar possíveis *outliers*, conforme o teste Hotellings  $T^2$  ( $\alpha = 0,05$ ), representado através da elipse.

De acordo com o gráfico de Influência (Figura 31C), uma amostra de eucalipto comportou-se como *outlier* influente, apresentando valores para os parâmetros F-Resíduos e Leverage além dos limites para os testes estatísticos com 95% de confiança, podendo prejudicar o modelo, sendo então eliminada do grupo.



**Figura 31.** Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de pau-d'alho (*Galesia integrifolia* (Spreng.) Harms.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden).

Portanto, a partir da QDA, as espécies pau-d'alho e eucalipto foram discriminadas com uma acurácia de 98,21% (Figura 32). Na fase de predição do modelo discriminante, 96,77% das curvas de reflectância de pau-d'alho foram alocadas de forma correta no grupo da espécie nativa e, na fase de validação, todas as amostras foram corretamente classificadas (100%). Em relação ao eucalipto, 159 amostras foram preditas com êxito (98,76%) e, para a validação do modelo, as setenta novas amostras foram classificadas com um acerto de 95,71% (Tabela 14).



**Figura 32.** Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de pau-d’alho (*Galesia integrifolia* (Spreng.) Harms.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais.

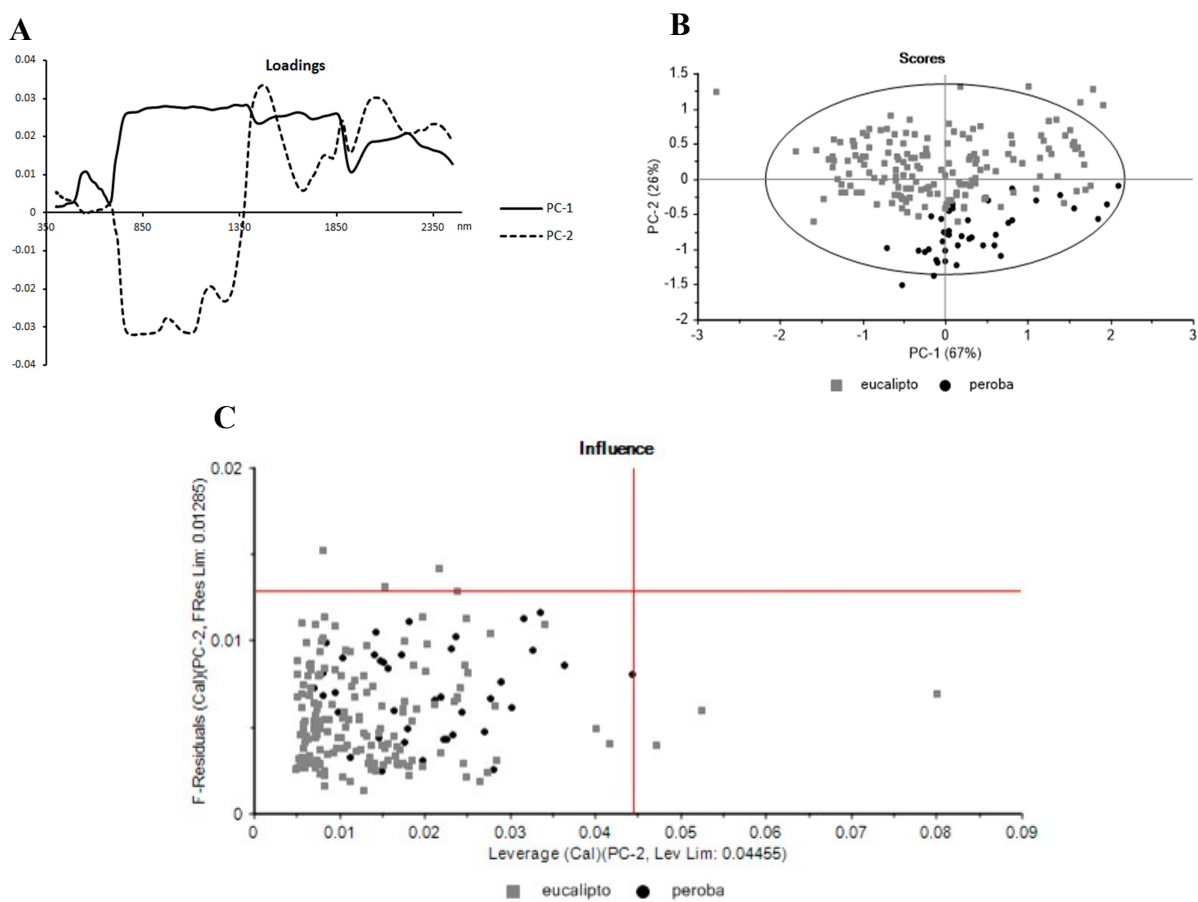
**Tabela 14.** Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de pau-d’alho (*Galesia integrifolia* (Spreng.) Harms.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

	PREDIÇÃO (70%)			VALIDAÇÃO EXTERNA (30%)		
	pau-d’alho	eucalipto	Total	pau-d’alho	eucalipto	Total
<b>Acertos</b>	60 (96,77%)	159 (98,76%)	98,21%	26 (100%)	67 (95,71%)	96,88%
<b>Erros</b>	2 (3,23%)	2 (1,24%)	1,79%	0 (0%)	3 (4,29%)	3,12%
<b>Total</b>	61	161	-	26	70	-

#### 4.2.9 Classificação de peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron* Müll.Arg.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

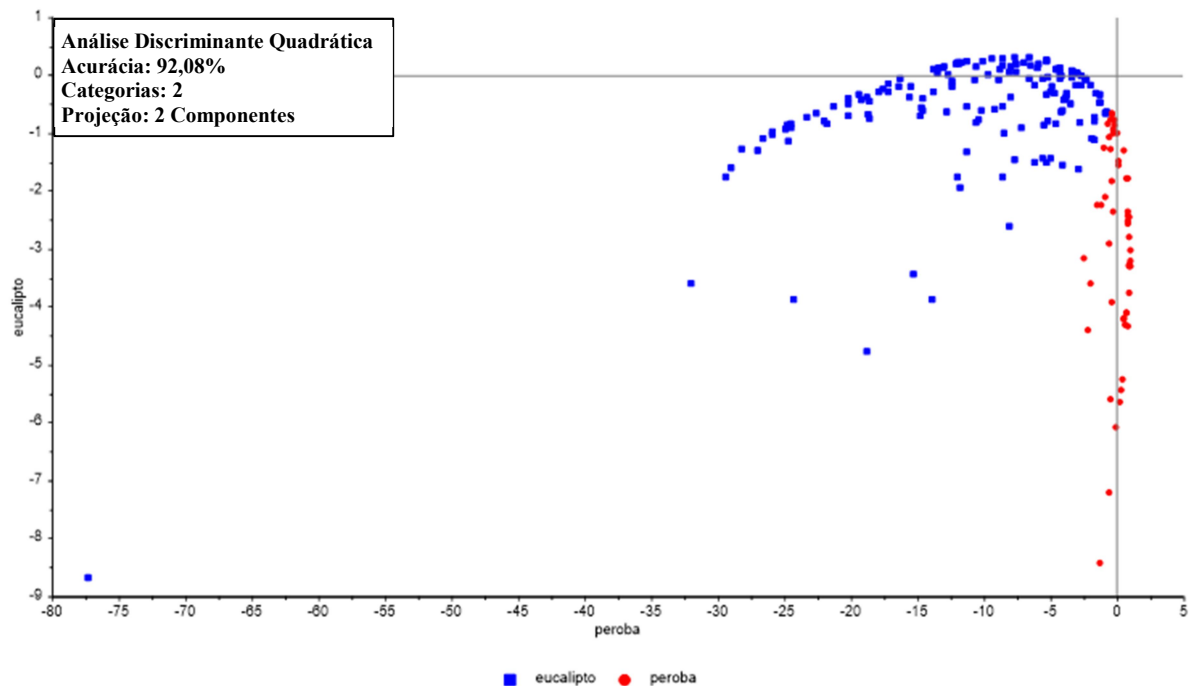
Com a PCA observou-se que dois componentes foram necessários para explicar 93% da variação total contida nos dados. No gráfico referente aos *Loadings* nota-se alguma similaridade entre o PC1 e a curva de reflectância da vegetação, principalmente nas regiões do espectro eletromagnético referente ao Vis, NIR e final do SWIR, indicando que as variáveis correspondentes à essas faixas influenciam esse componente (Figura 33A). De acordo com os *Scores* (Figura 33B), não é possível notar uma área que realmente agrupe a maioria das amostras de peroba-rosa, representando um indicativo de dificuldade de discriminação.

A partir dos testes Hotellings  $T^2$ , F-Resíduos e Leverages (todos com  $\alpha = 0,05$ , Figura 33C), optou-se por manter os *outliers* detectados, pois, além de não haver *outliers* que podem influenciar negativamente o modelo, a remoção dos mesmos gerou um efeito cascata, em que amostras que eram similares às que foram excluídas do modelo tornavam-se *outliers* após nova análise, significando que as variações entre os dados são importantes informações para a construção do modelo de classificação.



**Figura 33.** Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, de peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron* Müll.Arg.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden).

Conforme avaliação dos *Scores* de peroba, dentre todas as análises discriminantes apresentadas acima, o modelo gerado para a diferenciação entre a nativa e eucalipto foi o que resultou em menor acurácia, 92,08% (Figura 34). Contudo, os resultados foram satisfatórios, sendo que, na predição do modelo, a porcentagem de acerto foi de 95% e 91,35%, para peroba e eucalipto, respectivamente e, na validação externa, a discriminação das amostras de peroba foi de 100% e as de eucalipto 94,28% (Tabela 15).



**Figura 34.** Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron* Müll.Arg.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais.

**Tabela 15.** Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, de peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron* Müll.Arg.) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

	PREDIÇÃO (70%)			VALIDAÇÃO EXTERNA (30%)		
	peroba-rosa	eucalipto	Total	peroba-rosa	eucalipto	Total
<b>Acertos</b>	38 (95,00%)	148 (91,35%)	92,08%	17 (100%)	66 (94,28%)	95,40%
<b>Erros</b>	2 (5,00%)	14 (8,65%)	7,92%	0 (0%)	4 (7,72%)	4,60%
<b>Total</b>	40	162	-	17	70	-

No mapeamento de espécies nativas da FES por meio de imagem hiperespectral, Ferreira et al. (2016) obtiveram a menor acurácia de classificação para peroba, a nível de copa, dentre as oito espécies estudadas e em todos os métodos utilizados (LDA, L-SVMs, RBF-SVMs, RF). Segundo os autores, esse resultado está relacionado com a variabilidade intra e interespecífica, pois, a partir do cálculo de ângulo espectral ( $\theta$ ), observou-se que essa espécie apresenta sobreposição entre os valores de  $\theta$  para as variabilidades intra e inter espécies, significando que indivíduos de peroba apresentam características espectrais distintas entre si e, conseqüentemente, maior dificuldade na discriminação perante outras espécies vegetais.



#### 4.2.10 Classificação dos espectros em grupos

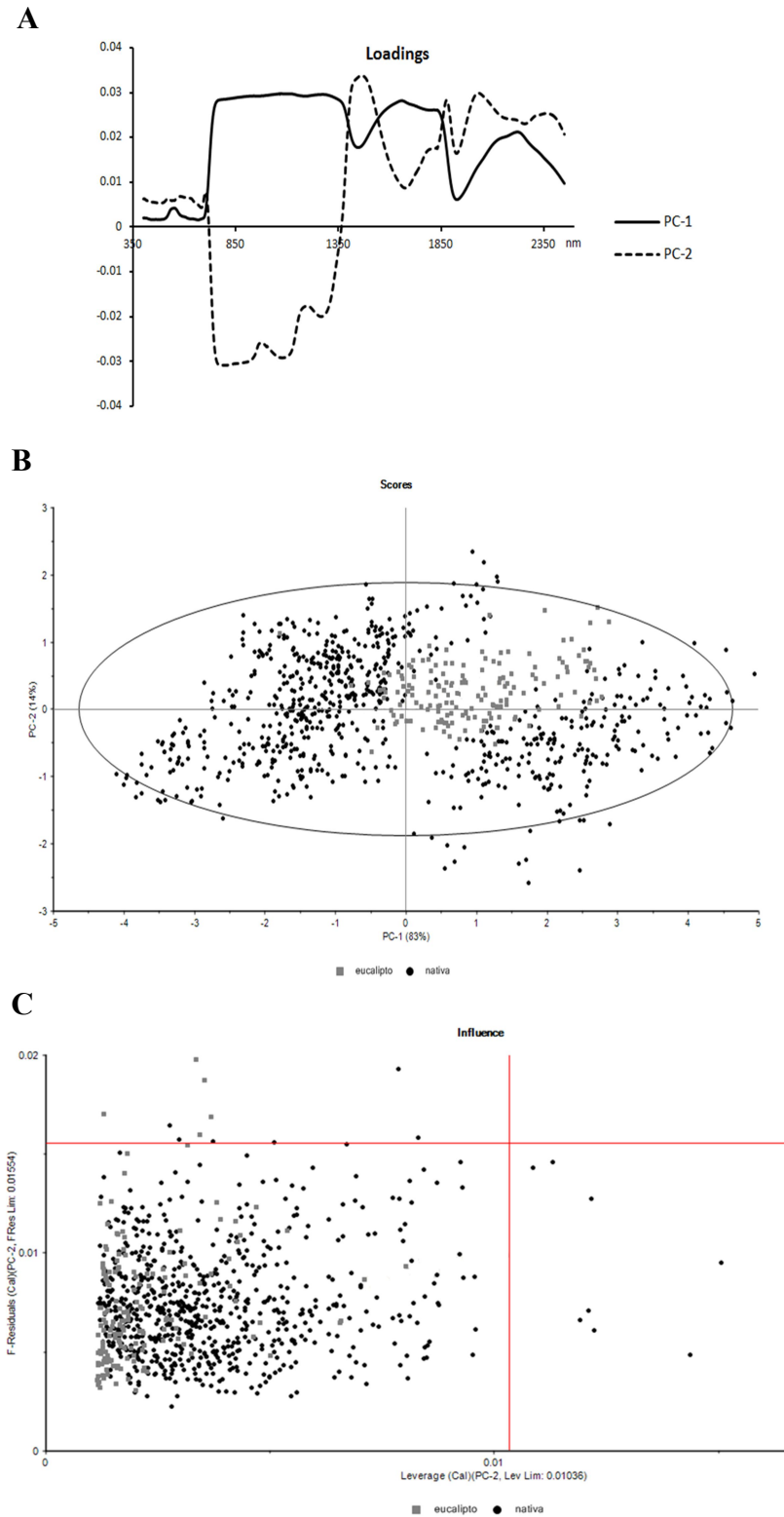
Após a constatação de que as espécies nativas utilizadas nesse estudo são individualmente distintas, espectralmente, da espécie exótica *Eucalyptus urograndis*, realizou-se uma análise de componentes principais englobando todas as amostras de espécies nativas em um só grupo, frente ao conjunto de amostras foliares dos indivíduos de eucalipto.

A visão geral da PCA é apresentada na Figura 35. Constata-se que dois componentes principais foram capazes de explicar 97% da variação total dos dados, da qual 83% foram explicadas pelo PC1 e 14% pelo PC2.

No gráfico de *Loadings* (Figura 35A) é possível verificar que o primeiro PC possui grande similaridade com a curva de reflectância espectral de folhas verdes saudáveis, em todas as porções do espectro eletromagnético (Vis ao SWIR), significando que, basicamente, o PC1 está relacionado com as mesmas variáveis que regem a reflectância de vegetações.

A partir do gráfico de *Scores* (Figura 35B) é possível observar três agrupamentos de amostras, dois deles relacionados às amostras de espécies nativas e um grupo englobando as amostras de eucalipto. Também verifica-se sobreposições de dados de grupos distintos, o que acarreta em má classificação. Ainda de acordo com o mesmo gráfico, o teste Hotellings  $T^2$  ( $\alpha = 0,05$ ), utilizado para detecção de *outliers*, demonstra algumas amostras localizadas no limite externo da elipse.

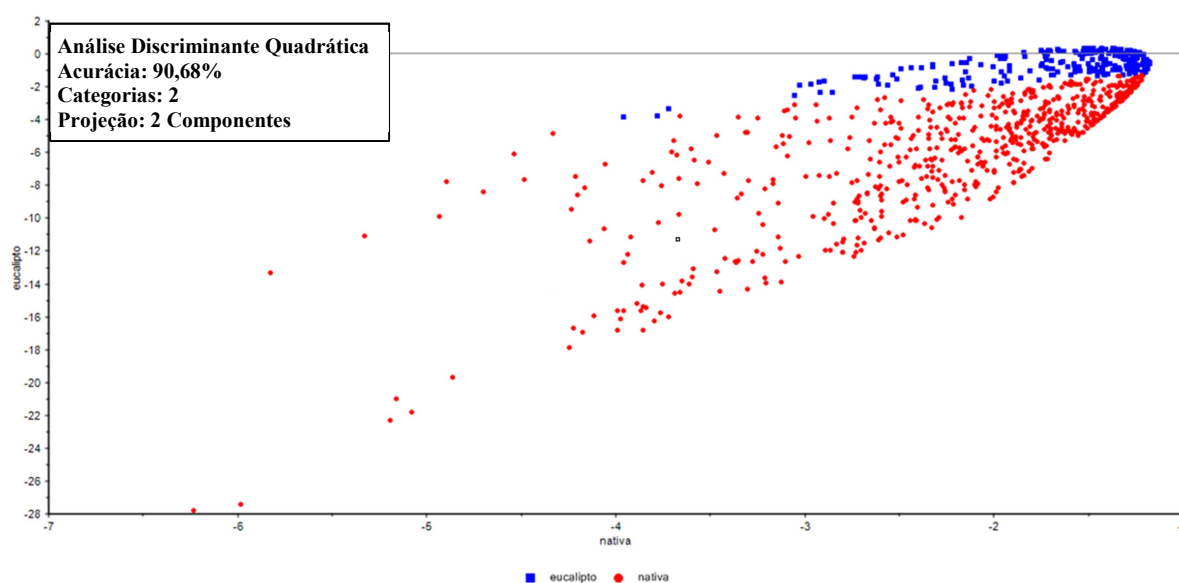
Contudo, de acordo com os testes F-Resíduos e Leverages (ambos com  $\alpha = 0,05$ ), nenhuma amostra apresentou altos valores para ambos os parâmetros (Figura 35C), o que caracterizaria um *outlier* com influencia negativa no modelo estimado.



**Figura 35.** Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de folha, dos dois grupos: um composto por nove espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual e o outro referente ao eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden).

Partindo dos resultados da PCA, a análise discriminante quadrática foi realizada utilizando dois componentes principais e 1.241 amostras, sendo 869 amostras destinadas à calibração do modelo discriminante e predição (70%) e 372 amostras destinadas à validação externa do modelo gerado, ou seja, o modelo discriminante foi testado em 30% das amostras que não participaram da construção do mesmo.

A Figura 36 representa o resultado da análise discriminante na fase de predição, em que se atingiu 91,10% de acurácia. Nesse gráfico é possível distinguir claramente os dois grupos de espécies, contudo, ainda ocorrem sobreposições de amostras.



**Figura 36.** Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, dos dois grupos: um composto por nove espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual e o outro referente ao eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden) utilizando dois componentes principais.

Como demonstrado na Tabela 16, na fase de predição, 636 amostras de espécies nativas foram classificadas corretamente (89,96%). Para o grupo de amostras de eucalipto, o acerto foi brevemente maior (93,83%), do qual 152 amostras foram classificadas corretamente, de um total de 162.

A fase de validação externa do modelo discriminante quadrático apresentou uma acurácia de 94,18%, em que 277 (91,72%) de espécies nativas foram classificadas corretamente, assim como 63 (90%) amostras de eucalipto. Os erros de classificação foram de 8,28 e 10%, para os grupos nativas e eucalipto, respectivamente.

**Tabela 16.** Resultados da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de folha, entre o grupo de espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual (nove espécies) e eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

	PREDIÇÃO (70%)			VALIDAÇÃO EXTERNA (30%)		
	nativas	eucalipto	Total	nativas	eucalipto	Total
<b>Acertos</b>	636 (89,96%)	152 (93,83%)	90,68%	277 (91,72%)	63 (90,0%)	94,18%
<b>Erros</b>	71 (10,04%)	10 (6,17%)	8,90%	25 (8,28%)	7 (10,0%)	5,82%
<b>Total</b>	707	162	-	302	70	-

Nessa QDA foi possível manter a especificação das espécies nativas dentro do grande grupo. As espécies que apresentaram maior confusão com indivíduos de eucalipto, na fase de predição, foram cedro (22,58%; 7 amostras de 31) e peroba-rosa (20%; 8 amostras de 40).

Já na fase de validação externa, a maior contribuição para a porcentagem de erros na discriminação de nativas perante o eucalipto foi de capixingui (20,31%; 13 amostras de 64), seguido de espeteiro (19,15%; 9 amostras de 47) e peroba-rosa (11,76%; 2 amostras de 17).

Esses resultados estão relacionados com a avaliação visual dos espectros médios de reflectância (Figura 16). Na região do Vis, a curva do eucalipto se assemelha à curva de espeteiro, na faixa após o pico do verde ao limite do vermelho (em torno de 600 a 720nm).

A semelhança entre as curvas de reflectância do eucalipto e capixingui pode ser observada na primeira faixa de absorção pela água (1.400nm), assim como no início do SWIR2. É também no SWIR2, porém na porção final, que é possível identificar semelhança entre as curvas da espécie exótica e peroba-rosa. Com relação ao SWIR1, notam-se sobreposições da curva de eucalipto com as curvas de peroba e cedro ao longo de toda essa região do espectro eletromagnético.

Como já mencionado, Clark et al. (2005) e Ferreira et al. (2013 e 2016) constataram a importância das bandas relacionadas à absorção do azul, ao pico do verde e ao limite do vermelho, assim como das faixas NIR e SWIR na discriminação de espécies arbóreas. Assim, as sobreposições das curvas de reflectância de diferentes espécies, nessas regiões do espectro eletromagnético, dificultam a discriminação das espécies, elevando a porcentagem de erro na análise discriminante.

A grande questão é que a variabilidade no fator de reflectância começa em escala de folha. De acordo com Castro-Esau et al. (2006), cálculos de amplitude e ângulo ( $D$  e  $\theta$ ) para avaliar a variabilidade entre espectros de folhas, de espécies nativas de FT, demonstraram que algumas delas apresentaram variação na distribuição de clorofila, em uma única folha. Essa variação aumenta quando se compara folhas provenientes de apenas um indivíduo e vai além,

na comparação de diferentes espécies, provenientes de lugares variados, tornando realmente complexa a construção de bibliotecas espectrais de vegetação.

Segundo Asner e Martin (2009) as espécies possuem características químicas únicas, o que reflete em assinaturas espectrais também únicas, contudo, existem fatores que podem afetar essa relação e dificultar a classificação de espécies.

A deciduidade, característica representativa da Floresta Estacional Semidecidual, é um desses fatores. Segundo Biswal (1995), na senescência de folhas de espécies decíduas ocorre o declínio de todos os pigmentos fotossintéticos, especialmente da clorofila, resultando em maior retenção de carotenoides na folha, sendo esse, um fator que pode contribuir positivamente para a localização de determinadas espécies em épocas específicas do ano.

Outra influência está relacionada aos diferentes períodos do ano. Amaral (2014) analisou a existência de variações na concentração de compostos químicos e físicos entre espécies da FES, entre os períodos chuvoso e seco. No período chuvoso, constatou-se diferença significativa para todos os compostos bioquímicos e para o composto físico celulose. Já na estação seca, todos os compostos apresentaram diferenças significativas, com exceção de carotenoides e xantofilas.

No presente trabalho, todas as espécies nativas foram coletadas em ambos os períodos, contudo, não houve separação das amostras para as análises apresentadas anteriormente, ficando evidente a necessidade de avaliações posteriores para que se compreenda melhor a influência das estações nas respostas espectrais, permitindo assim, aprimorar as metodologias utilizadas no presente estudo, a fim de excluir fatores que possam influenciar negativamente a construção de modelos de discriminação.

Outra observação levantada durante a realização desse trabalho foi a constatação de que os estudos envolvendo sensoriamento remoto hiperespectral e vegetação dificilmente se sobrepõem quanto aos sensores utilizados, faixas do espectro eletromagnético abrangidas, métodos de coleta e avaliação de dados, espécies caracterizadas, entre diversos outros fatores. Essa situação dificulta a interpretação dos resultados obtidos e restringe a evolução do conhecimento na área, indicando a necessidade de desenvolvimento de pesquisas posteriores que preencham essas lacunas.

Assim, a partir do presente estudo alguns objetivos futuros podem ser traçados, a fim de melhor compreender as variações intra e interespecíficas entre as espécies nativas e exóticas da FES e suas relações com as assinaturas espectrais, para que então, mapeamentos fidedignos da flora possam ser realizados a partir de imagens hiperespectrais.

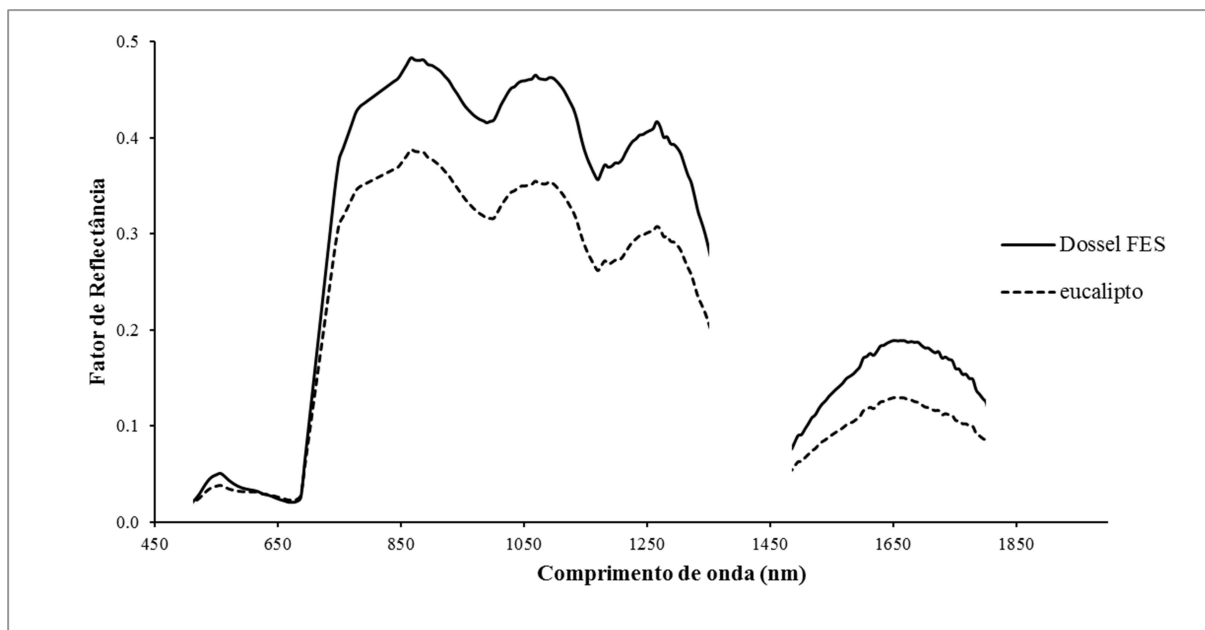
Dentre esses objetivos tem-se a análise da variabilidade espectral intra e interespecífica, determinação (em diferentes épocas do ano) de compostos bioquímicos e físicos das folhas e suas relações com a refletância em diferentes escalas (folha, *pixel* e copa), caracterização espectral de espécies pertencentes a diversos grupos (lianas, arbóreas, exóticas e invasoras, entre outras), e avaliação de outros métodos estatísticos para a discriminação de espécies, que possibilitem a obtenção do modelo discriminante de acordo com coeficientes e bandas que mais influenciam a classificação.

#### 4.3 CLASSIFICAÇÃO EM ESCALA DE *PIXEL*

A partir das imagens hiperespectrais representadas na Figura 12, 310 curvas de refletância de *pixels* representativos do dossel da FES, localizado na EEC, foram coletadas. As 330 curvas de refletância referentes aos indivíduos de eucalipto foram coletadas na imagem representada na Figura 13.

Na Figura 37 é possível observar o padrão médio de refletância dos *pixels* referente às áreas de eucalipto e de vegetação nativa da FES. Os espectros em escala de *pixel* apresentaram, de maneira geral, o mesmo comportamento das curvas obtidas em escala de folha, coletadas com o sensor de campo, com os mesmos padrões de absorção devido à presença de água e pigmentos e difusão da REM na região do NIR, devido às interfaces parede celular-espacos gasosos no mesófilo esponjoso.

Contudo, assim como Clark et al. (2005), nota-se que as feições de absorção da água, em 980 e 1.200nm foram mais acentuadas, quando comparadas às amostras de espectro de folhas. Roberts et al. (2004) constataram que, devido ao múltiplo espalhamento de fótons entre folhas e outros componentes de copa, na área de campo de visada de sensores hiperespectrais, ocorre a acentuação das feições de absorção relacionadas a parâmetros bioquímicos nos espectros obtidos através de leituras de *pixels*. A distribuição e a densidade dos tecidos componentes de copa são fatores que governam o espalhamento da REM e o quão acentuado serão as feições do espectro relacionadas a fatores bioquímicos.

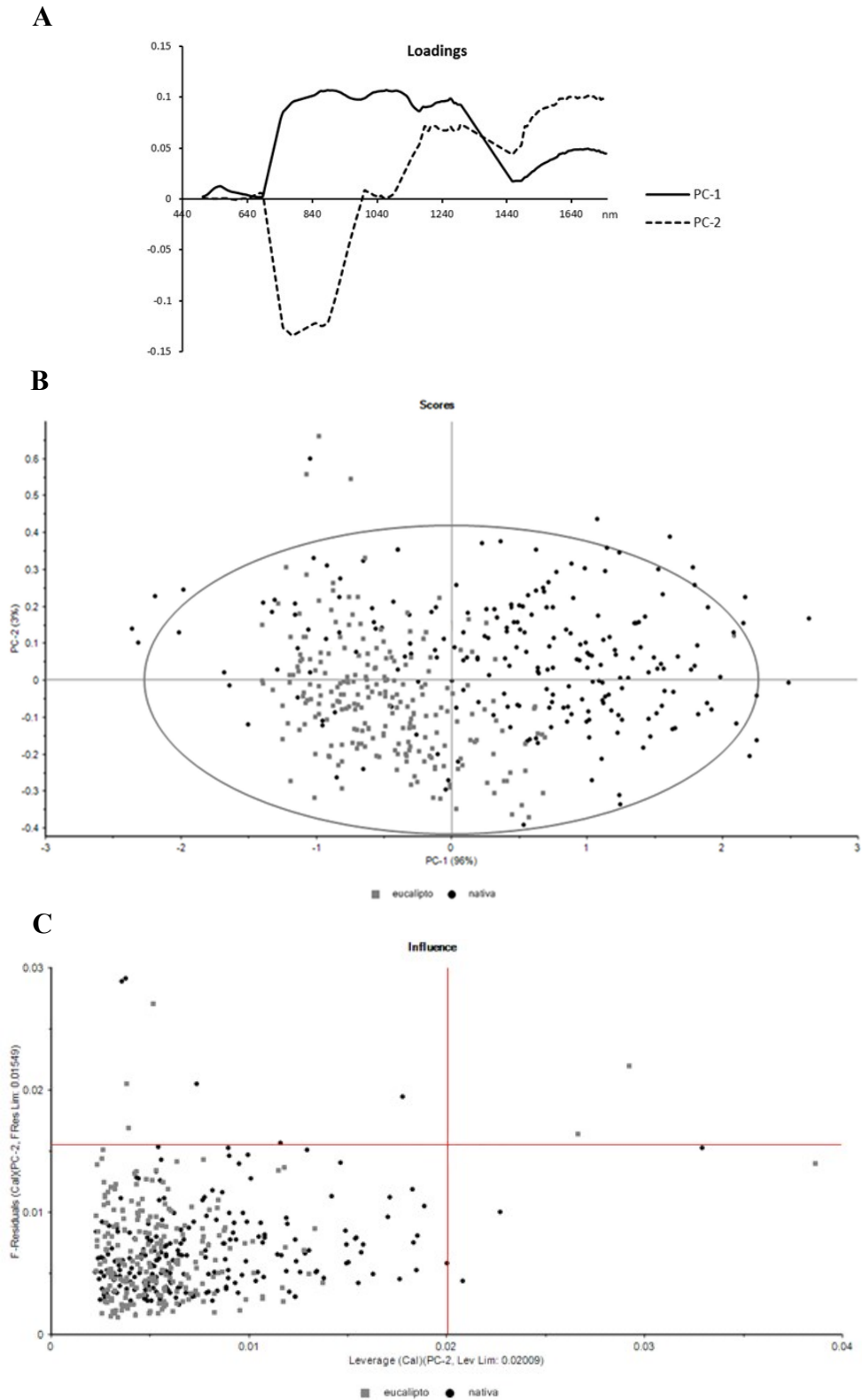


**Figura 37.** Curvas de reflectância média de *pixels* do dossel da Floresta Estacional Semidecidual (FES) e de área de plantio de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden), obtidas através de imagens hiperespectrais, com alta resolução espacial, geradas pelo sensor imageador AisaFENIX (SPECIM).

Partindo para a análise estatística, a PCA demonstrou que dois PCs explicaram 99% da variação total dos dados, distribuída em 95% no PC1 e 4% no PC2. A curva de *Loadings* do PC1 assemelha-se à curva de reflectância da vegetação obtida pelo sensor hiperespectral AisaFENIX, sendo que o PC2 apresenta mesma semelhança a partir da região do SIWR1, significando que o PC1 está relacionado com todas as variáveis do espectro, ao passo que no PC2 já se observa a abrangência de resíduos (Figura 38A).

A respeito da distribuição das amostras no novo plano formado pelos autovetores (gráfico de *Scores*, Figura 38B), distinguem-se os dois grupos, havendo, contudo, sobreposições sinalizando diminuição da acurácia na fase de discriminação das amostras.

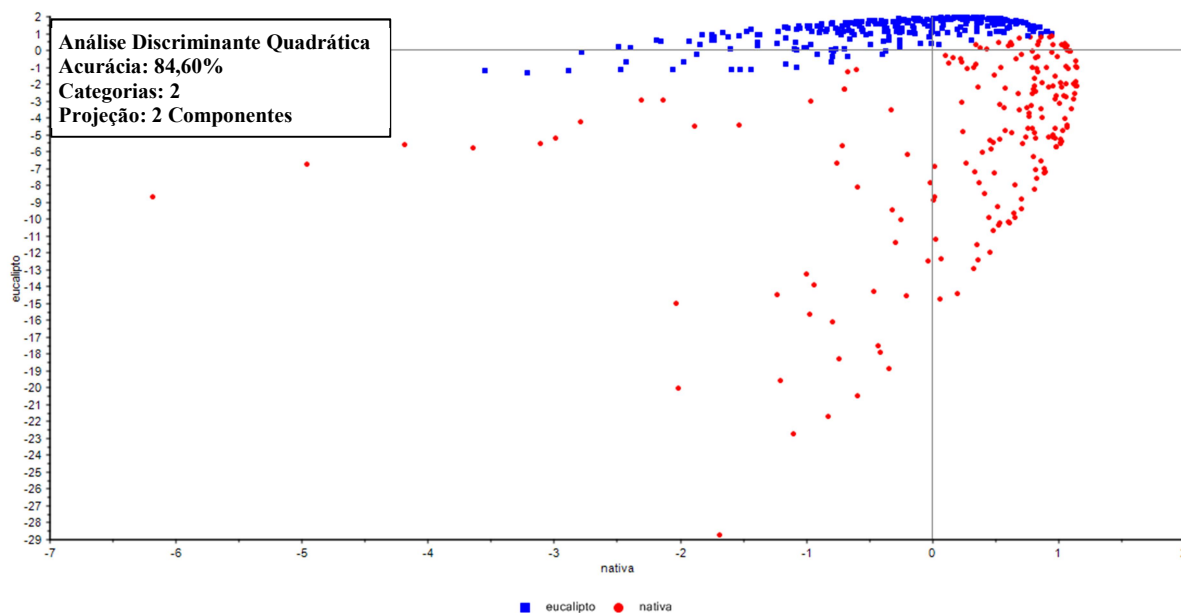
Os testes Hotellings  $T^2$ , F-Resíduos e Leverages (todos com  $\alpha = 0,05$ ) indicaram diversos possíveis *outliers*, porém, após retirada das amostras que apresentaram altos valores nos dois últimos testes, os resultados não foram alterados (Figura 38C).



**Figura 38.** Visão geral dos resultados da análise de componentes principais (PCA), de dados hiperespectrais em escala de *pixel*, do dossel da Floresta Estacional Semidecidual e de área de plantio de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden).



Assim, utilizando dois PCs, a análise discriminante quadrática gerou acurácia de 84,60% na fase de predição (Figura 39) e 81,77% na validação externa. O grupo das espécies nativas apresentou maior porcentagem de erro nas duas fases, conforme demonstrado Tabela 17.



**Figura 39.** Resultado da fase de predição da análise discriminante quadrática, de dados hiperespectrais em escala de *pixel*, do dossel da Floresta Estacional Semidecidual e de área de plantio de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden), utilizando dois componentes principais.

**Tabela 17.** Resultados da análise discriminante quadrática de dados hiperespectrais em escala de *pixel*, do dossel da Floresta Estacional Semidecidual e de área de plantio de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden)

	PREDIÇÃO (70%)			VALIDAÇÃO EXTERNA (30%)		
	nativas	eucalipto	Total	nativas	eucalipto	Total
<b>Acertos</b>	172 (79,26%)	207 (89,61%)	84,60%	72 (77,42%)	85 (85,86%)	81,77%
<b>Erros</b>	45 (20,74%)	24 (10,39%)	15,40%	21 (22,58%)	14 (14,14%)	18,23%
<b>Total</b>	217	231	-	93	99	-

A coleta de dados de reflectância das imagens hiperespectrais geradas pelo sensor AisaFENIX, do dossel da FES, foi realizada em regiões que compreendem somente espécies nativas. Porém, foi uma tarefa executada de forma aleatória, incluindo, dessa maneira, uma gama muito ampla de espécies vegetais componentes dessa formação florística, desde arbóreas e lianas, a espécies de sub-bosque.

Devido a esse fato, já era suposto que o grupo de amostras composto por espécies nativas apresentaria maior porcentagem de erros de classificação, sendo que, conforme

aumenta-se o número de espécies a serem distinguidas, diminui-se a acurácia da discriminação (CASTRO-ESAU et al., 2006), devido à alta variabilidade intra e interespecífica, característica de florestas tropicais.

Em contrapartida, as amostras de *pixels* de eucalipto são referentes a indivíduos híbridos, obtidos através de melhoramento genético e, por mais que não representem clones, a variabilidade intraespecífica é reduzida, em comparação às espécies vegetais nativas da FES.

A interação da luz com uma única folha é um fenômeno complexo. Quando a escala é ampliada para galhos e copas essa complexidade é multiplicada. Leituras espectrais coletadas a partir de *pixels* incluem variações relacionadas a diversos componentes, como as propriedades de reflectância e transmitância de elementos vegetais (folhas, hastes, galhos, flores, frutos, epífitas, lianas, plantas de sub-bosque, entre outros), solo e matéria orgânica, e também a fatores físicos como proporção e arranjo de copas (sombras, ângulo de orientação das folhas e densidade de copas) (CLARK et al., 2005; ASNER, 1998, KAREN et al., 2008).

Segundo Sánchez-Azofeifa et al. (2009), em florestas tropicais úmidas, folhas de lianas e espécies arbóreas não apresentaram diferenças significativas no conteúdo de pigmentos e características estruturais e ópticas, o que dificulta a discriminação de espécies através de dados de reflectância de *pixels*, por englobar variações de espécies de diversos grupos e, ainda, outros elementos.

Dessa maneira, considerando que ainda não se conhece a influência desses diversos fatores nos dados utilizados no presente trabalho, a acurácia obtida pela PCA-QDA pode ser considerada satisfatória.

Asner et al. (2008) utilizaram dados hiperespectrais e alta resolução espacial, associados ao sistema LiDar (laser) para discriminar espécies nativas e introduzidas no Havaí, concluindo que os dados coletados apresentam diferenças altamente significativas e consistentes. Além disso, espécies exóticas invasoras foram discriminadas perante espécies não invasoras através de diferenças no SWIR, associadas com conteúdo de água e arquitetura de copa.

Espécies exóticas invasoras possuem mecanismos físicos e bioquímicos que as auxiliam na dispersão e desenvolvimento em espaços fora de seu ambiente natural, influenciando sua assinatura espectral. Assim, é possível que, em áreas onde indivíduos de eucalipto são cultivados juntamente com espécies nativas (APPs e RLs), ocorra dificuldade na

classificação de imagens, já que as espécies de eucalipto não apresentam potencial invasor e são, na verdade, extremamente adaptadas às diversas condições do Estado do Paraná.

Com relação a faixa do espectro eletromagnético, Ferreira et al. (2016) obtiveram acurácia de 67 a 71% na discriminação de espécies nativas da FES em escala de copa, utilizando dados VNIR. Quando incorporaram dados SWIR, a acurácia passou a variar entre 81 a 84%, dependendo do método de discriminação utilizado, demonstrando a importância dessa faixa do espectro eletromagnético para a discriminação de espécies arbóreas da FES, principalmente nas regiões próximas a 1.700, 2.100 e 2.300nm.

A correção atmosférica das imagens geradas pelo aerolevanteamento foi realizada utilizando o algoritmo do software ATCOR-4, e validada utilizando lonas de diversas colorações e uma placa de sulfato de bário (Figura 14). Contudo, esses alvos padrões estavam localizados na Universidade Estadual de Maringá, ou seja, não havia alvos padrões nas imagens utilizadas no presente trabalho. Além disso, diferenças na umidade relativa do ar, altitude de voo e horário da aquisição das imagens podem ter influenciado a correção, não permitindo a utilização de todas as faixas do espectro.

Dessa maneira, métodos de correção atmosférica de imagens geradas pelo sensor AisaFENIX devem ser aprimorados, a fim de garantir a utilização de dados completos da faixa SWIR, importante na classificação de espécies vegetais.

Os mesmos autores (FERREIRA et al., 2016) também compararam dados multi e hiperespectrais, constatando que a acurácia da análise discriminante linear aumentou 13,1% quando utilizou-se dados hiperespectrais obtidos através de imagens geradas pelos sensores AisaEAGLE e AisaHAWK, SPECIM, em comparação com dados multiespectrais simulados do WV-3, no mapeamento de copas individuais de espécies nativas da FES.

Assim, o presente trabalho reafirma que dados de reflectância de pixels, de imagens hiperespectrais, com alta resolução espacial, são informações que apresentam grande potencial para a discriminação entre espécies arbóreas, tanto nativas, como exóticas.

E, para que se obtenha sucesso no mapeamento da flora, é necessário localizar a campo, de maneira precisa (GPS de alta precisão), indivíduos componentes do dossel e então correlacioná-los com as imagens.

Ainda, a fim de monitorar áreas de APP e RL, é necessário analisar imagens que contenham tanto as espécies nativas quanto as exóticas na mesma cena, para que se compreendam as misturas espectrais e diversos outros fatores que afetam a resposta espectral, assim como realizado por Asner et al. (2008).

## 5 CONCLUSÃO

Dados hiperespectrais de reflectância de folhas e *pixels* de alta resolução espacial são informações que apresentam grande potencial para a discriminação de espécies arbóreas, tanto nativas da FES, como exóticas.

O sensor hiperespectral AisaFENIX apresenta-se como uma importante ferramenta para estudos de caracterização e mapeamento de florestas tropicais.

O conjunto de análises estatísticas PCA-QDA (análise de componentes principais e análise discriminante quadrática) foi eficiente na discriminação de espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual (FES) perante a espécie exótica, em escala de folha.

A discriminação realizada em pares (cada espécie nativa discriminada, separadamente, da espécie *E. urograndis*) resultou em acurácias de predição e validação externa entre 92,08 e 100% e 94,77 e 100%, respectivamente.

A classificação de todas as espécies em dois grupos distintos (nativas e exóticas) resultou em acurácias de predição e validação externa de 90,68% e 94,18%, respectivamente.

Com relação à discriminação dos espectros de reflectância de *pixels*, de imagens hiperespectrais com alta resolução espacial, a PCA-QDA resultou em acertos de 84,60 e 81,77%, nas fases de predição e validação externa. Considerando que não se conhece todos os fatores que estão afetando a reflectância nesse nível de coleta, essas acurácias podem ser consideradas satisfatórias.

A coleta de curvas de reflectância do dossel da FES, de forma aleatória, resultou em maiores porcentagens de erro (20,74 a 22,58%), pois englobou um número desconhecido de espécies vegetais e outros elementos, como galhos, solo, serapilheira, sombreamento, entre outros.

## 6 RECOMENDAÇÕES

Com o presente trabalho, encaminhamentos para os próximos estudos podem ser firmados, com o objetivo de auxiliar o monitoramento de áreas de APP e RL, fundamentais para a conservação da FES, assim como outros biomas. Dentre os encaminhamentos estão:

- Caracterizar, espectralmente, outras espécies nativas da FES (de diferentes ecologias) e outras espécies exóticas comumente utilizadas na recuperação de APPs e RLs, na região;
- Avaliar as variabilidades espectrais intra e interespecífica;
- Melhor compreender as características ópticas, relacionando-as com compostos químicos e físicos presentes nas folhas;
- Analisar a influência da deciduidade e das estações do ano nas características ópticas;
- Trabalhar com imagens hiperespectrais de alta resolução espacial, que englobem espécies nativas e exóticas na mesma cena;
- Aprimorar os métodos de correção atmosférica das imagens geradas pelo sensor AisaFENIX, para que seja possível utilizar os dados de todas as faixas do espectro eletromagnético, do VIS ao SWIR;
- Identificar os indivíduos a campo, com equipamentos de alta precisão, para que seja possível o mapeamento de espécies em escala de copa e;
- Compreender a interferência de outros elementos, além da folha, na reflectância obtida através de leitura de *pixels*.

## REFERÊNCIAS

- ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012**. Brasília, DF, 2013. 148 p.
- ALCÂNTARA, J. M.; VERA, N.; SZCZIPANSKI, L.; EIBL, B.; RIOS, R. Análise de La dispersión de smillas de *Cedrela fisillis* em el bosque nativo de Misiones. **Yvyrareta**, Eldorado, n. 8, p. 16-21, 1997.
- ALLEN, W. A.; GAUSMAN, W.; RICHARDSON, J. Willstätter-Stoll Theory of Leaf Reflectance Evaluated by Ray Tracing. **Applied Optics**, v. 12, p. 2448-2453, 1973.
- ALVARENGA, B. S.; D'ARCO, E.; ADAMI, M.; FORMAGGIO, A. R. O ensino de conceitos e práticas de espectroradiometria laboratorial: estudo de caso com solos do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais....** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 739-747.
- AMARAL, C. H. **Sensriamento remoto hiperespectral e definição de espécies indicadoras aplicados à geobotânica no Bioma Cerrado**. Tese (Doutorado). São Paulo: USP, 2014. 201 f.
- ANDRADE, H. B. **Avaliação de espécies e procedências de *Eucalyptus L'Héritier* (Myrtaceae) nas regiões norte e noroeste do Estado de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Lavras: ESAL, 1991. 105 p.
- ASD Inc. **ViewSpec Pro User's Guide: ViewSpec Pro™ User Manual**, ASD Document 600555 Rev. A 2008.
- ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 64, p. 234-253, 1998.
- ASNER, G. P.; KNAPP, D. E.; KENNEDY-BOWDOIN, T.; JONES, M. O.; MARTIN, R. E.; BOARDMAN, J.; HUGHES, R. F. Invasive species detection in Hawaiian rainforests using airborne imaging spectroscopy and LiDAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 1942-1955, 2008.
- 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, p. 3958-3970, 2008.
- ASNER G. P.; MARTIN, R. E. Airborne spectranomics: mapping canopy chemical and taxonomic diversity in tropical forests. **Front Ecol Environ**, v. 7, p. 269-276, 2009.
- BALDECK, C. A.; ASNER, G. P.; MARTIN, R. E.; ANDERSON, C. B.; KNAPP, D. E.; KELLNER, J. R.; WRIGHT, S. J. Operational tree species mapping in a diverse tropical forest with airborne imaging spectroscopy. **PloS One**, v. 10, e0118403, 2015.
- BELTRATI, C. M.; PAOLI, A. A. S.; TIMONI, J. L. Morfologia e anatomia das sementes de *Cariniana legalis* (Mart.) O. Ktze e de *C. estrellensis* (Raddi) O. Ktze. (Lecythidaceae). **Silvicultura em São Paulo**, v. 16 A, p. 293-300, 1982. Edição de Anais do Congresso nacional sobre Essências Nativas, Campos do Jordão, SP, set. 1982.

BEN DOR, E.; SCHLÄPFER, D.; PLAZA, A. J.; MALTHUS, T. Hyperspectral Remote Sensing. In: WENDISCH M.; BRENGUIER J. L. (eds.). **Airborne Measurements for Environmental Research: Methods and Instruments** Weinheim, Alemanha: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.

BEN-DOR, E.; CHABRILLAT, S.; DEMATTÊ, J. A. M.; TAYLOR, G. R.; HILL, J.; WHITING, M. L.; SOMMER, S. Using imaging spectroscopy to study soil properties. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. S38-S55, 2009.

BERG, M. E. V. D. Formas atuais e potenciais de aproveitamento das espécies nativas e exóticas do Pantanal Mato-Grossense. In: SIMPÓSIO SOBRE RECURSOS NATURAIS E SÓCIO-ECONÔMICOS DO PANTANAL, 1., 1984, Corumbá. **Anais...** Brasília: Embrapa-DDT, 1986. p. 131-136.

BISWAL, B. Carotenoid catabolism during leaf senescence and its control by light. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 30, p. 3-13, 1995.

BITTENCOURT, N.; SEMIR, J. Sistemas reprodutivos de Bignoniaceae. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 51., 2000, Brasília, **Resumos**. Brasília: Sociedade Botânica do Brasil, 200. p. 154.

BONTER, D. N.; DONOVAN, T. M. Characteristics of important stopover locations for migrating birds: Remote sensing with radar in the Great Lakes basin. **Conservation Biology**, v. 23, p. 440-448, 2009.

BRANDÃO, M. Plantas medicamentosas do cerrado mineiro. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 15, n. 2, p. 15-20, 1991.

BRANDO, V. E.; DEKKER, A. G. Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality. **IEEE transactions on geoscience and remote sensing**, v. 41, p. 1378-1387, 2003.

BRASIL. Lei Federal nº 9.985, de 18 de julho de 2000 Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Casa Civil, Brasília, DF, 18 jul. 2000. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9985.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9985.htm)> Acesso em 05.10.2015>. Acesso em: jul. 2016.

BRASIL. Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Institui o Código Florestal. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Casa Civil, Brasília, DF, 23 maio 2012. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm)> Acesso em: jul. 2016.

BROOK, A.; BEN DOR, E. Supervised vicarious calibration (SVC) of hiperespectral remote-sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 1545-1555, 2011.

BURTENSHAW, J. C.; OLESON, E. M.; HILDEBRAND, J. A.; MCDONALD, M. A.; ANDREW, R. K.; HOWE, B. M.; MERCER, J. A. Acoustic and satellite remote sensing of blue whale seasonality and habitat in the Northeast Pacific. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 51, p. 967-986, 2004.

BUSTAMANTE, I. L. F. Notas sobre algumas madeiras úteis do sul de Minas Gerais. **Revista Florestal**, Rio de Janeiro, v. 7, p. 7-16, 24, 1948.

CÂMARA, G. A pesquisa espacial no Brasil: 50 anos de Inpe (1961-2011). **Rev. USP**, São Paulo, n. 89, mai. 2011. Disponível em: <[http://rusp.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S010399892011000200016&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://rusp.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010399892011000200016&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: ago.2016.

CAMO. **The Unscrambler User Manual: Methods**. 2006. Disponível em: <<http://www.camo.com/downloads/U9.6%20pdf%20manual/The%20Unscrambler%20Methods.pdf>>. Acesso em: out. 2016.

CAMO. **The Unscrambler® X**. Versão 10.4. 2016. Multivariate analysis CAMO Software AS. Disponível em: <<http://www.camo.com/rt/Products/Unscrambler/unscrambler.html>>. Acesso em: out. 2016.

CAMPOS, J. B. Unidades de conservação no Estado do Paraná – Ações e contradições. **IF Série Registros**. v. 17, p. 1-11, 1996.

CAMPOS, J.B. A fragmentação de ecossistemas, efeitos decorrentes e corredores de biodiversidade. In: Instituto Ambiental do Paraná (ed.). **UNIDADES DE CONSERVAÇÃO: Ações para valorização da biodiversidade**. Curitiba: IAP, 2006. p. 165-173.

CAMPOS, J. B.; COSTA FILHO, L. V. Sistema ou conjunto de unidades de conservação? In: Instituto Ambiental do Paraná.(ed.). **UNIDADES DE CONSERVAÇÃO: Ações para valorização da biodiversidade**. Curitiba: IAP, 2006. p. 17-24.

CAMPOS, T. L. L. **Flora da Floresta Estacional Semidecidual**. 2016. Fotografias. Coleção particular.

CARPANEZZI, O.T.B., WOEHL, J.H.; MUCHAILH, M. C. Sistema de Manutenção, Recuperação e Proteção da Reserva Legal e Áreas de Preservação Permanente (SISLEG): seu papel na conservação da natureza. In: Instituto Ambiental do Paraná.(ed.). **UNIDADES DE CONSERVAÇÃO: Ações para valorização da biodiversidade**. Curitiba: IAP, 2006. p. 193-201.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo, PR: Embrapa Floresta, 2003. v. 1. 1.039 p.

CASTRO-ESAU, K. L.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; CAELLI, T. Discrimination of lianas and trees with leaf-level hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 353-372, 2004.

CASTRO-ESAU, K. L.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, A.; RIVARD, B.; WRIGHT, J.; QUESADA, M. Variability in leaf optical properties of Mesoamerican trees and the potential for species classification. **American Journal of Botany**, v. 93, p. 517-530, 2006.

CNCFLORA - CENTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DA FLORA. *Casearia gossypiosperma*. In: CNCFLORA. **Lista Vermelha da flora brasileira versão 2012.2**. 2012.



Disponível em <[http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Casearia gossypiosperma](http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Casearia_gossypiosperma)>. Acesso em jun. 2016.

CHICATI, M. L. **Avaliação espectral de solos de áreas alagáveis do noroeste do Paraná**. Tese (Doutorado). Maringá, PR: UEM, 2011. 202 f.

CLARK, D. A.; PIPER, S. C.; KEELING, C. D.; CLARK, D. B. Tropical rain forest tree growth and atmospheric carbon dynamics linked to interannual temperature variation during 1984 – 2000. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 100, p. 5852 – 5857, 2003.

CLARK, M. L. **An Assessment of Hyperspectral and Lidar Remote Sensing for the Monitoring of Tropical Rain Forest Trees**. Santa Barbara, CA, EUA: University of California, 2005. 330 f.

CLARK, M. L.; ROBERTS, D. A.; CLARK, D. B. Hyperspectral discrimination of tropical rain forest tree species at leaf to crown scales. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, p. 375-398, 2005.

COCHRANE, M. A. Using vegetation reflectance variability for species level classification of hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, p. 2075-2087, 2000.

COLEMAN, T. L.; TADESSE, W. Differentiating soil physical properties from multiple band DOQ data. **Soil Science**, v. 160, p. 81-91, 1995.

CONCEIÇÃO, D. de A.; PAULA, J. E. de. Contribuição para o conhecimento da flora do Pantanal Mato-Grossense e sua relação com a fauna e o homem. In: SIMPÓSIO SOBRE RECURSOS NATURAIS E SÓCIO-ECONÔMICOS DO PANTANAL, 1., 1984, Corumbá. **Anais...** Brasília: Embrapa-DDT, 1986. p. 107-136.

CORREA, M. P. **Dicionário das plantas úteis do Brasil e das exóticas cultivadas**. Rio de Janeiro: Serviço de Informação Agrícola, v. 4, 1969.

COSTA FILHO, L. V. **Análise das relações florísticas e edáficas da Floresta Estacional Semidecidual na Estação Ecológica do Caiuá, Paraná**. Dissertação (Mestrado). Maringá, PR: UEM, 2004. 86 p.

COSTA, M. P. da; MANTOVANI, W. Composição e estrutura de clareiras em mata primária mesófila na Bacia de São Paulo, SP. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 4, pt. 1, p. 178-183, 1992. Edição de Anais do 2º Congresso Nacional sobre Essências Nativas, São Paulo, SP, mar. 1992.

CURRAN, P. J. Remote sensing of foliar chemistry. **Remote sensing of Environment**, v. 37, p. 35-46, 1989.

DATT, B. Recognition of eucalyptus forest species using hyperspectral reflectance data. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. **Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International**. v. 4, p. 1405-1407, 2000.

DEL QUIQUI, E. M.; MARTINS, S. S.; SHIMIZU, J. Y. Avaliação de espécies e procedências de *Eucalyptus* para o Noroeste do Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**, v. 23, p. 1173-1177, 2001.

DEMATTE, J. A. M. **Reflectância espectral de solos**. Tese (Livre Docência). Piracicaba, SP: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”-USP, 1999. 452 f.

DINERSTEIN, E.; OLSON, D. M.; GRAHAM, D. J.; WEBSTER, A. L.; PRIMM, S. A.; BOOKBINDER, M. P.; LEDEC, G. **Evaluación del estado de conservación de las eco-regiones terrestres de América Latina y el Caribe**. Washington, D.C.: Banco Mundial, 1995. 135 p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2013.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistemas de Produção Cultivo do eucalipto**. 4 ed. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2014. ISSN 1678-8281.

ENVI - ENVIRONMENT FOR VISUALIZING IMAGES. **ENVI Classic**. Versão 5.0. 2012. Exelis Visual Information Solutions Disponível em: <<http://www.envi.com.br/index.php/downloads>>. Acesso em: mar. 2016.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Global Forest Resources Assessment. **FAO Forestry Paper**, v. 163, 2010.

FÉRET, J. B.; ASNER, G. P. Spectroscopic classification of tropical forest species using radiative transfer modeling. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 2415-2422, 2011.

FÉRET, J.; ASNER, G. P. Semi-supervised methods to identify individual crowns of lowland tropical canopy species using imaging spectroscopy and LiDAR. **Remote Sensing**, v.4, p.2457–2476. 2012.

FÉRET, J. B.; ASNER, G. P. Tree species discrimination in tropical forests using airborne imaging spectroscopy. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 51, p. 73-84, 2013.

FERREIRA, I. V.; PRATES, A. P. L.; KARAM, K. F.; COELHO, B. H.S. Mosaicos de unidades de conservação no Brasil: os casos de Santa Catarina, Rio de Janeiro e São Paulo – Paraná. In: Congresso Brasileiro de Unidades de Conservação, 4., 2004, Curitiba. **Anais...**, Curitiba: Fundação O Boticário de Proteção à Natureza, 2004. p 187-197.

FERREIRA, M. P.; GRONDONA, A. E. B.; ROLIM, S. B. A.; SHIMABUKURO, Y. E. Analyzing the spectral variability of tropical tree species using hyperspectral feature selection and leaf optical modeling. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 7, 073502-1, 2013.

FERREIRA, M. P.; ZANOTTA, D. C.; ZORTEA, M.; KORTING, T. S.; FONSECA, L. M. G.; SHIMABUKURO, Y. E.; SOUZA FILHO, C. R. Automatic tree crown delineation in

tropical forest using hyperspectral data. In.: International geoscience and remote sensing symposium (IGARSS), Québec, Canadá. **Proceedings...** 2014. p. 784–787.

FERREIRA, M. P.; ZORTEA, M.; ZANOTTA, D. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SOUZA FILHO, C. R. Mapping tree species in tropical seasonal semi-deciduous forest with hyperspectral and multispectral data. **Remote sensing of environment**, v. 179, p. 66-78, 2016.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto**. 2005. Disponível em: <[http://lsa.ufpa.br/imiriba/NUMA\\_SR/conceitos\\_sm.pdf](http://lsa.ufpa.br/imiriba/NUMA_SR/conceitos_sm.pdf)> Acesso em: jun. 2016.

FISHER, R. A. The use of multiple measurements in taxonomic problems. **Annals of Eugenics**, v. 7, p. 179–188, 1936.

FRANCO, I. J.; FONTANA, V. L. **Ervas & plantas: a medicina dos simples**. Erechim: Imprimax, 1997. 177 p.

FRANCO, J. G. O. **Direito Ambiental: Matas Ciliares: conteúdo jurídico e biodiversidade**. Curitiba: Juruá, 2005. 192 p.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. ISA – INSTITUTO SÓCIO AMBIENTAL. **Atlas da evolução dos remanescentes florestais e ecossistemas associados do domínio da Mata Atlântica no período de 1990 - 1995**. São Paulo: INPE / ISA. 1998. p. 35-37.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica período 2014-2015. Relatório técnico**. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica e INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espacial. 2016. Disponível em: <[http://mapas.sosma.org.br/site\\_media/download/atlas\\_2014-2015\\_relatorio\\_tecnico\\_2016.pdf](http://mapas.sosma.org.br/site_media/download/atlas_2014-2015_relatorio_tecnico_2016.pdf)>. Acesso em: mai. 2016.

FUNG, T.; YAN MA, H. F.; SIU, W. L. Band selection using hyperspectral data of subtropical tree species. **Geocarto International**, v. 18, p. 3-11, 2003.

GASPAROTTO, A. de C. **Obtenção de imagens digitais e espectrometria da cultura do milho e sua relação com produtividade em diferentes doses de nitrogênio**. Dissertação (Mestrado). Maringá, PR: UEM, 2014. 126 p.

GATES, D. M.; KEEGAN, H. J.; SCHLETER, J. C.; WEIDNER, V. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v. 4, p. 11-20, 1965. Disponível em: <[https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/4B2624D4-DAFB-255A-0580157AF6C2256E\\_13623/ao-4-1-11.pdf?da=1&id=13623&seq=0&mobile=no](https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/4B2624D4-DAFB-255A-0580157AF6C2256E_13623/ao-4-1-11.pdf?da=1&id=13623&seq=0&mobile=no)>. Acesso em: ago. 2016.

GAUSMAN, H. W. **Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light**. Lubbock, Texas, USA: Texas Tech Press, 1985.

GOETZ, A. F. H. Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. S5-S16, 2009.

GOOGLE. **Google Earth**. Versão 7. 2016. Imagem Landsat da Zona 22 K, município de Mandaguaçu, PR, Brasil. Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>. Acesso em: nov. 2016.

GROFF, E. C., NANNI, M. R., POVH, F. P., CEZAR, E. Características agronômicas associadas com índices de vegetação medidos por sensores ativos de dossel na cultura da soja. **Semina: Ciências Agrárias, Londrina**, v. 34, p. 517-526, 2013.

HESKETH, M.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A. The effect of seasonal spectral variation on species classification in the Panamanian tropical forest. **Remote sensing of Environment**, v. 118, p. 73-82, 2012

IAP – INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Plano de Manejo da Estação Ecológica do Caiuá, Diamante do Norte – PR**. Paranavaí, PR: IAP, 1997. 154 p.

IAP - INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Algumas espécies florestais Nativas do Paraná**. 2016. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1355#EMBA%DABA>>. Acesso em: jun. 2016.

IAP - INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ; DIBAP - DIRETORIA DE BIODIVERSIDADE E ÁREAS PROTEGIDAS. **Plano de Manejo da Estação Ecológica do Caiuá**. Curitiba, PR: IAP/DIBAP, 2009. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1307.html>>. Acesso em: set. 2016.

IAPAR - INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Cartas climáticas básicas do Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 1978. 41 p.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Anuário**. Brasília, 2015. Disponível em: <[http://iba.org/images/shared/iba\\_2015.pdf](http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf)>. Acesso em: mai. 2016.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 1992. 92 p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA; SIDRA - SISTEMA IBGE DE RECUPERAÇÃO AUTOMÁTICA. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura - PEVS**. 2015. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pevs/default.asp>>. Acesso em: jul. 2016.

IPARDES – INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Cadernos Estatístico Município de Diamante do Norte**. 2016. Disponível em: <<http://www.ipardes.gov.br/cadernos/MontaCadPdf1.php?Municipio=87990>>. Acesso em jun. 2016.

IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. **Cadernos Estatístico Município de Mandaguaçu**. 2016. Disponível em: <<http://www.ipardes.gov.br/cadernos/MontaCadPdf1.php?Municipio=87160>>. Acesso em jun. 2016.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 4 ed. Upper Saddle River, Nova Jersey, EUA: SAS Institute Inc., 2000. 558 p.

KALACSKA, M.; BOHLMAN, S.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A. Hyperspectral discrimination of tropical dry forest lianas and trees: Comparative data reduction approaches at the leaf and canopy levels. **Remote Sensing of Environment**, v. 109, p. 406-415, 2007.

KAREN, L.; CASTRO-ESAU, K. L.; KALACSKA, M. Tropical Dry Forest Phenology and Discrimination of Tropical Tree Species Using Hyperspectral Data. In: KALACSKA, M.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A (eds.). **Hyperspectral Remote Sensing of Tropical and Sub-Tropical Forests**. CRC Press, 2008. p. 141-159.

KHATTREE, R.; NAIK, D. N. **Multivariate data reduction and discrimination with SAS software**. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc., 2000. 558 p.

KILLEAN, T. J.; GARCIA, E. E.; BECK, S. G. (ed.). **Guia de arboles de Bolívia**. La Paz: Herbario Nacional de Bolívia; St. Louis: Missouri Botanical Garden, 1993. 958 p.

KLEIN, R. M. A vegetação florestal. In: BIGARELLA, J. J. **Visão integrada da problemática da erosão**. Curitiba: ADEA: IBGE, 1985. p. 71-91.

KOKALY, R. F.; ROCKWELL, B. W.; HAIRE, S. L.; KING, T. V. V. Characterization of post-fire surface cover, soils, and burn severity at the Cerro Grande Fire, New Mexico, using hyperspectral and multispectral remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, p. 305-325, 2007.

KRUSE, F. A.; BOARDMAN, J. W.; HUNTINGTON, J. F. Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, p. 1388-1400, 2003.

KUHLMANN, M.; KUHN, E. **A flora do Distrito de Ibiti**. São Paulo: Instituto de Botânica, 1947. 221 p.

LEE, Z.; CARDER, K. L.; MOBLEY, C. D.; STEWARD, R. G.; PATCH, J. S. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. **Applied Optics**, v. 38, p. 3831-3843, 1999.

LEHMANN, J. R. K.; GROÙE-STOLTENBERG, A.; RÖMER, M.; OLDELAND, J. Field spectroscopy in the VNIR-SWIR region to discriminate between Mediterranean native plants and exotic-invasive shrubs based on leaf tannin content. **Remote Sensing**, v. 7, p. 1225-1241, 2015.

LEITE, P. F.; KLEIN, R. M.; PASTORE, U.; COURA NETO, A. B. **A vegetação da área de influência do reservatório da Usina Hidrelétrica de Ilha Grande (PR/MS): levantamento na escala 1:250.000**. Brasília: IBGE, 1986. 52 p.

LEME, M. C. J.; DURIGAN, M. E.; RAMOS, A. Avaliação do potencial forrageiro de espécies florestais. In: SEMINÁRIO SOBRE SISTEMAS AGROFLORESTAIS NA REGIÃO SUL DO BRASIL, 1., 1994, Colombo. **Anais...** Colombo: Embrapa- CNPF, 1994. p. 147-155.

LI, J.; NARAYANAN, R. M. Integrated spectral and spatial information mining in remote sensing imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, p. 673-685, 2004.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and photo interpretation**. Nova York: John Wiley and Sons, 1994. 750 p.

LILLESAND, T.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. **Remote sensing and image interpretation**. Nova York: John Wiley and Sons, 2014.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 5 ed. São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2008. 348 p.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. Curitiba: M. Roesner, 1968. 350 p.

MACHADO, R. B.; RAMOS NETO, M. B.; HARRIS, M. B.; LOURIVAL, R.; SOUZA AGUIAR, L. M. Análise de lacunas de proteção da biodiversidade no Cerrado-Brasil. In: Congresso Brasileiro de Unidades de Conservação, 4., 2004, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Fundação O Boticário de Proteção à Natureza: Rede Nacional Pró Unidades de Conservação, 2004. p. 29-38.

MAINIERI, C.; CHIMELO, J. P. **Fichas de características das madeiras brasileiras**. São Paulo: IPT, 1989. 418 p.

MENESES, P. R. Princípios de Sensoriamento Remoto. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: UNB/CNPq, 2012. p. 1-33.

MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 2.ed. Viçosa, MG: UFV, 2003. 307 p.

MORELLATO, L. P. C. **Estudo da fenologia de árvores, arbustos e lianas de uma floresta semi-decídua no sudeste do Brasil**. Tese (Doutorado) Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 1991. 176 f.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIERS, C. G.; FONSECA, G. A. B.; JENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853-858, 2000.

NAES, T.; ISAKSSON, T.; FEARN, T.; DAVIES, T. **A user friendly guide to Multivariate Calibration and Classification**. Chichester, UK: NIR Publications, 2002.

NAIDOO, L.; CHO, M. A.; MATHIEU, R.; ASNER, G. Classification of savanna tree species, in the Greater Kruger National Park region, by integrating hyperspectral and LiDAR data in a Random Forest data mining environment. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 69, p. 167-179, 2012.

NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 393-407, 2006.

NEIRO, E. S. **Geotecnologias aplicadas na discriminação de variedades e estimativa de produtividade agroindustrial da cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado). Maringá, PR: UEM, 2013. 160 f.

NOVO, E. M. de M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010. 388 p.

NOVO, E. M. de M.; PONZONI, F. J. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos, SP, 2001. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Evlyn\\_Novo/publication/264870631\\_INTRODUCAO\\_AO\\_SENSORIAMENTO\\_REMOTO/links/5458cae90cf26d5090acf1b1.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Evlyn_Novo/publication/264870631_INTRODUCAO_AO_SENSORIAMENTO_REMOTO/links/5458cae90cf26d5090acf1b1.pdf)>. Acesso em: mar. 2016.

PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTOS, P. E. T.; FERREIRA, C. A. **Eucaliptos indicados para plantio do Estado do Paraná**. Colombo, PR: EMBRAPA Florestas, 2006. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/15427882.pdf>>. Acesso em: mai. 2016.

PAPEŞ, M.; TUPAYACHI, R.; MARTÍNEZ, P.; PETERSON, A. T.; POWELL, G. V. N.. Using hyperspectral satellite imagery for regional inventories: A test with tropical emergent trees in the Amazon Basin. **Journal of Vegetation Science**, v. 21, p. 342-354, 2010.

PARANÁ. Lei Estadual nº 18.295, de 10 de Novembro de 2014. Institui o Programa de Regularização Ambiental. **Diário Oficial**, Curitiba, PR, 10 nov. 2014. Disponível em: <<http://www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/pesquisarAto.do?action=exibir&codAto=132558&codItemAto=807712>>. Acesso em: out. 2015.

PARANÁ; SEMA - SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Série Ecossistemas Paranaenses. Floresta Estacional Semidecidual**. Coord. João Batista Campos e Leverci Silveira Filho. Curitiba: SEMA, v. 5, 2010. Disponível em: <[http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/cobf/V5\\_Floresta\\_Estacional\\_Semidecidual.pdf](http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/cobf/V5_Floresta_Estacional_Semidecidual.pdf)>. Acesso em: mar. 2016.

PIRES, A. S.; FERNANDEZ, F. A. S.; BARROS, C. S. Vivendo em um mundo em pedaços: Efeitos da fragmentação florestal sobre comunidades e populações animais. In: ROCHA, C. F. D.; BERGALLO, H. G.; ALVES, M. A. S.; SLUYS, M. V. **Biologia da Conservação: Essências**. Rio de Janeiro: Ed. RIMA, 2006. p. 231-260.

PORTIGAL, F.; HOLASEK, R.; MOORADIAN, G.; OWENSBY, P.; DICKSON, M.; FENE, M.; ELLIOT, M.; HALL, E.; DRIGGETT, D. Vegetation Classification using red-edge first derivative and green peak statistical moment indices with the Advanced Airborne Hyperspectral Imaging System (AAHIS). In: International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 3., 1997, Copenhagen, Dinamarca. **Anais...** 1997. p. 2593-2610.

PRICE, J. C. Variability of high resolution crop reflectance spectra. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, p. 2593-2610, 1992.

PRIMACK, R. B.; RODRIGUES, E. **Biologia da Conservação**. Londrina: Ed. PLANTA, 2001. 328 p.

REGAZZI, A. J. **Análise multivariada, notas de aula** INF 766, Departamento de Informática da Universidade Federal de Viçosa, v.2, 2000.

RICHTER, R.; SCHLÄPFER, D. **ATCOR-4**. 2012. Atmospheric and Topographic Correction for wide FOV airborne optical scanner data. Disponível em: <<http://www.rese.ch/products/atcor/atcor4/>>. Acesso: mar. 2016.

RIVARD, B.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; FOLEY, S.; CALCO-ALVARADO, J. C. Species classification of tropical tree leaf reflectance and dependence on selection of spectral bands. In: KALACSKA, M.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A (eds.). **Hyperspectral Remote Sensing of Tropical and Sub-Tropical Forests**. CRC Press, 2008. p. 141-159.

ROBERTS, D. A.; USTIN, S. L.; OGUNJEMIYO, S.; GREENBERG, J.; DROBOWSKI, S. Z.; CHEN, J.; HINCKLEY, M. Spectral and structural measures of northwest forest vegetation at leaf to landscape scales. **Ecosystems**, v. 7, p. 545-562, 2004.

RODERJAN, C. V.; GALVÃO, F.; KUNIYOSHI, Y. S.; HATSCHBACH, G. G. As unidades fitogeográficas do Estado do Paraná. **Ciência e Ambiente**, v. 24, p. 75-92, 2002.

RODRIGUES, E. Efeito de bordas em fragmentos de floresta. **Revista Cadernos de Biodiversidade**, v. 1, n. 2, p. 1-6, 1998.

SAKITA, M. N.; VALLILO, M. I. Estudos fitoquímicos preliminares em espécies florestais do Parque Estadual do Morro do Diabo, Estado de São Paulo. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 215-226, 1990.

SALVADOR, J. L. G.; OLIVEIRA, S. B. **Reflorestamento ciliar de açudes**. São Paulo: Cesp, 1989. 14 p.

SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; CASTRO, K.; WRIGHT, S. J.; GAMON, J.; KALACSKA, M.; RIVARD, B.; SCHNITZER, S. A.; FENG, J. L. 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, p. 2076-2088. 2009.

SEAB - SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO; DERAL - DEPARTAMENTO DE ECONOMIA RURAL. **Produtos Florestais – Março de 2014**. 2014. Disponível em: <[http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/produtos\\_florestais\\_2013\\_14.pdf](http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/produtos_florestais_2013_14.pdf)>. Acesso em: jul. 2016.

SILVA JUNIOR, C. A. **Estimativa e discriminação de áreas de soja [*Glycine max* L.] no estado do Paraná com dados mono e multitemporais do sensor MODIS**. Dissertação (Mestrado). Maringá, PR: UEM, 2014.

SILVA JUNIOR, C. A. **Caracterização e discriminação de variedades de soja (*Glycine max* L.) por meio de comportamento hiperespectral, multiespectral, índices de vegetação e colorimetria**. Tese (Doutorado). Maringá, PR: UEM, 2016.



SILVA, H. D. **Biomassa e aspectos nutricionais de cinco espécies de *Eucalyptus*, plantadas em solo de baixa fertilidade**. Dissertação (Mestrado). Piracicaba, SP: ESALQ-USP, 1983.

SILVA, V. L. **Flora da Floresta Estacional Semidecidual**. 2016. Fotografias. Coleção particular.

SIQUEIRA, A. C. M. F.; NOGUEIRA, J. C. B. Essências brasileiras e sua conservação genética no Instituto Florestal de São Paulo. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 4, p. 1187, 1992. Edição de Anais do 2º Congresso Nacional sobre Essências Nativas, São Paulo, SP, mar. 1992.

SICAR - SISTEMA NACIONAL DE CADASTRO AMBIENTAL RURAL. **Consulta pública**. 2016. Disponível em: <<http://www.car.gov.br/publico/imoveis/index>>. Acesso em: jul. 2016.

SLATER, P. N. **Remote sensing optics and optical systems**. EUA: Addison-Wesley Publishing Co., Inc, 1980. 575 p.

SOARES-SILVA, L. H.; BIANCHINI, E. P.; FONSECA, E. P.; DIAS, M. C.; MEDRI, M. E.; ZANGARO FILHO, W. Composição florística e fitossociologia do componente arbóreo das florestas ciliares da Bacia do Rio Tibagi. 1. Fazenda Doralice – Ibiporã, PR. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 4, p. 199-206, 1992.

SOUZA, J. S. **Correção atmosférica em imagens hiperespectrais: avaliação de diferentes metodologias em condições tropicais**. Dissertação (Mestrado). Maringá, PR: UEM, 2017.

SPECIM – SPECTRAL IMAGING, INC. **CaligEO Pro**. Versão 2.2. 2013. Disponível em: <<http://www.specim.fi/>>. Acesso em: mar. 2016.

SPECIM, 2017. SPECIM – Spectral Imaging, Ltd. **AisaFENIX**. Finlândia, 2017. Disponível em: <<http://www.specim.fi/products/aisafenix-hyperspectral-sensor/>>. Acesso em: jan. 2017.

TABARELLI, M. Flora da floresta estacional baixo-montana no Município de Santa Maria – RS, Brasil. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 4, p. 260-268, 1992. Edição de Anais do 2º Congresso Nacional sobre Essências Nativas, São Paulo, SP, mar. 1992.

THENKABAIL, P. S.; ENCLONA, E. A.; ASHTON, M. S.; LEGG, C.; DE DIEU, M. J. Hyperion, IKONOS, ALI, and ETM+ sensors in the study of African rainforests. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 23-43, 2004.

THOMAS, C. D.; CAMERON, A.; GREEN, R. E.; BAKKENES, M.; BEAUMONT, L. J.; COLLINGHAM, Y. C. Extinction risk from climate change. **Nature**, v. 427, p. 145-148, 2004.

TOMZHINSKI, G. W. T.; COURA, P. H. F.; FERNANDES, M. do C. Avaliação da detecção de focos de calor por sensoriamento remoto para o Parque Nacional do Itatiaia. **Biodiversidade Brasileira**, n. 2, p. 201-211, 2011.

TOREZAN, J. M. D. Conservação de habitats fragmentados: o urgente e o oportuno. In: MILANO, M. S. (Org.). **Unidades de Conservação; atualidades e tendências**. Curitiba: Fundação O Boticário de Proteção à Natureza, 2007. p. 68-76.

TRALLI, D. M.; BLOM, R. G.; ZLOTNICKI, V.; DONNELLAN, A.; EVANS, D. L. Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 59, p. 185-198, 2005.  
TUME - TESTE DE USO MÚLTIPLO DE *EUCALYPTUS*. *Eucalyptus*. São Paulo: Departamento de Ciências Florestais - ESALQ/USP, 2003.

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

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1991. 123 p.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote sensing of environment**, v. 86, p. 370-384, 2003.

WOLD, S. Principal Component Analysis: Tutorial. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 2, p. 37-52, 1987.

ZHANG, C.; KOVACS, J. M.; LIU, Y.; FLORES-VERDUGO, F.; FLORES-DE-SANTIAGO, F. Separating mangrove species and conditions using laboratory hyperspectral data: A case study of a degraded mangrove forest of the Mexican Pacific. **Remote Sensing**, v. 6, p. 11673-11688, 2014..

## APÊNDICE

Caracterização (taxonômica, botânica, distribuição, ecologia e potencial valor econômico) das espécies nativas utilizadas no presente estudo.

Essa descrição possui o intuito de apresentar a importância, em diversas escalas, das espécies nativas, assim como seu potencial uso madeireiro e /ou medicinal, implicando em ameaças para a conservação das mesmas e justificando, assim, seu monitoramento.

### **capixingui**

**Divisão:** Magnoliophyta (Angiospermae)

**Classe:** Dicotyledoneae

**Ordem:** Euphorbiales

**Família:** Euphorbiaceae

**Espécie:** *Croton floribundus* Spreng.

Também conhecida por lixeira, capoeira-preta, tapixingui, entre outros, o capixingui é um grande arbusto, semicaducifólio, monóico, pioneiro, comum em vegetação secundária, capoeiras e capoeirões (COSTA e MANTOVANI, 1992). Espécie típica da vegetação secundária da FES, nas formações Aluvial, Submonta e Montana, encontrada em diversos estados do Brasil, com destaque aos estados de MG, SP e PR. Desenvolve-se principalmente em solos férteis, de boa drenagem, com textura variando de areno-argilosa a argilosa (CARVALHO, 2003).

O capixingui (Figura 1A) apresenta tronco reto, cilíndrico e curto, com fuste de até 6 m de comprimento. Casca externa de coloração cinzento-escura, lisa quando jovem e áspera quando adulta. Suas folhas são simples, alternas, com estípulas. Seu limbo é ovado ou elíptico a lanceolado, com 8 a 12cm de comprimento por 5 a 6cm de largura. A base das folhas é codiforme ou obtusa, seu ápice é agudo, possui face superior brilhante, variando de verde-escura quando nova a vermelha e alaranjada quando velha. Antes de cair, as folhas apresentam face inferior branca, com pêlos estrelados, ambos os lados bem ásperos, lembrando uma lixa (CARVALHO, 2003).



**Figura 1A.** *Croton floribundus* Spreng.– capixingui: (1) árvore; (2) tronco; (3) folhas face adaxial; (4) folhas face abaxial.

**Fonte:** Silva, 2016; Campos, 2016.

Suas flores são amareladas, reunidas em inflorescências de até 30cm de comprimento, ocorrendo de fevereiro a março no Paraná. Seus frutos são cápsulas secas esquizocarpos, tricoca, com deiscência explosiva, contendo três sementes arredondadas, albuminosa e coriáceas, medindo em média 4mm de comprimento por 4mm de largura, amadurecendo de fevereiro a março no Paraná, sendo dispersa por formigas e aves granívoras (KUHLMANN e KUHN, 1947).

Sua madeira tem uso restrito devido à cor clara e baixa resistência mecânica, sendo indicada para caixotaria leve, tábuas para revestimento interno, artefatos de madeira, bem como para fabricação de fósforos. Além disso, é utilizado na medicina popular devido a presença de taninos, cumarinas e saponinas em diferentes partes da planta (SAKITA e VALLILO, 1990), sendo recomendada desde adstringente externo a limpeza de feridas a úlceras na medicina veterinária (BRANDÃO, 1991).

**cedro**

**Divisão:** Magnoliophyta (Angiospermae)

**Classe:** Dicotyledoneae

**Ordem:** Sapindales

**Família:** Meliaceae

**Espécie:** *Cedrela fissilis* Vell.

Comumente chamada por cedrinho, capiúva, acajatinga, cedro-rosa, entre outros, é uma árvore caducifólia, hermafrodita ou monóica, podendo ser espécie secundária inicial, secundária tardia, clímax e clímax exigente de luz. Encontrada de maneira geral desde a

Floresta Amazônica do Pará (Ombrófila Densa) até nas Florestas com Araucárias (Ombrófila Mista). Ocorre de forma natural na Costa Rica, Panamá, Argentina, Bolívia, Colômbia, Equador, Peru, Uruguai, Venezuela e em diversos estados do Brasil, principalmente no centro, leste e sul, preferencialmente em solos profundos e úmidos com textura argilosa a areno-argilosa (CARVALHO, 2003).

Esta árvore (Figura 2A) pode atingir de 10 a 40m de altura e 40 a 300cm de DAP (diâmetro a altura do peito). Possui tronco cilíndrico, reto ou pouco tortuoso e fuste de até 15m comprimento. Sua casca pode ter espessura de até 40mm variando de marrom a pardo-acinzentada, com fissuras longitudinais e profundas.

Suas folhas são compostas, paripinadas, geralmente com 25 a 45cm, podendo atingir até 140cm, polimorfas, com 8 a 30 pares de folíolos de 6,5 a 24cm de comprimento por 2 a 6,5cm de largura, oblongo-lanceolados a ovado-lanceolados, com base subaguda a cordada, simétrica ou levemente oblíqua (CARVALHO, 2003).



**Figura 2A.** *Cedrela fissilis* Vell.– cedro: (1) árvore; (2) tronco; (3) folha composta.

**Fonte:** Silva, 2016; Campos, 2016.

Suas flores têm pétalas esverdeado-brancas, às vezes rosadas no ápice, com 12mm de comprimento, reunidas em tirso axilares de até 30cm em média, ocorrendo de setembro a janeiro no Paraná. O fruto é uma cápsula piriforme deiscente e contém de 30 a 100 sementes viáveis, que amadurecem de julho a agosto no Paraná. Sua dispersão ocorre com o vento e com a queda do fruto no solo (ALCÂNTARA et al., 1997).

Entre as madeiras leves, o cedro é a que possibilita o uso mais diversificado possível, facilmente trabalhável com instrumentos manuais ou mecânicos, apresenta boa retenção de pregos e parafusos e excelente absorção de pigmentos e polimento. É utilizada na construção

civil, construção naval, acabamentos internos, móveis, instrumentos musicais, entre outros. Sua casca é utilizada na medicina popular, como tônico para pessoas enfraquecidas, adstringente, combate a febre, disenterias e artrite (FRANCO e FONTANA, 1997).

**embaúba-branca**

**Divisão:** Magnoliophyta (Angiospermae)

**Classe:** Dicotyledoneae

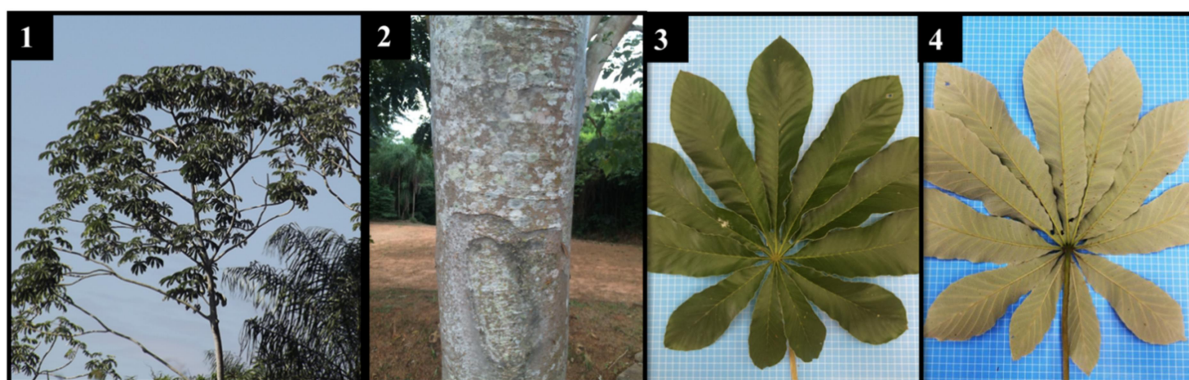
**Ordem:** Rosales

**Família:** Cecropiaceae

**Espécie:** *Cecropia pachystachya* Trécul

Embaúba, embaúva, umbaúba, ambaíba ou árvore-da-preguiça (Figura 3A) é uma árvore que atinge de 4 a 7m de altura, DAP de 15 a 25cm. É uma planta pioneira, apresentando rusticidade e rápido crescimento, bastante utilizada em processos iniciais de restauração (LORENZI, 2008).

É amplamente encontrada na América Latina. No Brasil, estende-se desde o CE até SC, sendo característica da Mata Atlântica, preferencialmente de áreas úmidas. Suas folhas têm cerca de 30cm de diâmetro, são peltadas, divididas em 9-10 lóbulos separados até o pecíolo por espaços de 2 a 3cm, sendo que o maior mede 40-43cm e o menor de 16 a 18cm. A face superior é áspera e, a inferior nítida tomentosa de coloração branco-prateada.



**Figura 3A.** *Cecropia pachystachya* Trécul – embaúba-branca: (1) árvore; (2) tronco; (3) folha face adaxial; (4) folha face abaxial.

**Fonte:** Silva, 2016; Campos, 2016.

As folhas são muito apreciadas pelo bicho-preguiça e os frutos pelas aves. Uma característica marcante é o fato de apresentarem simbiose com formigas, especialmente do gênero *Azteca*, que habitam seu tronco oco, protegendo-a de herbívoros (IAP, 2016).

**espeteiro**

**Divisão:** Magnoliophyta (Angiospermae)

**Classe:** Dicotyledoneae

**Ordem:** Malpighiales

**Família:** Salicaceae

**Espécie:** *Casearia gossypiosperma* Briq.

Segundo CNCFlora (2012), *C. gossypiosperma* é uma espécie de ampla distribuição na América do Sul, entre os países Peru, Bolívia, Paraguai, Uruguai, Argentina e Brasil. Em nosso país ocorre nos domínios Fitogeográficos da Amazônia, Mata Atlântica e Cerrado, nos estados do PA, AM, AC, RO, BA, MT, MS, GO, MG, SP, RJ e PR. Desenvolve-se preferencialmente no interior da floresta primária densa.

A espécie é conhecida vulgarmente como: laranjinha e caferana (AC), amarelinho, pau-de-espeto, vidro, espeteiro, guassatonga e vassatonga (SP e PR), espeto-vidro e fruta-de-jacu (MG) e sardinheira-branca, behti (RO).

As árvores ou arvoretas são hermafroditas e decíduas. As folhas são simples, alternas, dísticas, apresentam margem serrada e base da folha inequilátera. É diferenciada de *C. luetzelburgii* Sleumer através da folha serrada com o ápice acuminado e maior tamanho, estípulas oblongo-alongadas e sem glândulas e pelas sementes sem apículo (Figura 4A). Sua floração e frutificação ocorrem de abril a novembro e setembro a novembro, respectivamente.

A madeira é utilizada na construção civil, na confecção de móveis, brinquedos e caixotaria. E as cascas e folhas apresentam propriedades medicinais



**Figura 4A.** *Casearia gossypiosperma* Briq. - espeteiro: (1) árvore; (2) tronco; (3) ramo; (4) folha.

Fonte: Silva, 2016; Campos, 2016.

**guaritá**

**Divisão:** Magnoliophyta (Angiospermae)

**Classe:** Dicotiledoneae

**Ordem:** Sapindales

**Família:** Anacardiaceae

**Espécie:** *Astronium graveolens* Jacq.

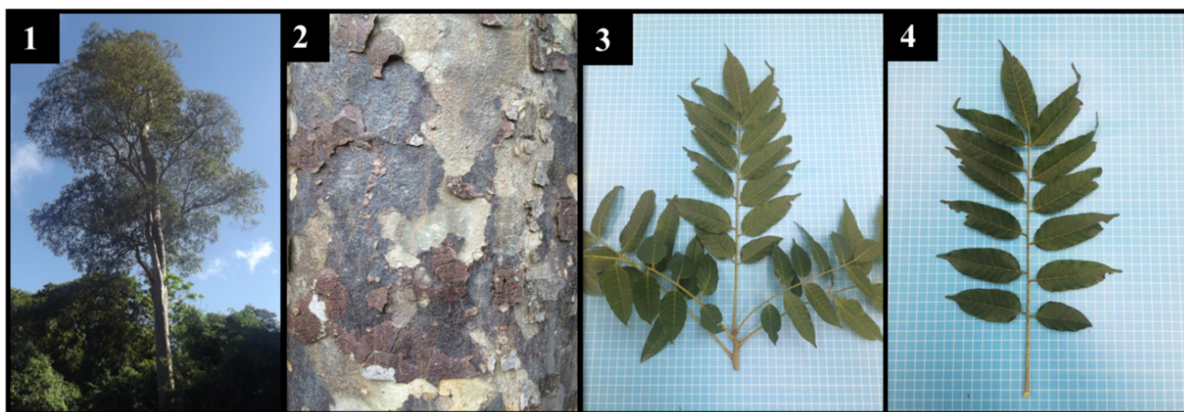
O guaritá é também conhecido por aroeira no Paraná e quebra-machado, em Minas Gerais, devido à sua madeira bastante densa, podendo apresentar massa específica aparente de  $0,97 \text{ g.cm}^{-3}$  a 15% de umidade (MAINIERI e CHIMÉLO, 1989). Pode ser secundária inicial a secundária tardia, ocorrendo com frequência baixa, no interior da floresta. Espécie característica da FES, formação Submontana, ocupando o estrato emergente (SOARES-SILVA et al., 1992). Também pode ser encontrada na Floresta Ombrófila Densa (Floresta Atlântica), na formação das Terras Baixas ou Floresta Pluvial de Tabuleiro, na restinga e no Cerradão (CARVALHO, 2003).

Ocorre naturalmente em diversos estados do centro e sul do Brasil, com destaque para o norte do Paraná e São Paulo, e em algumas regiões mais isoladas no nordeste, na Paraíba e na Bahia. Guaritá está na lista de espécies para conservação genética no Estado de São Paulo e corre risco de extinção (SIQUEIRA e NOGUEIRA, 1992).

Pode atingir de 10 a 30m de altura e 40 a 100cm de DAP, com tronco reto e sapopemas na base do tronco. Sua casca externa é fina e lisa, de coloração cinza-azulada (Figura 5A). Suas folhas são compostas, imparipinadas, com pecíolo de 13 a 15cm e 4 a 7 pares de folíolos glabros, obliquamente ovados-oblongos, acuminados ou agudos, fino-



denteados e de tamanhos desiguais. As margens do folíolos são crenadas ou serradas, com nervuras bem desenvolvidas, esbranquiçadas e salientes no lado inferior. Apresentam cheiro característico de manga devido à presença de terebintina (CARVALHO, 2003).



**Figura 5A.** *Astronium graveolens* Jacq. - guaritá: (1) árvore; (2) tronco; (3) ramo; (4) folha composta.

**Fonte:** Silva, 2016; Campos, 2016.

As flores são vermelhas ou rosas, em panículas axilares que ocorrem de junho a outubro (MORELLATO, 1991). Os frutos são bagas fusiformes com endocarpo suavemente delicado, com superfície lisa, amadurecendo de setembro a novembro no centro-sul do Brasil. Sua dispersão de frutos e sementes é anemocórica, raramente ocorrendo por vento (CARVALHO, 2003).

Sua madeira apresenta grande durabilidade e densidade, é utilizada em acabamentos internos, construções externas, dormentes, mourões, postes, esquadrias, cruzetas, carrocerias, peças torneadas, entre outros. O guaritá também pode ser empregado com fim de pomar apícola devido a suas flores melíferas (SALVADOR e OLIVEIRA, 1989).

### **ipê-roxo**

**Divisão:** Magnoliophyta (Angiospermae)

**Classe:** Dicotyledoneae

**Ordem:** Scrophulariales

**Família:** Bignoniaceae

**Espécie:** *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos sinonímia *Tabebuia heptaphylla* (Vell.) Toledo

O ipê-roxo, também conhecido popularmente por cabroé, ipê, pau-d'arco, entre outros, é uma árvore caducifólia, secundária tardia, longeva, podendo atingir 800 anos de idade, comum em capoeiras e capoeirões. Espécie característica da FES, nas formações Submontana, da Estacional Decidual, na Bacia do Rio Uruguai, nas formações Montana e Baixo- Montana, da Ombrófila Mista e Densa, da Caatinga Arbórea e da Savana Estépica.

Ipê-roxo ocorre naturalmente em vários tipos de solos, em relevos planos a pouco ondulados no Uruguai, Bolívia e em diversos estados brasileiros, com destaque para o RS e SC (TABARELLI, 1992; CARVALHO, 2003).

Pode atingir de 8 a 35m de altura e 30 a 250cm de DAP, com tronco cilíndrico, reto a levemente tortuoso e fuste com até 18m de altura (Figura 6A). Sua casca tem até 40mm de espessura, externamente grisácea a pardo-escuro, rugosa, com fissuras longitudinais profundas e espaçadas. Tem folhas opostas, digitadas, compostas por 5 a 7 folíolos obovados, serreados, glabros, medindo 3 a 10cm de comprimento por 2 a 6cm de largura (CARVALHO, 2003).



**Figura 6A.** *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos sinonímia *Tabebuia heptaphylla* (Vell.) Toledo – ipê-roxo: (1) árvore; (2) tronco; (3) ramo; (4) folha composta.

**Fonte:** Silva, 2016; Campos, 2016.

As flores variam de roxo a rosa, medem 5 a 8cm de comprimento, são reunidas em tirso curto muti-floral, terminal, ocorrendo de abril a setembro no Paraná, sendo que suas flores aparecem antes das folhas. Os frutos são cápsulas lineares de coloração bege, ficando quase pretas após a deiscência das sementes, podem atingir 20 a 35cm de comprimento e 1,5cm de largura. Seus frutos podem conter até 192 sementes aladas, com até 20mm de comprimento e 7mm de largura, amadurecendo de julho a agosto no Paraná. É uma planta hermafrodita e apresenta auto-incompatibilidade (BITTENCOURT e SEMIR, 2000; CARVALHO, 2003).

Apresenta madeira densa, com maleabilidade e resistência grandes. Pode ser aplicada a construção civil e naval, carpintaria, marcenaria, tacos e assoalhos, dormentes, mourões, entre outros. O ipê-roxo também é utilizado para tingir algodão e seda com o corante que é extraído da sua casca, sua forragem também pode ser utilizada na alimentação animal, podendo atingir 21% de proteína bruta e 8,8% de tanino. Esta espécie é também muito utilizada na medicina popular, no tratamento de gripes e úlceras, é depurativo do sangue, tem propriedades anticancerígenas, anti-reumáticas e antianêmicas, dentre outras (LEME et. al., 1994; CONCEIÇÃO e PAULA, 1986; BERG, 1986)

### **jequitibá**

**Divisão:** Magnoliophyta (Angiospermae)

**Classe:** Dicotyledoneae

**Ordem:** Lecythidales

**Família:** Lecythidaceae

**Espécie:** *Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze

Também conhecido por binga-de-macaco, coatinga, estopeira, entre outros, o jequitibá-branco é uma árvore semicaducifólia, secundária tardia ou clímax exigente de luz, ocorrendo em capoeirões e na floresta secundária. É uma espécie longeva, característica da Floresta Ombrófila Densa (Amazônica e Atlântica), nas formações das Terras Baixas e Submontana e na Floresta de Tabueliero. Também ocorre na FES, nas formações Submontana e Montana. Pode ser encontrada de forma natural na Bolívia, Paraguai, Peru e em diversos estados do Brasil, com destaque para o Estado de SP, sul de MG e PR (CARVALHO, 2003).

Pode atingir 15 a 50m de altura e 50 a 215cm de DAP, com tronco reto, cilíndrico, colunar e fuste de até 25m de altura (Figura 7A). Sua casca tem espessura de até 20mm, externamente cinza-clara a marrom-escura, rugosa, com numerosos sulcos não muito profundos. Tem folhas simples, oblongo-elípticas a lanceoladas, com lâmina do limbo de 5 a 15cm de comprimento por 1,5 a 6cm de largura, as margens são serreadas, ápice acuminado com acúmen de 2 a 5mm de comprimento, levemente curvo, com base cuneada, que se une ao pecíolo com 5 a 13mm de comprimento, de cor avermelhada quando nova (CARVALHO, 2003).



**Figura 7A.** *Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze - jequitibá: (1) árvore; (2) tronco; (3) ramo; (4) folha.

Fonte: Silva, 2016; Campos, 2016.

Jequitibá é uma árvore hermafrodita com flores pequenas, branco-creme, reunidas em racemos axilares solitários, de 3 a 6cm de comprimento, com 5 a 15 flores inseridas nas axilas das folhas, ocorrem de outubro a janeiro no Paraná e são polinizadas por abelhas e diversos insetos pequenos (KUHLMANN e KUHN, 1947; MORELLATO, 1991). Apresenta fruto pixídio fibroso (em forma de urna inviolável), cilíndrico-oblongo, lenhoso, de cor parda com 5 a 11cm de comprimento e 3 a 4cm de diâmetro. Cada fruto contém 20 a 35 sementes de cor castanha, (BELTRATI et al., 1982). Os frutos do jequitibá amadurecem de agosto a outubro no Paraná e tem dispersão anemocórica, porém são os macacos que retiram o opérculo (tampa) do fruto, facilitando a dispersão das sementes pelo vento (BUSTAMANTE, 1948).

Sua madeira é moderadamente densa com baixa resistência natural ao apodrecimento, sendo utilizada para estruturas de móveis, molduras e guarnições internas, peças torneadas, cabos de ferramentas, fósforos, vigas para construção civil, esquadrias, entre outros. É também utilizada na medicina popular, sendo o chá de sua casca um poderoso adstringente e desinfetante, recomendada para inflamações das mucosas e faringite (CORREA, 1969).

### **pau-d'alho**

**Divisão:** Magnoliophyta (Angiospermae)

**Classe:** Dicotyledoneae

**Ordem:** Caryophyllales

**Família:** Phytolaccaceae

**Espécie:** *Gallesia integrifolia* (Sprengel) Harms

Pau-d’alho, também conhecido como catinga-de-gambá, pau-fedorento, entre outros, é uma árvore perenifólia, hermafrodita, característica da FES, na formação Submontana, onde ocupa o estrato emergente da floresta (MAACK, 1968). Também encontrada na Floresta Estacional Semidecidual Aluvial e na Floresta Ombrófila Densa, o pau-d’alho assim como a peroba-rosa eram as responsáveis pela fisionomia da floresta do norte do PR (KLEIN, 1985). Sua posição nos grupos ecológicos passa desde espécie pioneira até secundária tardia, particularmente frequente na planície aluvial e no início de encostas situadas em solos férteis. Fora do Brasil o pau-d’alho é encontrado apenas na Bolívia (KILLEAN et al., 1993).

Pode atingir de 5 a 30m de altura e 40 a 100cm de DAP, com tronco reto, tortuoso ou inclinado (Figura 8A). Sua casca externa é acinzentada a castanho-parda, lisa e levemente descamante. Suas folhas são simples, espiraladas, alternas, de consistência coriácea, lâminas ovadas a elípticas, com ápice acuminado, mucronulados e bases largas e agudas, nervos medianos espessados, com 8 a 18cm de comprimento e 4 a 10cm de largura. Quando maceradas, suas folhas exalam forte e característico odor de alho (CARVALHO, 2003).



**Figura 8A.** *Galesia integrifolia* (Sprengel) Harms – pau-d’alho: (1) árvore; (2) tronco; (3) ramo.

**Fonte:** Silva, 2016; Campos, 2016.

Apresenta flores pequenas e de coloração bege, ocorrendo de abril a junho no Paraná. Seus frutos são do tipo sâmara, com 2 a 4cm de comprimento, achatados e de cor amarelo-esverdeado, amadurecendo em setembro no estado do Paraná. Suas sementes tem forma orbicular a oboval-orbicular, de 6 a 7mm de comprimento por 5 a 6mm de largura, sendo dispersos pelo vento (CARVALHO, 2003)..

Sua madeira é de uso restrito, tendo aplicação generalizada em construções rústicas, caixotaria, forro e revestimento, sarrafos e tábuas em construções temporárias, embalagens leves, cangas para bois e artefatos semelhantes. (CARVALHO, 2003).

**peroba-rosa**

**Divisão:** Magnoliophyta (Angiospermae)

**Classe:** Dicotyledoneae

**Ordem:** Gentianales

**Família:** Apocynaceae

**Espécie:** *Aspidosperma polyneuron* Müller Argoviensis

A peroba-rosa, também conhecida como amargoso, guatambu-amarelo, pau-caboclo, entre outros, é uma árvore perenifólia, hermafrodita, secundária tardia ou clímax, sendo característica da Floresta Estacional Semidecidual (VELOSO et al., 1991), também encontrada na Floresta Estacional Decidual, Ombrófila Densa, Ombrófila Mista, esporadicamente na Caatinga, Pantanal Mato-Grossense e nas matas de tabuleiro.

Ocorre de forma natural no extremo nordeste da Argentina, norte da Colômbia, norte e leste do Paraguai, Peru, Noroeste e norte da Venezuela e no Brasil, sendo o PR e SP os estados brasileiros de maior ocorrência da espécie.

No noroeste do PR, em solos provenientes do Arenito Caiuá, a espécie representava 30 a 60% da cobertura do estrato emergente (LEITE et al., 1986), já em florestas situadas em solos de terra roxa constituiu de 60 a 80% da cobertura do estrato emergente (KLEIN, 1985).

Pode atingir de 15 a 50m de altura e 50 a 390cm de DAP, com tronco cilíndrico, reto ou levemente tortuoso, casca grossa e profundamente fissurada longitudinalmente (Figura 9A). Sua casca interna quando raspada apresenta coloração rosa intenso e a parte viva amarelada. Suas folhas são variadas quanto à forma, de oblongas a obovado-elíptico, são folhas simples e alternas, podendo apresentar a face superior lustrosa e ápice arredondado; são firmemente membráceas ou subcoriáceas com nervuras secundárias muito apertadas e paralelas, podendo atingir 8cm de comprimento e 3cm de largura.



**Figura 9A.** *Aspidosperma polyneuron* Müll.Arg. – peroba-rosa: (1) copa; (2) tronco; (3) ramo; (4) folhas.

**Fonte:** Silva, 2016; Campos, 2016.

Suas flores são numerosas e podem variar de branco-amareladas a creme, com florescimento ocorrendo de novembro a dezembro no Paraná. Os frutos são folículos deiscentes de forma elipsóide geralmente achatados, com sementes elípticas, dispersas pelo vento (CARVALHO, 2003).

A peroba também é muito conhecida pelas características de sua madeira, muito utilizada em construção civil e na indústria de móveis devido a sua resistência mecânica e retratibilidade média, por esse motivo, dentre o gênero *Aspidosperma*, é a de maior valor econômico. Atualmente a madeira da peroba usada no Brasil é importada do Paraguai, onde ainda é abundante, porém pouco utilizada (CARVALHO, 2003).