

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

RAFAEL MORENO CAMPOS

Discriminação de espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual
utilizando dados hiperespectrais

Maringá

2017

RAFAEL MORENO CAMPOS

Discriminação de espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual
utilizando dados hiperespectrais

Tese 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 Doutor 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, Rafael Moreno
Discriminação de espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual utilizando dados hiperespectrais / Rafael Moreno Campos. -- Maringá, 2017.

81 f. : il. color., figs., tabs.

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

1. Estação Ecológica do Caiuá - Espectroscopia de imageamento - Discriminação arbórea. 2. AisaFENIX. 3. Sensoriamento remoto. 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

RAFAEL MORENO CAMPOS

**DISCRIMINAÇÃO DE ESPÉCIES ARBÓREAS NATIVAS DA FLORESTA
ESTACIONAL SEMIDECIDUAL UTILIZANDO DADOS HIPERESPECTRAIS**

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

APROVADA em 23 de junho de 2017.

Prof. Dr. **Marcelo Augusto Batista**
Presidente



Prof.^a. Dr.^a. **Aline Marques Genú**
(vídeo conferência)
Membro

Aline Marques Genú

Prof. Dr. **Hugo Zeni Neto**
Membro



Prof. Dr. **Marcelo Luiz Chicati**
Membro

Marcelo Luiz Chicati

Prof. Dr. **Rafael Zampar**
Membro

Zampar

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha irmã.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer imensamente à minha família, que sempre me apoiou, sobretudo nos momentos mais difíceis, principalmente à minha irmã, amiga, parceira de vida, Mestre Taiana Loan de Lima Campos, que me ajudou em todas as etapas deste caminho. Ao meu pai e grande amigo Dr. João Batista Campos, pelo incondicional apoio e dedicação e por toda orientação em minha vida profissional, inclusive nesta grande etapa e à minha mãe, grande parceira de aventuras, Ana Maria de Lima Campos, pelos ensinamentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni, por toda ajuda durante o processo de estudo.

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá, pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Aos amigos do Grupo Aplicado ao Levantamento e Especialização dos Solos (GALeS), em especial, Aline e Jéssica, por sua ajuda neste trabalho.

Agradeço, também, ao Instituto Ambiental do Paraná, pelo apoio à pesquisa, assim como a fabulosa equipe da Estação Ecológica do Caiuá, pelo zelo e carinho com que fui recebido. Em especial ao Valdir Leite da Silva, pelos ensinamentos, esforços nas coletas e identificação das espécies arbóreas nativas.

Aos Professores do Programa de Pós-graduação em Agronomia, pelos preciosos ensinamentos.

Aos amigos e colegas, pela compreensão e incentivos e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho.

Discriminação de espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual utilizando dados hiperespectrais

RESUMO

A vegetação natural é considerada um dos mais importantes indicadores das condições ambientais de uma região. Suas relações com o meio físico e outros componentes biológicos contribuem para o equilíbrio ecossistêmico e sua mensuração, em termos quantitativos e qualitativos, é indispensável para quaisquer projetos de planejamento do uso do solo e conservação da natureza. O sensoriamento remoto vem sendo largamente aplicado no monitoramento da cobertura vegetal, principalmente, em relação à distribuição espacial e comportamento fisiológico. A vegetação é um importante elemento dos ecossistemas, assim, seus estudos ganham ênfase, sobretudo, por buscarem conhecimentos acerca de suas variações, padrões de distribuição, ciclos temporais, modificações fisiológicas e morfológicas. Para compreender os aspectos da reflectância da vegetação e os desafios envolvidos em sua classificação, há a necessidade de entender o processo de interação entre a Radiação Eletromagnética (REM) e os diversos tipos de coberturas vegetais. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo discriminar de sete a nove espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual (FES), localizada na Estação Ecológica do Caiuá (EEC), município de Diamante do Norte – PR, Brasil, por meio de dados hiperespectrais de reflectância de folhas, obtidos com espectrorradiômetro portátil ASD FieldSpec®3 Jr (450 a 2.450 nm), acoplado ao acessório *Plant Probe* e também por meio de imagens geradas pelo sensor hiperespectral aerotransportado AisaFENIX-SPECIM (453nm a 2.396nm) (escala de *pixel*). Para tanto, foram coletadas 794 amostras foliares de sete espécies e 2.511 curvas de reflectância de *pixels* de nove espécies (às sete espécies anteriores foram acrescentadas duas), que tiveram suas localizações georreferenciadas por meio de GPS (precisão $\leq 0,5\text{m}$). Para a discriminação das espécies, dois métodos estatísticos foram empregados: análise de componentes principais (PCA) seguida de análise discriminante quadrática (QDA) e análise discriminante linear (LDA) após seleção de variáveis utilizando o procedimento STEPDISC (SAS). A discriminação das espécies em escala de folha apresentou precisão global de 85,35% e 100%, utilizando o primeiro e o segundo método, respectivamente. Para a classificação em escala de *pixel*, a porcentagem de discriminação global foi de 34,25 e 62,35, para o primeiro e segundo método, respectivamente. Apesar da menor acurácia na discriminação em escala de *pixel*, considera-se o resultado satisfatório, visto que o processo

mais simples da interação da REM com a folha sofre distorções por potenciais encontros com uma infinidade de folhas, adicional vegetativo e componentes não vegetativos do ambiente (solo, matéria orgânica, umidade atmosférica, etc.). Portanto, conclui-se que é possível utilizar dados hiperespectrais na discriminação de espécies arbóreas nativas da FES em escala de folha e *pixel*, sendo o método STEPDISC-LDA mais preciso, quando comparado ao PCA-QDA.

Palavras-chave: Espectroscopia de imageamento. Discriminação arbórea. Estação Ecológica do Caiuá. AisaFENIX.

Native tree species discrimination in the Semideciduous Forest using hyperspectral data

ABSTRACT

The natural vegetation is considered one of the most important indicators of the environmental conditions of a region. Its relationships with the physical environment and other biological components contributes to the ecosystem balance and its measurement, in qualitative and quantitative terms, is essential for planning projects about the land use and nature conservation. The remote sensing has been widely applied in the monitoring of vegetation cover, mainly in relation to spatial distribution and physiological behavior. Being the vegetation an important element of the ecosystems, their studies gain emphasis above all to seek knowledge about their variations, distribution patterns, temporal cycles, physiological and morphological changes. To comprehend the aspects of vegetation reflectance and the challenges involved in their classification, there is a need to understand the process of interaction between electromagnetic radiation (EMR) and the various types of vegetation cover. In this respect, the objective of this work was to discriminate seven to nine native tree species of the Seasonal Semideciduous Forest (SSF) located at the Caiuá Ecological Station, Diamante do Norte - PR, Brazil, through hyperspectral reflectance data of leaves, obtained with a portable spectroradiometer FieldSpec®3 Jr ASD (450 to 2450 nm) coupled to the Plant Probe accessory and also through images generated by the airborne hyperspectral sensor AisaFENIX-SPECIM (453 nm to 2,396 nm) (pixel scale). For this, 794 leaf samples of seven species were collected and, 2,511 pixels reflectance data from nine species (the seven previous ones added two) that had their locations georeferenced by means of GPS (precision $\leq 0.5\text{m}$). Two statistical methods were used to discriminate the species: principal component analysis (PCA) followed by quadratic discriminate analysis (QDA) and linear discriminant analysis (LDA) after variable selection using the STEPDISC (SAS) procedure. The discrimination of leaf scale showed global accuracy of 85.35% and 100%, using the first and second method, respectively. For pixel-scale classification, the overall discrimination percentage was 34.23 and 62.35 for PCA-QDA and STEPDISC-LDA, respectively. In spite of the less accuracy in the discrimination in pixel scale, the result is considered satisfactory, since the simpler process of the interaction between EMR and leaf is distorted by potential encounters with an infinity of leaves, additional vegetative and non-vegetative components of the ambient (soil, organic matter, atmospheric humid, etc.) among others. Therefore, it is

concluded that it is possible to use hyperspectral data in the discrimination of native tree species of SSF in leaf and pixel scale, and the STEPDISC-LDA method is more precise when compared to PCA-QDA.

Keywords: Imaging spectroscopy. Tree discrimination. Caiuá Ecological Station. AisaFENIX.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tipos de vegetação existentes na Estação Ecológica do Caiuá	21
Tabela 2. Especificações do sensor hiperespectral AisaFENIX (SPECIM).....	26
Tabela 3. Especificações das imagens hiperespectrais utilizadas no presente estudo, coletadas com o sensor AisaFENIX (SPECIM) no dia 01/05/2016	28
Tabela 4. Espécies, quantidade de indivíduos e total de amostras de folhas coletadas na Estação Ecológica do Caiuá, Diamante do Norte, PR, Brasil.....	34
Tabela 5. Valores de reflectância máximo e mínimo (%) de folhas das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual, coletadas na Estação Ecológica do Caiuá.....	36
Tabela 6. Resultados da fase de treinamento da análise discriminante quadrática de dados de reflectância de folhas das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual, realizada a partir de cinco componentes principais	41
Tabela 7. Resultados da validação externa da análise discriminante quadrática de dados de reflectância de folhas das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual, realizada a partir de cinco componentes principais	41
Tabela 8. Quadrado das distâncias euclidianas generalizadas entre as espécies, geradas pela LDA, após seleção de variáveis preditoras pelo procedimento STEPDISC (SAS).42	
Tabela 9. Resumo da fase de treinamento (70%) da análise discriminante linear, após seleção de variáveis preditoras (STEPDISC/SAS), utilizando dados de reflectância de folha de espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual.....	43
Tabela 10. Resumo da validação externa (30%) da análise discriminante linear, após seleção de variáveis preditoras (STEPDISC/SAS), utilizando dados de reflectância de folha de espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual.....	44
Tabela 11. Espécies, quantidade de indivíduos e total de amostras de <i>pixels</i> coletados a partir de imagens hiperespectrais geradas pelo sensor aerotransportado AisaFENIX (SPECIM)	45
Tabela 12. Valores de reflectância máximo e mínimo da curva das espécies da Floresta Estacional Semidecidual coletadas na Estação Ecológica Caiuá.....	48
Tabela 13. Resultados da fase de treinamento da análise discriminante quadrática de dados de reflectância de <i>pixels</i> das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual, realizada a partir de cinco componentes principais	52

Tabela 14. Resultados da validação externa da análise discriminante quadrática de dados de reflectância de <i>pixels</i> das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual, realizada a partir de cinco componentes principais	52
Tabela 15. Quadrado das distâncias generalizadas entre as espécies, geradas pela LDA, após seleção de variáveis preditoras pelo procedimento STEPDISC (SAS)	53
Tabela 16. Resumo da fase de treinamento (70%) da análise discriminante linear, após seleção de variáveis preditoras (STEPDISC/SAS), utilizando dados de reflectância de <i>pixel</i> de espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual.....	54
Tabela 17. Erro da análise discriminante por espécies e erro médio total na fase de treinamento para a discriminação de espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual na Estação Ecológica do Caiuá.....	55
Tabela 18. Número de observações e percentual classificado dentro das espécies de validação externa (30%) em escala de <i>pixel</i>	56
Tabela 19. Erro por espécie e erro total para a validação do modelo gerado pela LDA.....	56
Tabela 20. Comparativo entre os métodos de discriminação e escalas de aquisição utilizada	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Remanescentes florestais do bioma Mata Atlântica no Estado do Paraná no ano de 2014.	4
Figura 2. Espectro eletromagnético emitido pelo sol.	6
Figura 3. Simulação de dados de sensoriamento remoto orbital (resoluções 1m, 2m, 3m e 5m).	9
Figura 4. Trajetória da REM dentro de uma folha proposto por Willstatter e Stoll (1918).	11
Figura 5. Curva de reflectância típica de uma folha verde sadia.	12
Figura 6. Mapa de localização da Estação Ecológica do Caiuá - EEC.	19
Figura 7. Coletas de ramos de espécies arbóreas nativas componentes do dossel da Estação Ecológica do Caiuá utilizando a tesoura de poda alta.	22
Figura 8. Demonstração de leitura radiométrica. A: (1) Espectrorradiômetro FieldSpec®3 Jr; (2) microcomputador portátil; B: (3) acessório ASD Plant Probe.	24
Figura 9: Leituras radiométricas das espécies nativas, realizadas no Laboratório da Flora (EEC), utilizando o espectrorradiômetro FieldSpec®3 Jr, ASD e acessório Plant Probe.	25
Figura 10. Sensor hiperespectral AisaFENIX (SPECIM) em três diferentes níveis de aquisição de dados, (A) em laboratório, acoplado à plataforma Lab-Scan; (B) no campo, acoplado ao tripé; (C) a bordo de aeronave.	26
Figura 11. Foto aérea da região em que está inserida a EEC, obtida durante aerolevanteamento realizado no dia 01/05/2016, com o sensor hiperespectral AisaFENIX (SPECIM).	27
Figura 12. Imagens hiperespectrais obtidas com o sensor AisaFENIX (SPECIM) do dossel da Floresta Estacional Semidecidual, Estação Ecológica do Caiuá, Diamante do Norte, PR, Brasil (Zona 22K). (R = 638,65 nm, G = 549,38 nm, B = 453,98 nm).	28
Figura 13. Alvos padrões para a validação da correção atmosférica, imageados pelo sensor AisaFENIX no dia 01/05/2016, na Universidade Estadual de Maringá (UEM), Paraná, Brasil.	29
Figura 14. Georreferenciamento de espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual, Estação Ecológica do Caiuá. Diamante do Norte, PR, Brasil.	30
Figura 15. Pontos corrigidos no programa GPS Pathfinder Office	31

Figura 16. Coleta de dados de reflectância de copas utilizando imagens hiperespectrais geradas pelo sensor AisaFENIX (SPECIM) por meio do programa ENVI® Classic, Versão 5.0.	32
Figura 17: Curvas de reflectância médias de todas as folhas de cada indivíduo das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual, coletadas na Estação Ecológica Caiuá.	35
Figura 18. Médias das curvas de reflectância das espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual coletadas em escala de folha na Estação Ecológica do Caiuá.	37
Figura 19: Gráfico demonstrando estrutura dos dados e padrões de distribuição ao longo das duas primeiras componentes principais.	39
Figura 20. Gráfico demonstrando o impacto que cada amostra tem sobre modelo.	39
Figura 21. Gráfico representativo da fase de treinamento da análise discriminante quadrática realizada a partir de dados de reflectância de folhas das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual.	40
Figura 22. Pontos em destaque representam a localização dos indivíduos arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual, Estação Ecológica do Caiuá, inseridos nas imagens hiperespectrais geradas pelo sensor AisaFENIX (SPECIM).	46
Figura 23 Cont. Curvas espectrais das espécies coletadas pelo sensor hiperespectral aerotransportado AisaFENIX.	48
Figura 24. Curvas de reflectância média de espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual, coletadas em escala de pixel a partir de imagens hiperespectrais geradas pelo sensor AisaFENIX (SPECIM).	49
Figura 25. Gráfico demonstrando estrutura dos dados e padrões de distribuição ao longo das duas primeiras componentes principais.	51
Figura 26. Gráfico demonstrando o impacto que cada amostra tem sobre o modelo.	51
Figura 27. Gráfico representativo da fase de treinamento da análise discriminante quadrática realizada a partir de dados de reflectância de pixels das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual.	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1	COBERTURA FLORESTAL PARANAENSE.....	3
2.2	SENSORIAMENTO REMOTO.....	5
2.2.1	Energia Eletromagnética.....	6
2.2.2	Sensores remotos	7
2.3	COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS.....	9
2.3.1	Comportamento espectral da vegetação	10
2.3.3	Estudos de discriminação de vegetação por SR	14
2.4	ANÁLISES ESTATÍSTICAS APLICADAS AO SENSORIAMENTO REMOTO	16
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1	ÁREA DE ESTUDO	18
3.1.1	Informações gerais sobre a Estação Ecológica do Caiuá (EEC)	18
3.1.2	Caracterização dos fatores abióticos e bióticos	20
3.2	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS	22
3.2.1	Coleta de folhas de espécies arbóreas nativas da FES.....	22
3.2.2	Leituras radiométricas foliares	23
3.2.3	Aquisição de imagens hiperespectrais via sensor aerotransportado AisaFENIX (SPECIM)	26
3.2.4	Correções das imagens hiperespectrais geradas pelo sensor AisaFENIX.....	28
3.2.5	Georreferenciamento de espécies arbóreas nativas da FES.....	30
3.3	ANÁLISES ESTATÍSTICAS APLICADAS AO SENSORIAMENTO REMOTO	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA EM ESCALA DE FOLHA	34
4.2	CLASSIFICAÇÃO DAS ESPÉCIES NATIVAS DA FES EM ESCALA DE FOLHA	38
4.2.1	Classificação das espécies nativas da FES em escala de folha utilizando PCA seguida de análise discriminante	38

4.2.2	Classificação das espécies nativas da FES em escala de folha utilizando o procedimento STEPDISC (SAS) e LDA.....	42
4.3	CLASSIFICAÇÃO EM ESCALA DE PIXEL.....	45
4.3.1	Classificação das espécies nativas da FES em escala de pixel utilizando PCA seguida de análise discriminante	50
4.3.2	Classificação das espécies nativas da FES em escala de pixel utilizando o procedimento STEPDISC (SAS) e LDA.....	53
4.4	COMPARAÇÃO ENTRE A DISCRIMINAÇÃO EM ESCALA DE FOLHA E PIXEL	57
5	CONCLUSÕES	60
6	RECOMENDAÇÕES.....	61
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
8	APENDICE.....	73

LISTA DE SIGLAS

CAI	Copas De Árvores Individuais
CAPIX	capixingui (<i>Croton floribundus</i> Spreng.)
CESP	Companhia Energética de São Paulo
EEC	Estação Ecológica do Caiuá
EM	Energia Eletromagnética
ESPET	espeteiro (<i>Casearia gossypiosperma</i> Briq.)
FES	Floresta Estacional Semidecidual
FOV	Campo de Visada
FPAR	Fração da Radiação Fotoquímica Ativa
FSECA	farinha-seca (<i>Albizia niopoides</i> (Spruce ex Benth.) Burkart)
FT	Florestas tropicais
GARAP	garapeira (<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J.F.Macbr.)
GUARI	guaritá (<i>Astronium graveolens</i> Jacq.)
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IAF	Índice de Área Foliar
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Especiais
ITCF	Instituto de Terras Cartografia e Florestas
JERIV	jerivá (<i>Syagrus romanzoffiana</i> (Cham.) Glassman)
LDA	Análise Discriminante Linear
LiDAR	(<i>Light Detection And Ranging</i>)
MA	Mata Atlântica
MACAU	macaúba (<i>Acrocomia aculeata</i> (Jacq) Lood. ex Mart)
NIR	Infravermelho Próximo

PAUM	pau-marfim (<i>Balfourodendron riedelianum</i> (Engl.) Engl.)
PC	Componentes Principais
PCA	Análise de Componentes Principais
PEROB	peroba-rosa (<i>Aspidosperma polyneuron</i> Müll.Arg.)
QDA	Análise Discriminante Quadrática
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
REM	Radiação Eletromagnética
SWIR	Infravermelho de Ondas Curtas
UC	Unidade de Conservação
UHE	Usina Hidrelétrica
Vis	Visível

1 INTRODUÇÃO

A vegetação natural é considerada como importante indicador das condições ambientais de uma região, pois protege o solo contra o transporte de sedimentos, desertificação e o assoreamento dos recursos hídricos, além de servir de habitat para animais silvestres, contribuindo para manutenção da diversidade biológica (CEMIN et al., 2005). Nesse contexto, destaca-se a importância dos mapas de vegetação, que consistem em ferramentas para a análise das relações entre a vegetação e o meio físico, definindo padrões de referência no monitoramento das mudanças temporais na paisagem e fornecendo embasamento científico ao planejamento do uso da terra (BOHRER, 2000).

De um modo geral, verifica-se que o mapeamento do uso e cobertura da terra, a partir de imagens de sensoriamento remoto (SR), constitui um ramo do conhecimento científico de valor inestimável, uma vez que com sua diversidade de técnicas e métodos, é possível desenvolver distintas áreas (BOHRER et al., 2009). Ademais, o SR possibilita a coleta de dados relevantes de forma rápida e segura, reduzindo a necessidade de aquisição de informações em campo e, conseqüentemente, os custos envolvidos (INNES e KOCH, 1998).

Dentre as diversas técnicas do SR, destaca-se a espectroscopia de imageamento, que obteve significativos avanços tecnológicos a partir da década de 1980. Sua principal característica é a obtenção de dados de reflectância, para cada *pixel* da imagem, em um grande número de bandas espectrais estreitas e contínuas (BROOK e BEN DOR, 2011). Ainda, com os novos sensores remotos hiperespectrais, houve a possibilidade de obtenção de dados com alta resolução espacial, possibilitando melhor identificação e caracterização espectral dos objetos-alvos, como a vegetação de florestas tropicais que possui alta complexidade florística e elevada diversidade.

Neste quadro, está inserida a Floresta Estacional Semidecidual (FES), pertencente ao Bioma Mata Atlântica, reconhecido mundialmente como um dos ecossistemas prioritários para a conservação (MYERS et al., 2000). No entanto, mesmo com a existência de leis de proteção, a devastação desse bioma atingiu níveis preocupantes, no Estado do Paraná, por exemplo, restam apenas 11,73% da Mata Atlântica (MA) e, mais especificamente, 3,4% da FES (FUND. SOS MATA ATLÂNTICA e INPE, 2015).

A máxima de que é necessário "conhecer para proteger" é perfeitamente aplicável a este estudo e, assim, pesquisas direcionadas ao desenvolvimento de métodos para mapeamento da vegetação nativa da FES, utilizando técnicas de SR hiperespectral, podem auxiliar a localização de diferentes vegetações em locais nos quais são de suma importância

para a implementação de ações na recuperação e conservação da biodiversidade dessa tipologia florestal, visando, de maneira ampla e conjunta a outros estudos, a conservação da biodiversidade mundial.

A hipótese básica para o desenvolvimento deste estudo foi a de que é possível discriminar espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual utilizando dados hiperespectrais de reflectância de folhas e *pixels*?

Assim, o presente estudo tem como objetivo geral discriminar espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual, utilizando dados gerados pelos sensores remotos ASD FieldSpec®3 Jr e AisaFENIX (SPECIM – Spectral Imaging Ltd.) e como objetivos específicos:

- Caracterizar de forma espectral e discriminar espécies arbóreas nativas da FES em escala de folha, utilizando dados de reflectância nas regiões do visível ao infravermelho de ondas curtas (Vis ao SWIR: 450 a 2.450nm), coletados com o espectrorradiômetro ASD FieldSpec®3 Jr;

- Caracterizar de forma espectral e discriminar espécies arbóreas nativas da FES, em escala de *pixel*, utilizando dados de reflectância nas regiões do Vis ao SWIR (453 a 2.396nm), coletados a partir das imagens hiperespectrais, com alta resolução espacial, geradas pelo sensor aerotransportado AisaFENIX;

- Avaliar dois métodos estatísticos para a discriminação de espécies arbóreas nativas da FES: análise de componentes principais seguido de análise discriminante e análise pela seleção de bandas utilizando o procedimento STEPDISC seguido de análise discriminante.

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. Atualmente, as Florestas Tropicais ocupam apenas 6,4% da superfície terrestre, aproximadamente, mas ainda são áreas que conservam grande proporção da biodiversidade mundial (THOMAS et al., 2004).

No Brasil, o processo de colonização iniciou-se no litoral e teve grande desenvolvimento nas regiões Nordeste e Sudeste, primeiramente, e depois na região Sul. Mais recentemente, com a vinda de imigrantes europeus para o cultivo do café, ocorreu a grande ocupação das áreas planálticas das regiões Sudeste e Sul. Essa 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. Aliados 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).

Maack (1968) descreveu 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 primitivas equivalente a 83,41% (16.782.400ha) da superfície de seu território. Entre 1930 e 1955 foram desmatados 58,65% da cobertura original (GUBERT-FILHO, 1993). Nas décadas subsequentes, o desmatamento atingiu proporções alarmantes, reduzindo a superfície florestal a apenas 1.503.098ha, ou seja, 7,59% da cobertura florestal original, concentrados no Parque Nacional do Iguaçu e na Serra do Mar, além de uma infinidade de pequenos fragmentos (FUND. SOS MA, 1998).

Atualmente, o Estado do Paraná apresenta 11,7% de sua cobertura florestal original (Figura 1), sendo este aumento inerente à inclusão das ilhas do rio Paraná no território do Estado e devido a alterações na metodologia de levantamento realizado pela FUND. SOS MA e INPE (2015). Dentre as tipologias florestais que a Mata Atlântica (MA) paranaense engloba, consta a Floresta Estacional Semidecidual, que apresenta apenas 3,4% de sua cobertura original preservada (SEMA, 2010).

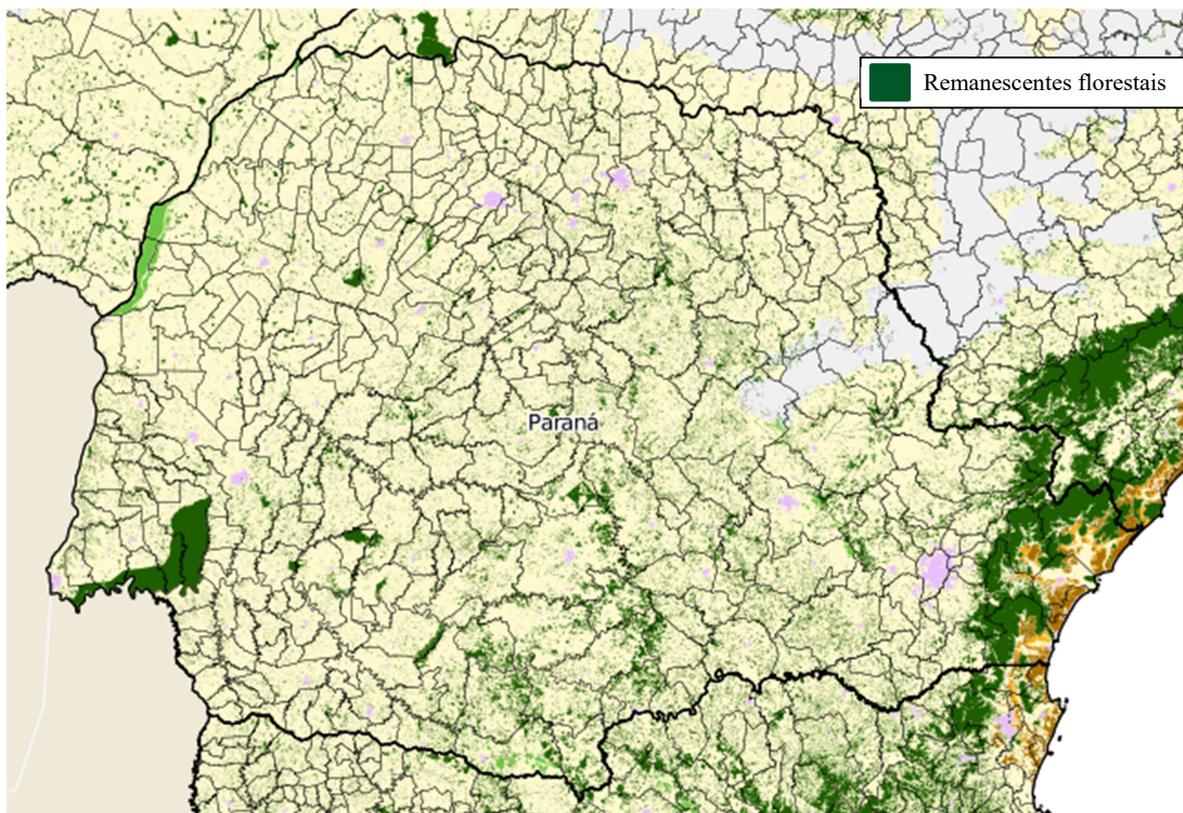


Figura 1. Remanescentes florestais do bioma Mata Atlântica no Estado do Paraná no ano de 2014.

Fonte: Fundação SOS Mata Atlântica e INPE (2015).

Assim como observado na Figura 1, os habitats naturais que formavam áreas contínuas foram progressivamente transformados em pequenas áreas remanescentes, isoladas e dispersas em uma paisagem muito modificada ou degradada. Esse processo, conhecido como fragmentação, é considerado uma das maiores ameaças à biodiversidade global (PIRES et al., 2006; HERMANN et al., 2005). A fragmentação pode ocorrer naturalmente, ou ser oriunda de atividades humanas, neste caso, se desenvolve com grande rapidez e em larga escala espacial, provocando modificação drástica na paisagem (OLIFIERS e CERQUEIRA, 2006), assim, suas consequências para as comunidades naturais são danosas e variam em função das espécies locais e das características da paisagem.

Nesse sentido, conservar a biodiversidade constitui um dos maiores desafios da atualidade, em razão da intensidade dos impactos causados pelo homem nos ecossistemas naturais (VIANA et al., 1998). Diante dessa situação crítica, ações devem ser implementadas para o restabelecimento dos níveis mínimos de cobertura vegetal, sob pena de ser perpetuada a atual situação de completa modificação da paisagem original (SPVS, 1996).

2.2 SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto (SR) pode ser definido como a técnica de se obter informações sobre determinado objeto, área ou fenômeno, por meio de dados coletados por equipamentos que não estão em contato direto com o objeto, área ou fenômeno estudado (LILLESAND e KIEFER, 1987). Para Jensen (2000), é a arte e ciência da obtenção de informação sobre um objeto sem contato físico direto com o mesmo.

O SR parte do princípio de que cada objeto tem uma particularidade única de reflexão e emissão de energia eletromagnética (EM). Assim, pode-se identificar e compreender o objeto ou condições ambientais por meio dessa característica peculiar de comportamento. Deste modo, dois objetos diferentes interagirão distintamente com a EM, pelo menos em alguns comprimentos de onda, permitindo assim sua identificação e discriminação (NOVO, 2010).

O desenvolvimento inicial do sensoriamento remoto é cientificamente ligado ao desenvolvimento da fotografia e à pesquisa espacial. A primeira foto foi obtida por Daguerre e Niepce em 1839 e, já em 1840, o seu uso foi recomendado para levantamentos topográficos (NOVO e PONZONI, 2001). Porém, somente em 1960, o termo sensoriamento remoto foi mencionado na literatura científica, e foi nessa década que, com a corrida espacial, foram lançados os primeiros satélites meteorológicos (MENESES, 2012).

No SR moderno, tem-se como marco importante o lançamento do primeiro satélite de sensoriamento remoto, ERTS-1, posteriormente renomeado de Landsat 1, colocado em órbita em 1972 pelos EUA. O sensor imageador multiespectral integrado a esse satélite possibilitava a obtenção simultânea de quatro imagens nas regiões do espectro do Vis e da região do infravermelho próximo (NIR, sigla em inglês de *near infrared*) e uma imagem na região do termal, portanto, além do que era possível captar com o uso de filmes fotográficos (NOVO e PONZONI, 2001).

Por muitos anos, a observação da Terra tem sido a base para a aquisição de dados remotos (LANDGREBE, 1999a) que foram considerados eficazes na economia de tempo e custo na realização de monitoramento em larga escala (OKIN et al., 2001),

Partindo para a escala aérea, um grande passo foi dado quando a NASA Jet Propulsion Laboratory introduziu o conceito de espectroscopia de imageamento, com o pioneirismo no sensoriamento hiperspectral aerotransportado, o Airborne Imaging Spectrometer (AIS) (GOETZ, 2009). Com o advento dessa nova tecnologia, houve a

possibilidade de os trabalhos passarem a incluir quantificação e caracterização de parâmetros geofísicos e bioquímicos, como na determinação da qualidade, quantidade e distribuição geográfica de recursos naturais, como vegetação, solo, água, entre outros.

2.2.1 Energia Eletromagnética

A energia eletromagnética (EM) é emitida por qualquer corpo que possua temperatura acima de zero grau absoluto (0 Kelvin) e a radiação eletromagnética (REM) emitida pelo sol é a principal fonte de energia utilizada no SR. A propagação da REM se dá por meio de ondas eletromagnéticas, em unidades de hertz (Hz), podendo ser ordenada de forma contínua em função do comprimento, sendo esta disposição denominada de espectro eletromagnético (Figura 2) (MORAIS, 2002). A interação desta energia com diferentes alvos é o princípio básico da ciência do sensoriamento remoto (MOREIRA, 2005; PONZONI e SHIMABUKURO, 2010; NOVO, 2010; WENG, 2010).

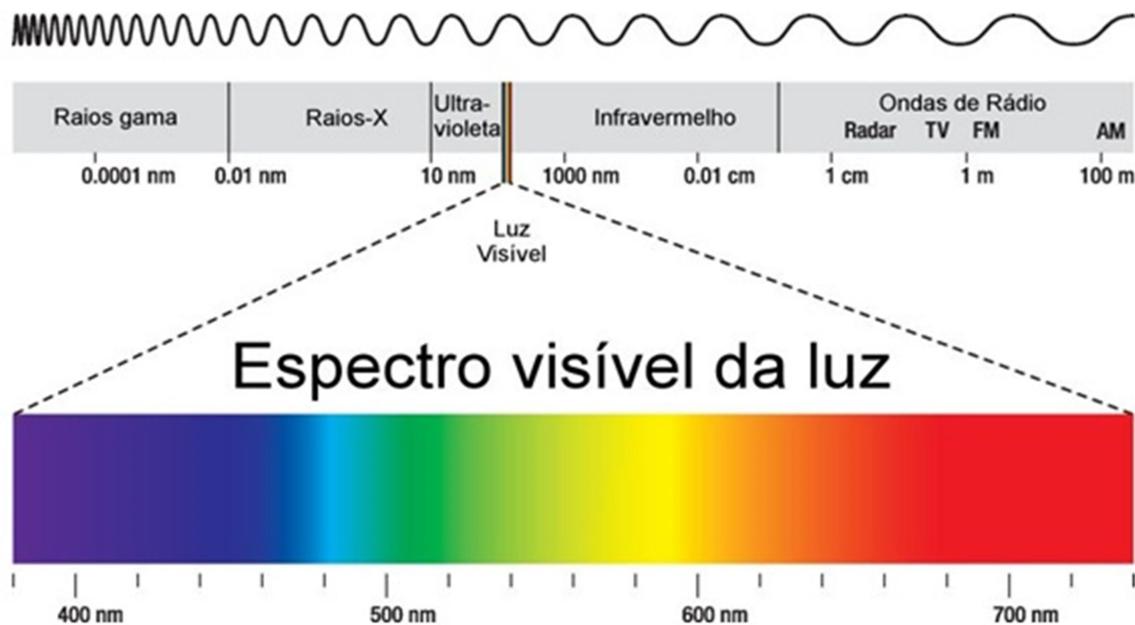


Figura 2. Espectro eletromagnético emitido pelo sol.
Fonte: Meneses e Madeira Netto (2001).

2.2.2 Sensores remotos

Os sistemas sensores utilizados na aquisição e registro de informações podem ser classificados como imageadores e não-imageadores; ativos e passivos. Os sensores imageadores têm como produto final imagens dos alvos de interesse, já os sensores não-imageadores fornecem informações de forma numérica, sendo os gráficos sua forma mais utilizada.

Com relação à fonte de REM, sensores remotos ativos utilizam REM artificial, produzida por equipamentos instalados nos próprios sensores, possibilitando a aquisição de dados de forma controlada e independente de luminosidade externa (geralmente solar). Dentre os sensores ativos, destacam-se os radares, por emitirem ondas eletromagnéticas capazes de ultrapassar a barreira de nuvens e por poderem ser operados sob condições atmosféricas adversas, motivo pelo qual são amplamente utilizados na região Amazônica, por exemplo. Já os sensores passivos utilizam apenas a REM natural refletida ou emitida a partir dos alvos. A luz solar é a principal fonte de REM dos sensores passivos (ex.: Thematic Mapper, Operational Land Imager, AisaFENIX, AVIRIS, entre outros). Os sensores remotos são também classificados de acordo com o nível de obtenção dos dados, podendo ser laboratoriais, terrestres, aéreos e orbitais (MOREIRA, 2005).

Outro fator importante na classificação dos sensores é a resolução espectral, dividida em dois grupos: multiespectral e hiperespectral. Imagens ou dados multiespectrais têm sido usados como fonte de dados observacional para o SR da Terra por sistemas aerotransportados e orbitais desde a década de 1960 (LANDGREBE, 1999b). De acordo com Smith (2001a), a maioria dos sistemas de satélite multiespectrais adquire informações entre três e seis bandas espectrais, na região do visível à região do infravermelho médio do espectro eletromagnético. No entanto, há alguns sistemas que utilizam uma ou mais bandas relacionadas ao infravermelho termal. Essa classificação espectral pouco refinada da energia refletida e emitida é o principal fator limitante de sistemas multiespectrais.

Ao longo das últimas três décadas, os avanços na tecnologia de sensores têm superado as limitações desses sistemas de observação da Terra, com o desenvolvimento de sensores hiperespectrais, que possibilitam a coleta de dados em centenas de bandas espectrais estreitas e contínuas em uma única aquisição, produzindo, assim, dados espectrais mais detalhados. Além disso, essa tecnologia permite que a interferência atmosférica seja melhor caracterizada e retirada de todo o espectro coletado (SMITH, 2001b; GOETZ, 2009; BEN-

DOR et al., 2013), se aproximando de dados adquiridos em escala proximal (laboratorial e campo).

Estudos têm indicado as vantagens da utilização de dados hiperespectrais, a partir de porções específicas do espectro, ao invés de dados multiespectrais generalizados, para obter informações quantitativas ou qualitativas mais sensíveis relacionadas às comunidades florestais ou culturas agrícolas (BLACKBURN, 1998; ELVIDGE e CHEN, 1995; THENKABAIL et al., 2000; THENKABAIL et al., 2004; CLARK et al., 2005). Por exemplo, Thenkabail et al. (2004) estabeleceram as vantagens da utilização de dados hiperespectrais Hyperion em relação a dados multiespectrais de IKONOS, ETM + (Enhanced Thematic Mapper Plus) e ALI (Advanced Land Imager) ao estudar a vegetação da floresta tropical (FT). Quando comparado aos dados multiespectrais, bandas espectrais estreitas do sensor Hyperion explicaram 36-83% a mais da variabilidade na biomassa e aumentaram em 45-52% as precisões de classificação de uso da terra/cobertura da terra, verificado pelo levantamento de dados em campo.

Por fim, outra característica importante de imagens produto do SR é a resolução espacial, definida como a menor área da qual o sensor é capaz de registrar a REM. Esta área é chamada de *pixel* e é indivisível (NOVO e PONZONI, 2001). Imagens de maior resolução espacial (menor tamanho de *pixel*) apresentam melhor poder de definição dos alvos terrestres (Figura 3). Clark et al. (2005), Ferreira et al. (2016) e Campos (2017, dados não publicados) constataram que imagens hiperespectrais com alta resolução espacial apresentam-se como ferramentas de alto potencial para a discriminação automática de indivíduos arbóreos de FT.

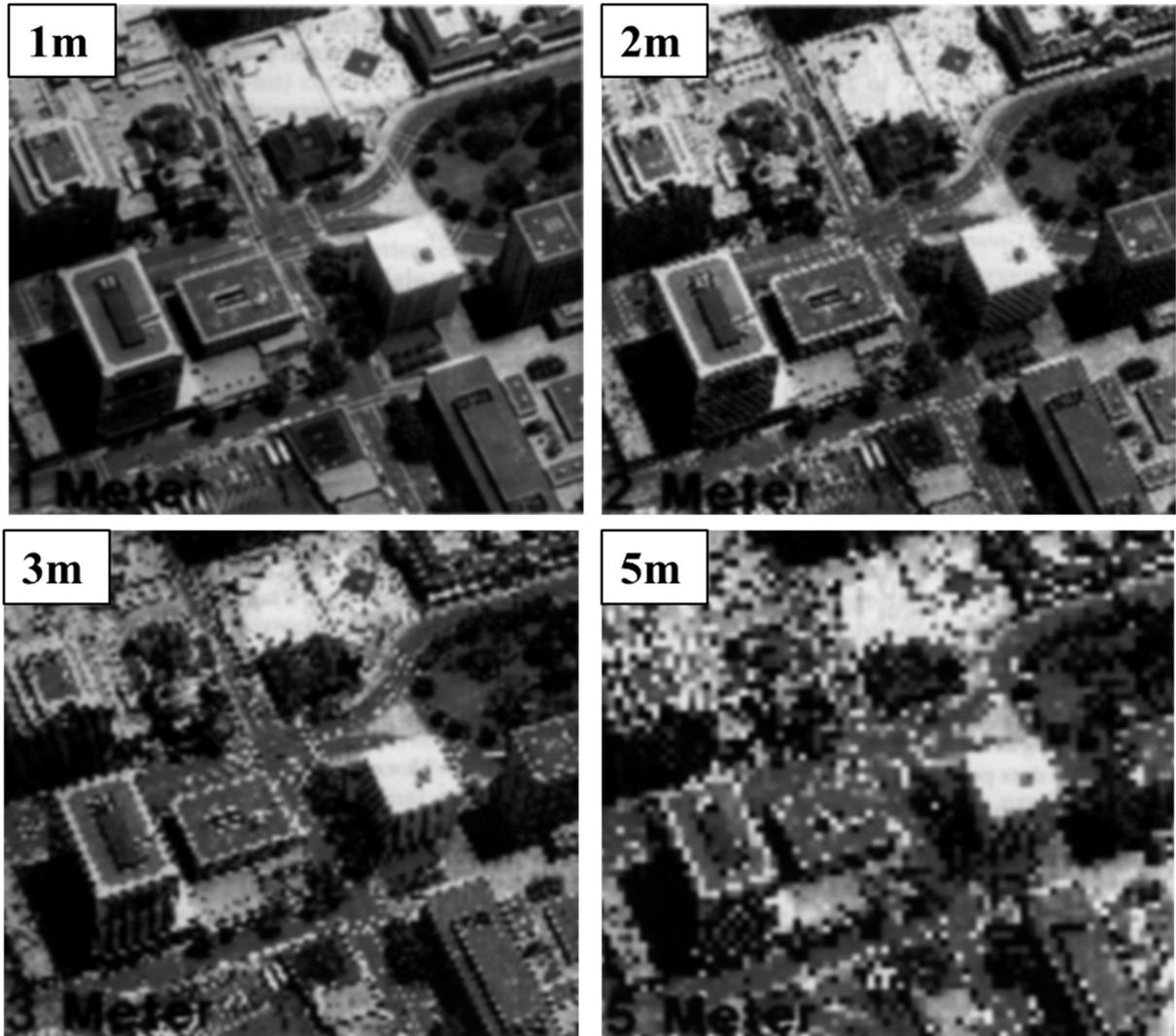


Figura 3. Simulação de dados de sensoriamento remoto orbital (resoluções 1m, 2m, 3m e 5m).
Fonte: Jensen (2000).

2.3 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS

O termo comportamento espectral de alvos foi atribuído por profissionais que atuam no estudo dos recursos naturais com a aplicação do SR, quer sejam vegetação, solos, minerais e rochas, água, etc. Esse comportamento contempla os três fenômenos que ocorrem após a incidência da REM sobre um objeto: reflexão; transmissão; e absorção (NOVO e PONZONI, 2001).

Complementando a definição acima, a assinatura espectral é o conjunto dos valores sucessivos de reflectância de um dado objeto ao longo do espectro eletromagnético, por conseguinte, a forma, intensidade e a localização de cada banda de inflexão caracterizam o objeto espectralmente. Dessa maneira, como já mencionado, por apresentarem diferentes propriedades físico-químicas e biológicas, os alvos interagem de maneira peculiar com a EM

incidente. Essas diferentes interações espectrais possibilitam a distinção e o reconhecimento dos diversos alvos e indivíduos (MORAES, 2007).

2.3.1 Comportamento espectral da vegetação

O sensoriamento remoto vem sendo largamente aplicado no monitoramento da cobertura vegetal, nesse sentido, seus estudos ganham ênfase, sobretudo, por buscarem conhecimentos acerca de suas variações, padrões distributivos, ciclos, modificações fisiológicas e morfológicas (ESPÍNDULA, 2012).

As distintas áreas do conhecimento, cujo foco ou objeto de estudo se pautam na observação e análise da vegetação (agronomia, biologia, geociências, silvicultura) vêm cotidianamente utilizando e aprimorando as formas de aplicação dos recursos apresentados pelo SR (PONZONI 2002; MOREIRA, 2005; WENG, 2010). Dessa maneira, a compreensão dos aspectos de reflectância da vegetação e os desafios envolvidos em sua classificação, baseando-se na assinatura espectral, se inicia em escala de folha.

Comportamento espectral foliar

De todos os elementos constituintes da vegetação, a folha é seu principal representante, quando se considera o processo de interação com a REM. Uma folha típica é constituída de três tecidos básicos: epiderme; mesófilo fotossintético; e tecido vascular. Assim, sua reflectância espectral é controlada por: 1) propriedades bioquímicas (por exemplo, água, pigmentos fotossintéticos e carboidratos estruturais), que apresentam características de absorção em comprimentos de onda específicos e; 2) morfologia da folha (por exemplo, espessura da parede celular, espaços de ar e cera cuticular), que afetam a dispersão de fótons (ASNER, 1998; GRANT, 1987; ROBERTS et al, 2004; WOOLLEY, 1971).

Conforme teoria descrita por Willstatter e Stoll no início do século XX (1918), que ainda é válida, a REM incidente em uma folha é destinada a uma das três vias principais: reflectância; transmitância; e absorbância (Figura 4). Uma pequena porção do feixe incidente é refletido pela superfície foliar, ou epiderme, outra parcela é transmitida para o mesófilo foliar, podendo ser absorvida, por exemplo, por pigmentos fotossintetizantes, ou redirecionada inúmeras vezes nas interfaces celulares (fronteira entre as paredes celulares e espaços de ar), causando o espalhamento de fótons.

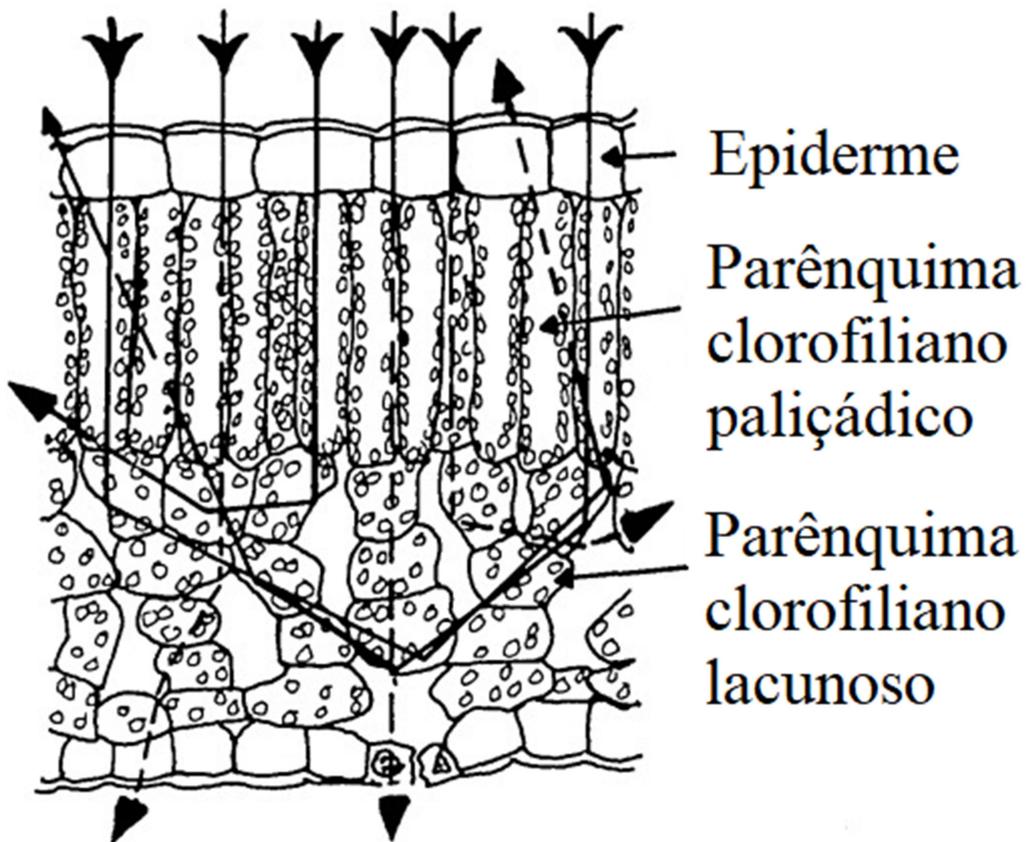


Figura 4. Trajetória da REM dentro de uma folha proposto por Willstatter e Stoll (1918).
 Fonte: Kumar & Silva (1972).

O comportamento espectral de uma folha verde sadia produz uma curva espectral típica (Figura 5). A região do Vis é caracterizada por baixa reflectância devido às feições de absorção relacionadas aos pigmentos carotenoides (470, 500 e 520nm), clorofila a (580, 630 e 680nm) e clorofila b (460, 635 e 650nm) (CHAPPELLE et al., 1992; BLACKBURN, 1998; GITELSON et al., 2006; GITELSON, 2012), assim, o pico de reflectância ao redor de 550nm refere-se à região verde do espectro (SMITH, 2000b).

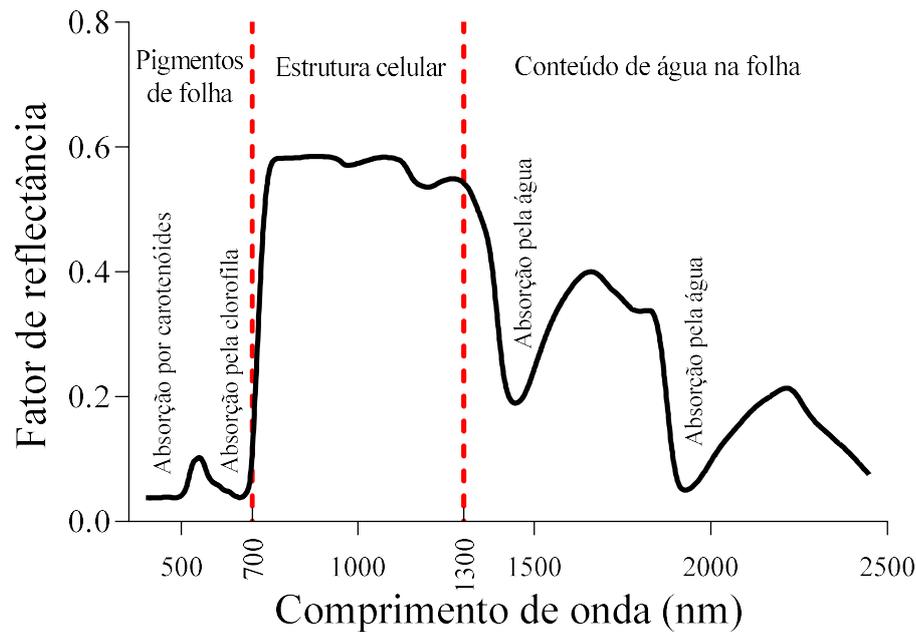


Figura 5. Curva de reflectância típica de uma folha verde sadia.
 Fonte: Adaptado Novo (2010).

Na região NIR, entre 700 e 1300nm, aproximadamente metade do fluxo radiante incidente é refletido pela folha e a outra metade é transmitida pela estrutura do mesófilo foliar. A elevada e constante reflectância observada nessa faixa está relacionada com a não utilização desta EM pelos vegetais, havendo a necessidade de manutenção do equilíbrio energético interno, evitando a destruição dos pigmentos fotossintetizantes. Ainda, as feições de absorção em 980 e 1200nm estão relacionadas com o conteúdo de água na folha (GAUSMAN, 1985; GRANT, 1987; JENSEN, 2000; WOOLLEY, 1971).

No infravermelho de ondas curtas (SWIR, sigla em inglês para *shortwave infrared*), destacam-se as feições de absorção da água, em 1450 e 1900nm. Ao longo de todo espectro do infravermelho, as feições relacionadas às ligações O-H da água encobrem outras de menor expressão, associadas a compostos bioquímicos como celulose, lignina, proteínas, ácidos graxos, açúcares e amido (ASNER, 1998; CURRAN, 1989; GAUSMAN, 1985).

Neste sentido, partindo do princípio de que a resposta espectral das folhas é governada por suas características físico-químicas, esbarra-se na questão de que também existem diferenças intraespecíficas em propriedades ópticas foliares, como observado por CASTRO-ESAU et al. (2006), complicando o reconhecimento das diferenças interespecíficas ou intergrupais.

Um exemplo de variabilidade nas propriedades ópticas foliares dentro das espécies ocorre com a idade das folhas. Roberts et al. (1998) observaram alterações típicas no comportamento espectral de folhas novas de espécies da caatinga amazônica, durante os primeiros 6 meses de desenvolvimento, incluindo diminuição da reflectância no Vis e aumento no NIR, que se relacionam com o aumento do teor de clorofila e o desenvolvimento do mesofilo foliar, respectivamente.

Dessa maneira, torna-se necessário compreender as variações nos dados de reflectância entre folhas de mesma espécie por meio de medidas radiométricas realizadas de forma controlada (laboratório), para que, com dados padrão, seja possível a extrapolação da escala de trabalho para níveis aéreos e orbitais (DEMATTE, 1999; BEN-DOR et al., 2009).

Comportamento espectral de dosséis

As discussões apresentadas até o momento referiram-se ao estudo das propriedades espectrais de folhas isoladas, mas, a aplicação das metodologias de sensoriamento remoto no estudo da vegetação inclui a necessidade de compreender o processo de interação entre a REM e os diversos tipos fisionômicos de dosséis.

A folha é o principal elemento da vegetação sob o ponto de vista do processo de interação com a REM, assim, espera-se que muito do que foi exposto referente às características de reflectância foliar, também seja válido para os dosséis. De fato, quando comparadas as curvas de reflectância de uma folha verde sadia e as medições espectrais de dosséis, formas muito semelhantes apresentam-se. Essa semelhança permite que os padrões de reflectância apresentados pelos dosséis vegetais em imagens multiespectrais e hiperespectrais possam ser previstos (NOVO e PONZONI, 2001).

Contudo, diferentemente do comportamento espectral de folhas isoladas, que apresentam Fator de Reflectância Direcional-Hemisférico, ao se analisar o dossel florestal ou a copa de um indivíduo – alvos anisotrópicos – a reflectância da energia incidida não se apresentará como sobre superfície Lambertiana, que reflete em todas as direções igualmente. As diferenças de iluminação (ângulo azimutal e zenital solar) e de visada (posição do sensor, on-nadir ou off-nadir) implicam em uma Reflectância Bidirecional (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007; JENSEN, 2000).

Além disso, a energia incidente será dividida entre aquela que refletirá, após sua interação com a superfície imediata e aquela que será transmitida e retransmitida entre camadas sucessivas da vegetação antes de seu retorno à atmosfera. De acordo com Ponzoni e

Shimabukuro (2007), esse processo de espalhamento múltiplo, que ocorre no interior do dossel/copa, promove a diminuição da reflectância no Vis e aumento no NIR, conforme o aumento das camadas de folhas.

Em geral, a reflectância espectral de folhas isoladas é levemente superior àquela dos dosséis e seus componentes (SILVA E PONZONI, 1995). Isso ocorre em virtude do sombreamento das folhas inferiores pelas folhas superiores, criando uma reflectância de copa que é composta pela combinação de folhas e sombra (CAMPBELL, 1996).

Ademais, outros componentes da vegetação, como flores, frutos, ramos, caules, epífitas, lianas e plantas de sobosque, assim como solo, matéria orgânica e água também influenciam os dados espectrais de dosséis, ampliando os elementos que precisam ser compreendidos para a efetiva discriminação de indivíduos em escala de copa.

Após o lançamento de satélites com sensores hiperespectrais a bordo, tem-se como objetivo construir uma biblioteca espectral para identificação de espécies vegetais. Essa ideia é bastante complexa, pois diferentes fatores podem influenciar a resposta espectral da mesma espécie. No entanto, a caracterização espectral de alvos vegetais em laboratório pode ser utilizada em conjunto com imagens orbitais a fim de se obter parâmetros de campo para auxiliar na interpretação dos alvos de determinado local em determinado período. Para tanto, curvas espectrais são tomadas de diferentes espécies, utilizando espectroradiômetros não imageadores em condições de laboratório, as quais são comparadas com as curvas obtidas pelos sensores imageadores. Portanto, experimentos conduzidos para demonstrar diferenças espectrais entre espécies vegetais em laboratório se tornam necessários (COURA et al., 2005).

2.3.3 Estudos de discriminação de vegetação por SR

O desenvolvimento do sensoriamento remoto hiperespectral da vegetação foi alavancado a partir da década de 1990. Contudo, o potencial uso dessa tecnologia para a classificação de espécies foi reconhecido apenas uma década mais tarde (FUNG et al, 1998; COCHRANE, 2000).

Cochrane (2000), utilizando a abordagem designada por Price (1994), ilustrou a possibilidade de identificação remota de espécies empregando o mogno (como uma espécie de referência) e diversas outras espécies da Amazônia brasileira, porém, a abordagem foi limitada a uma avaliação da amplitude e da forma do espectro.

Mais tarde, Clark et al. (2005) demonstraram, usando espectros de folhas provenientes da FT costa-riquenha, que diferenças significativas podem ser observadas em diversas bandas espectrais em toda a faixa do Vis ao SWIR.

Estudos semelhantes, em escala de folha, foram realizados por Castro-Esau et al. (2004 e 2006); Fung et al. (1998), Lucas e Carter (2008), Lucas et al. (2008), Rivard et al. (2009), Sánchez-Azofeifa et al., 2009, entre outros.

Ampliando a escala, atualmente, a espectroscopia de imageamento (EI) apresenta-se como ferramenta promissora para o mapeamento de espécies vegetais, por permitir a coleta de dados espectrais detalhados aliados à alta resolução espacial, auxiliando a detecção de variações dos atributos químicos e estruturais de dosséis, dentre eles, o conteúdo de água no dossel, pigmento foliar, nitrogênio, celulose e lignina, biomassa e índice de área foliar (CURRAN, 1989; JACQUEMOUD et al., 1996; ROBERTS et al., 2011).

Nesse contexto, diversos autores têm obtido sucesso na identificação de espécies em diferentes ambientes (ADAM et al., 2009; BUNTING e LUCAS, 2006; DALPONTE et al., 2012; FUNG et al., 1998; PEERBHAY et al., 2013). No entanto, o mapeamento de espécies nativas em ambientes tropicais, a partir de dados de copas individuais, ainda constitui uma difícil tarefa, considerando a elevada diversidade florística, bioquímica e fisiológica presente nessas formações florestais, ainda pouco compreendidas pela comunidade científica (ASNER, 2008; ASNER e MARTIN, 2008).

Após constatarem o absoluto sucesso (100%) na discriminação de sete espécies pertencentes à FT úmida da Costa Rica, utilizando dados hiperespectrais obtidos em escala de folha e análise discriminante linear (LDA), Clark et al. (2005) provaram, de forma inédita, a possibilidade de discriminação de copas a partir de dados (aéreos) hiperespectrais com alta resolução espacial, nesse sentido, o método discriminante (LDA) apresentou acurácia de 92%.

Papes et al. (2010), em estudo realizado na FT peruana, obtiveram resultados similares na discriminação de cinco espécies em escala copa, obtendo 100% de acerto na classificação por meio de LDA.

Féret e Asner (2012) também observaram que o mapeamento de espécies arbóreas em áreas de FT havaiana torna-se possível com a utilização de dados obtidos por EI. Em trabalho posterior (Féret e Asner, 2013) métodos de classificação paramétricos (LDA e análise discriminante regularizada) apresentaram resultados satisfatórios na identificação de copas.

Com relação ao mapeamento de espécies da Floresta Estacional Semidecidual, recentemente, Ferreira et al. (2016) utilizaram imagens hiperespectrais com alta resolução espacial, geradas pelos sensores AisaEAGLE e AisaHAWK (SPECIM) para a discriminação de oito espécies arbóreas, obtendo acurácia de 84% na classificação de *pixels* por meio de LDA. Os autores também avaliaram a produção de mapas da vegetação, nos quais o método não paramétrico *Radial Basis Function* identificou corretamente o maior número de copas (84,9%).

A partir dessa revisão, constata-se que, pelo fato de os trabalhos existentes não se sobreporem com relação às tipologias florestais e espécies caracterizadas, estudos espectralradiométricos em escala de folha e copa devem continuar a ser desenvolvidos conjuntamente, com o objetivo de estabelecer bibliotecas espectrais que auxiliem o mapeamento automatizado de coberturas florestais.

2.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS APLICADAS AO SENSORIAMENTO REMOTO

A análise de componentes principais (PCA) é um procedimento de transformação e redução de variáveis, geralmente utilizado quando determinado conjunto de dados é adquirido em um grande número de variáveis possivelmente correlacionadas (SAS, 2008), por exemplo, dados obtidos por meio de técnicas de espectroscopia.

Portanto, o conjunto de variáveis original é transformado em um novo e menor conjunto de variáveis artificiais descorrelacionadas, denominadas componentes principais (PC, sigla em inglês de *principal component*). Essa transformação é feita de forma linear e ortogonal, de forma que as PCs são computadas de modo ranqueado, com o propósito de reter o máximo de informação, em termos de variação total, contida nos dados (CAMO, 2006).

Esse tipo de análise também permite avaliar agrupamentos de indivíduos de acordo com suas variações, ou seja, segundo seu comportamento dentro da população, contribuindo para a construção de modelos de classificação, como análises discriminantes e regressão (por ex.: análise por mínimos quadrados parciais – PLSR).

Ao contrário da PCA, o procedimento STEPDISC, do sistema SAS, é um método de seleção de variáveis. Nesse sentido, é a partir de múltiplas análises discriminantes, realizadas “passo a passo” (*stepwise*), que um subconjunto de variáveis é selecionado para participar da discriminação entre classes, conforme teste de significância (teste F) ou correlação parcial. Dessa maneira, garante-se que duas ou mais variáveis não se sobreponham, o que poderia interferir no processo discriminatório subsequente (SAS, 2008).

Assim, a partir de um novo conjunto de variáveis preditoras (formado via PCA ou STEPDISC) torna-se possível a determinação de modelos discriminantes. A análise discriminante consiste em uma técnica multivariada que distingue e classifica um objeto ou indivíduo em classes previamente definidas, com alicerce em observações realizadas sobre seus atributos, neste caso, a curva espectral (KHATTREE e NAIK, 2000; JOHNSON e WICHERN, 1999). Ainda, o critério de discriminação determinado a partir de um conjunto de dados de treinamento pode (e deve) ser aplicado em um novo conjunto de dados, a fim de validar os modelos discriminantes obtidos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo apresenta duas fases, as quais foram desenvolvidas na Estação Ecológica do Caiuá, Unidade de Conservação (UC) da Floresta Estacional Semidecidual, Paraná, Brasil. A primeira fase está relacionada com a caracterização espectral e discriminação de sete espécies arbóreas nativas da FES, utilizando dados de reflectância em escala de folha (proximal), obtidos com o espectrorradiômetro ASD FieldSpec®3 Jr.

Na segunda fase do trabalho, imagens hiperespectrais da área de estudo foram obtidas por meio de aerolevanteamento, utilizando o sensor AisaFENIX (sub-orbital). Após a coleta das imagens, indivíduos de nove espécies foram identificados a campo e georreferenciados, sendo possível a sua localização nas imagens hiperespectrais. Assim, dados de reflectância de *pixels* de cada indivíduo foram obtidos, para realizar-se a sua caracterização e discriminação em escala de *pixel*.

Em ambas as fases, dois métodos estatísticos discriminantes foram avaliados: PCA-QDA (Análise de Componentes Principais seguida de Análise Discriminante Quadrática) e STEPDISC-LDA (método de seleção de variáveis preditoras seguido de Análise Discriminante Linear (LDA), possibilitando a verificação da porcentagem de discriminação das espécies do presente estudo.

A seguir, os materiais e métodos utilizados em cada fase são descritos detalhadamente.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

De acordo com o Plano de Manejo da Unidade de Conservação (IAP/DIBAP, 2009), a Estação Ecológica do Caiuá (EEC) é caracterizada a seguir.

3.1.1 Informações gerais sobre a Estação Ecológica do Caiuá (EEC)

A Estação Ecológica do Caiuá está inserida entre a zona de amortecimento e transição da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica - Rio Paraná, sendo esta uma das sete unidades de habitats prioritárias para a conservação da biodiversidade (DINERSTEIN et al., 1995).

Situada na região Noroeste do Estado do Paraná, no Município de Diamante do Norte, localiza-se na bacia do baixo Paranapanema - margem esquerda - às margens do reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Rosana (Figura 6).

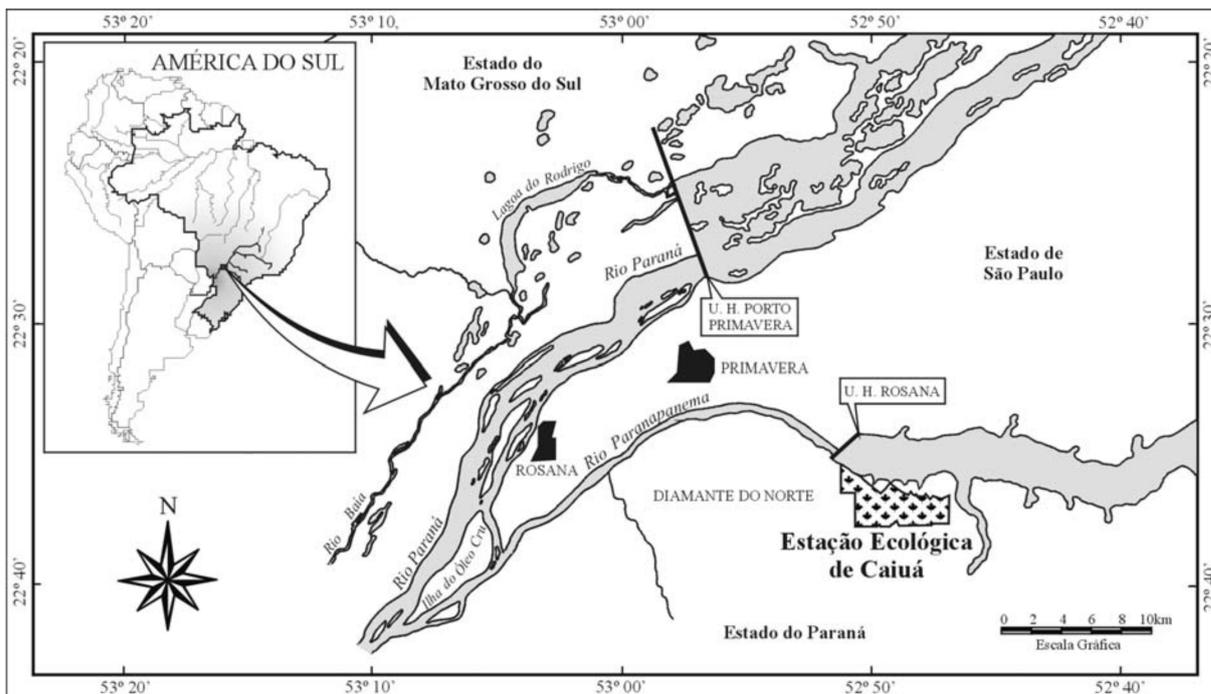


Figura 6. Mapa de localização da Estação Ecológica do Caiuá - EEC.
Fonte: COSTA-FILHO, 2004.

Criada em 21 de novembro de 1994, por meio do Decreto Estadual nº 4.263, a Unidade de Conservação abrangia uma área de 1.427,30ha entre a latitude 7497659,00m e longitude de 308090,00m (UTM-WGS84). Por meio do Decreto Estadual nº 3.932, de 04 de dezembro de 2008, a área foi ampliada, passando a abranger 1.449,48ha. Recentemente, outras áreas foram incorporadas à Estação que totaliza, atualmente, 1.581,92ha.

Além de estar inserida em um dos sete locais prioritários para a conservação da biodiversidade, a EEC abrange uma das últimas amostras de Floresta Estacional Semidecidual em estágio primário de desenvolvimento, constituindo uma fonte ímpar de recursos genéticos passíveis de serem utilizados em programas de recuperação ambiental (IAP, 1997). Assim, a caracterização e o mapeamento de espécies vegetais, por meio de técnicas de sensoriamento remoto, apresentam-se como ferramentas que podem auxiliar o acesso a esses recursos, podendo ser utilizadas em projetos de conservação da flora e fauna desse bioma.

3.1.2 Caracterização dos fatores abióticos e bióticos

Clima

De acordo com a classificação climática de Köppen, a região Noroeste do Paraná possui clima do tipo Cfa - mesotérmico, úmido, sem estação seca e com verões quentes. Além disso, apresenta temperatura máxima anual entre 28 e 29° C e mínima entre 15 e 16° C, sendo a média anual entre 21 e 22°C. Com relação às chuvas, a precipitação média anual é de 1.200 a 1.400 mm, sendo o trimestre mais chuvoso o de dezembro, janeiro e fevereiro (MAACK, 1968; IAP/DIBAP, 2009).

Solos

O material de origem que contribuiu para a formação da maioria dos solos da EEC está representado pelo Arenito Caiuá - série São Bento – Cretáceo. Ocorrem também solos derivados de sedimentos fluviais nas porções adjacentes ao rio Paranapanema. Em levantamento realizado pelo IAP, as seguintes classes foram identificadas: ARGISSOLO; GLEISSOLO; LATOSSOLO e NEOSSOLO (COSTA-FILHO, 2004; IAP/DIBAP, 1997).

O relevo, por ser um dos fatores responsáveis pela formação dos solos, possui importância significativa, particularmente na área da Estação Ecológica, por separar três grandes compartimentos característicos, ou seja, a porção aluvial na porção marginal do rio Paranapanema, os vales com vertentes onduladas ou forte onduladas e a superfície cimeira dos platôs, que podem apresentar diferentes subníveis em relevo plano ou suave ondulado.

Hidrografia

A EEC é banhada pelo reservatório da UHE por uma distância de 5.300m e por 1.900m pelo rio Paranapanema, em seu trecho lótico (ambiente relativo a águas continentais moventes, com tempo de residência inferior a 2 dias).

Na porção Oeste, possui, dentro de seu perímetro, duas nascentes denominadas água do Scherer e Conceição, que percorrem a EEC por, aproximadamente, 1.450m, desembocando no rio Paranapanema. A terceira nascente, sem denominação, próxima à antiga cachoeira, desemboca no ribeirão Diamante, que cruza a Unidade no sentido Norte-Sul, numa extensão de 1.300m, desembocando no lago da UHE de Rosana.

Vegetação

A EEC está localizada no Bioma da Mata Atlântica na formação Floresta Estacional Semidecidual. Segundo Roderjan et al. (2002), esta unidade fitogeográfica se estabelece em locais nos quais, além da ocorrência eventual de geadas, a flora está condicionada a um período de baixa precipitação pluviométrica, quando entre 20 e 50% das árvores do dossel da floresta perdem suas folhas, modificando fortemente a fisionomia da vegetação. Assim, as formações vegetais dessa UC têm como principal característica fitofisionômica a semidecidualidade, no período desfavorável do ano.

De acordo com o levantamento executado (IAP, 1999), a área da EEC apresenta-se, em sua maior parte, ocupada por uma associação vegetal primária da Floresta Estacional Semidecidual, na qual predomina a formação Submontana, além de uma restrita faixa de formação aluvial, influenciada por inundações periódicas do rio Paranapanema.

Além dessas formações primárias, foram constatadas ocorrências isoladas de: vegetação secundária (capoeirão), área com reflorestamento e pastagem artificial, sendo essas últimas formações decorrentes de ações antrópicas, realizadas em época anterior à criação da UC (Tabela 1).

Tabela 1. Tipos de vegetação existentes na Estação Ecológica do Caiuá

TIPOLOGIAS	ÁREA (%)
Floresta Estacional Semidecidual	
Submontana	77,16
Vegetação Secundária	14,49
Aluvial	0,57
Total floresta	92,22
Reflorestamento	1,45
Área de Recuperação	4,80
Pastagem abandonada	1,53
Total áreas degradadas	7,78
Total	100

Fonte: IAP/DIBAP, 2009 (modificado).

3.2 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

3.2.1 Coleta de folhas de espécies arbóreas nativas da FES

De todos os elementos constituintes da vegetação, quando se considera o processo de interação com a radiação eletromagnética, a folha constitui seu principal elemento. Assim, com o auxílio de uma tesoura de poda alta, que atinge até 12 metros de altura, foram coletados ramos da parte superior ou lateral da copa (de acordo com as limitações do instrumento) de espécies arbóreas componentes do dossel EEC, entre os dias 10 e 13/11/2015, 8 e 12/12/2015 e 30/5 e 03/06/2016 (Figura 7. Coletas de ramos de espécies arbóreas nativas componentes do dossel da Estação Ecológica do Caiuá utilizando a tesoura de poda alta), para, assim, realizar-se a caracterização espectrorradiométrica foliar.



Figura 7. Coletas de ramos de espécies arbóreas nativas componentes do dossel da Estação Ecológica do Caiuá utilizando a tesoura de poda alta.

As espécies arbóreas coletadas foram:

- capixingui (CAPIX) (*Croton floribundus* Spreng.);
- espeteiro (ESPET) (*Casearia gossypiosperma* Briq.);
- garapeira (GARAP) (*Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F.Macbr.);
- guaritá (GUARI) (*Astronium graveolens* Jacq.);
- macaúba (MACAU) (*Acrocomia aculeata* (Jacq) Lood. ex Mart);
- pau-marfim (PAUM) (*Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl.) e;
- peroba-rosa (PEROB) (*Aspidosperma polyneuron* Müll.Arg.).

Para facilitar a leitura e o fluxo do texto, no decorrer do trabalho serão utilizados seus nomes comuns.

Essas espécies foram selecionadas para o presente estudo devido à significativa quantidade de indivíduos componentes do dossel da EEC, sendo de fundamental importância na caracterização desse tipo de formação florestal e, conseqüentemente, em processos que visem a recuperação de áreas degradadas, pois representam indivíduos de diferentes grupos de sucessão, como pioneiros, secundários e clímax, conforme descrições apresentadas no apêndice A.

Além disso, foram essas as espécies que possibilitaram o maior número de coletas de dados em áreas acessíveis da UC, tanto nessa primeira fase do trabalho (coleta de ramos), como na segunda fase, em que se mapeou a localização de indivíduos com o auxílio de um dispositivo de posicionamento global (GPS) de alta precisão, para posterior identificação nas imagens hiperespectrais geradas pelo sensor AisaFENIX.

Daughtry e Biehl (1984) e Souza et al. (1996), sabendo que as folhas de vegetação iniciam o processo de senescência a partir do momento de sua colheita, realizaram estudos que correlacionam o intervalo de tempo entre a coleta das folhas e sua forma de armazenamento, com alterações em sua resposta espectral. Os autores constataram que a degradação das propriedades espectrais das folhas diminui quando elas são armazenadas no escuro e em baixa temperatura, com isso, para manter a integridade física dos ramos coletados de diferentes indivíduos das espécies citadas acima, esses foram armazenados em caixas térmicas e continuamente umedecidos com água gelada, para não haver perda de vigor, evitando o comprometimento das leituras espectrais.

Após a coleta, os materiais foram levados para o Laboratório de Flora da EEC para aquisição dos dados de reflectância de folhas. Esse processo foi realizado em até quatro horas após a coleta dos ramos. Nessa etapa do trabalho, apenas espécies que apresentam largura de folha ou folíolo superior a 1,5 cm foram utilizadas, devido às limitações do equipamento utilizado para as leituras radiométricas, como descrito no tópico seguinte.

3.2.2 Leituras radiométricas foliares

As leituras radiométricas foliares foram realizadas por meio do espectrorradiômetro portátil FieldSpec®3 Jr (ASD Inc.), acoplado ao acessório ASD *Plant Probe* e devido ao

diâmetro de abertura desse acessório foi possível utilizar apenas espécies com largura de folha ou folíolo superior a 1,5cm, nessa etapa do trabalho, como demonstrado na Figura 8.



Figura 8. Demonstração de leitura radiométrica. A: (1) Espectrorradiômetro FieldSpec@3 Jr; (2) microcomputador portátil; B: (3) acessório ASD *Plant Probe*.

O acessório *ASD Plant Probe* permite a coleta de dados não destrutivos da vegetação de forma proximal. Este aspecto tem fundamental importância para a caracterização de assinaturas espectrais de espécies vegetais, para posterior ampliação do nível de coleta de dados para mapeamentos florísticos, como aéreo e orbital. Outra característica desse acessório é não permitir que a luz difusa do ambiente interfira na amostragem, por possuir sua própria fonte luminosa, transformando o equipamento em um sensor ativo, minimizando erros devido a fatores externos.

Com relação ao espectrorradiômetro, o equipamento FieldSpec@3 Jr 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 e 1.050nm, o intervalo de leitura é de 1,4nm; na faixa de 1.000 a 2.500nm, o intervalo passa a ser de 2nm (ASD, 2008).

Como já mencionado, as medições radiométricas foliares foram realizadas no máximo quatro horas após a coleta dos ramos, no Laboratório de Flora da própria EEC (Figura 9). Esse fator foi de fundamental importância para que não ocorresse perda do vigor das folhas, evitando modificações em suas estruturas e, conseqüentemente, em sua reflectância.



Figura 9: Leituras radiométricas das espécies nativas, realizadas no Laboratório da Flora (EEC), utilizando o espectrorradiômetro FieldSpec®3 Jr, ASD e acessório *Plant Probe*.

Nesse procedimento, as amostras foliares foram inseridas no equipamento com a face adaxial voltada ao sensor, como observado nas figuras anteriores. De maneira geral, devido à conformidade das copas da vegetação arbórea, é a face adaxial das lâminas foliares que se encontra orientada em direção à fonte luminosa, sendo o principal elemento imageado por sensores aéreos ou orbitais.

Para uma melhor caracterização espectral, de cada ramo coletado e de cada indivíduo, folhas de diferentes porções do ramo foram utilizadas para as leituras de reflectância, visando englobar dados referentes a folhas de diversas idades e minimizar possíveis diferenças devido a manchas foliares e falhas, por exemplo.

As leituras das amostras foram realizadas em fator de reflectância, podendo variar de 0 a 1 (referente a 0 a 100%) em todas as faixas do espectro eletromagnético do Vis ao SWIR, assim, cada curva espectral obtida representa uma média de cinquenta leituras. Dessa maneira, o equipamento foi otimizado e calibrado de acordo com uma placa Spectralon (referência de reflectância próxima a 100%) anexada ao *Plant Probe*, a cada indivíduo amostrado.

Um microcomputador acoplado ao espectrorradiômetro armazenou as medidas radiométricas ao passo que foram sendo coletadas. As informações obtidas foram armazenadas em arquivos .asd, contendo o comprimento de onda, com amplitude entre 350 e 2.500nm e a reflectância correspondente, de acordo com a resolução espectral.

Com os dados originais, realizou-se a correção “Splice” no software ASD ViewSpecPro Versão 4.05 (ASD, 2008), que elimina as lacunas no sinal entre os domínios das diferentes matrizes de detectores. Transições críticas estão localizadas em $\lambda = 1.000\text{nm}$ e 1.800nm , essas transições referem-se à mudança de sensor. Após a correção, os dados foram convertidos para o formato texto para prosseguimento das análises.

Para as análises estatísticas, algumas regiões da curva espectral que apresentaram ruídos foram eliminadas, resultando em dados de reflectância abrangendo a faixa do espectro eletromagnético entre 450 e 2.450nm (2.001 bandas espectrais).

3.2.3 Aquisição de imagens hiperespectrais via sensor aerotransportado AisaFENIX (SPECIM)

O sensor hiperespectral AisaFENIX (SPECIM) opera nas faixas do espectro eletromagnético do Vis, NIR e SWIR e pode ser utilizado a nível de laboratório, campo e aéreo (Figura 10). Suas especificações estão discriminadas na Tabela 2.



Figura 10. Sensor hiperespectral AisaFENIX (SPECIM) em três diferentes níveis de aquisição de dados, (A) em laboratório, acoplado à plataforma Lab-Scan; (B) no campo, acoplado ao tripé; (C) a bordo de aeronave.

Tabela 2. 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.

Assim, com o intuito de criar modelos de classificação de espécies vegetais nativas da Floresta Estacional Semidecidual, utilizando imagens hiperespectrais geradas pelo sensor AisaFENIX, foi realizado o aerolevante na área de estudo, no dia 1º de Maio de 2016

(Figura 11). Durante o voo, as condições climáticas eram consideradas ótimas (céu claro e sem nuvens), sendo a altura de voo de, aproximadamente, 800 metros em relação ao nível do mar.

Nesse processo, o sensor encontrava-se conectado a um sistema de posicionamentos global e uma unidade inercial (GPS/IMU) modelo OXTS – RT3050, possibilitando a aquisição de imagens georreferenciadas. A opção de armazenamento de dados recomendada para aerolevantamentos é de 8x, assim, os dados radiométricos adquiridos apresentaram 363 bandas, de modo que essa pequena variação está relacionada com o número de quadros/segundo das imagens obtidas (conforme tabela 2).



Figura 11. Foto aérea da região em que está inserida a EEC, obtida durante aerolevantamento realizado no dia 01/05/2016, com o sensor hiperspectral AisaFENIX (SPECIM).

As imagens utilizadas no presente estudo estão representadas na Figura 12 e suas especificações na Tabela 3.

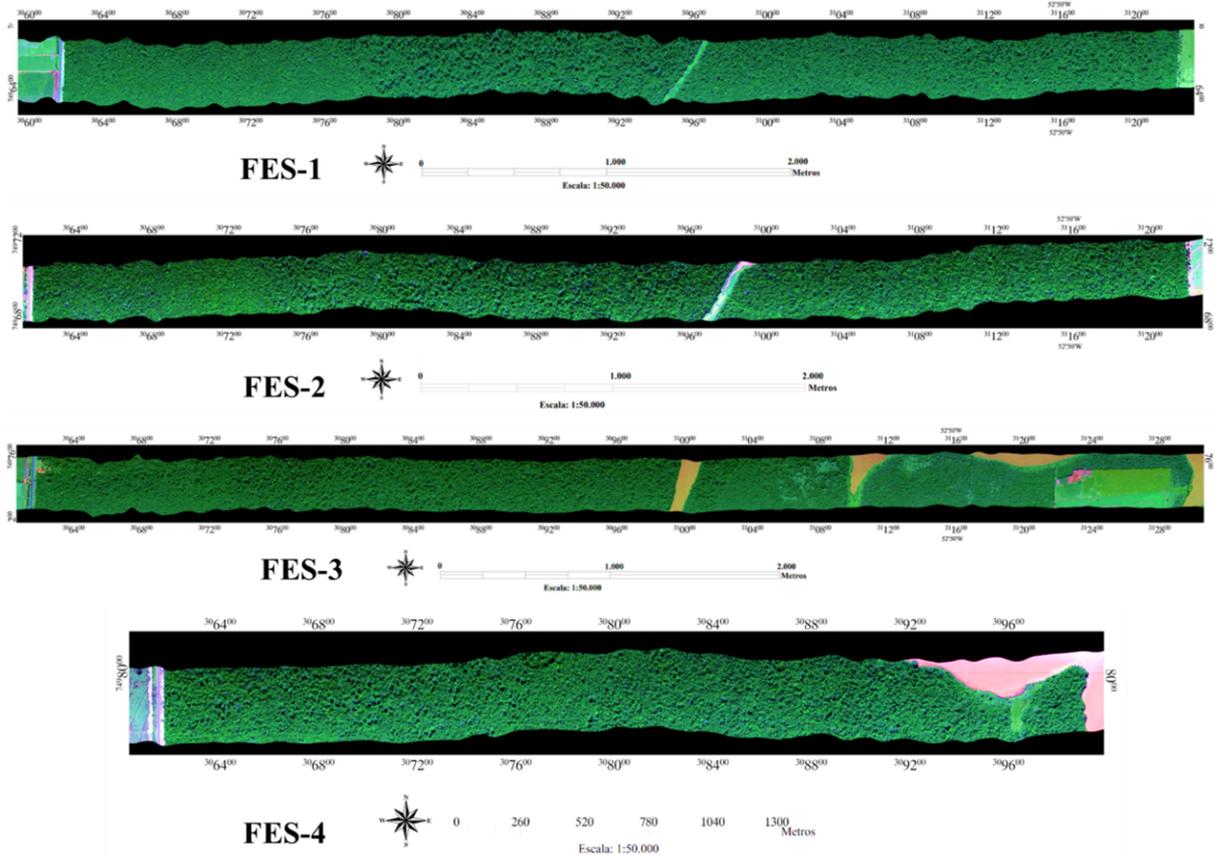


Figura 12. Imagens hiperespectrais obtidas com o sensor AisaFENIX (SPECIM) do dossel da Floresta Estacional Semidecidual, Estação Ecológica do Caiuá, Diamante do Norte, PR, Brasil (Zona 22K). (R = 638,65 nm, G = 549,38 nm, B = 453,98 nm).

Tabela 3. Especificações das imagens hiperespectrais utilizadas no presente estudo, coletadas com o sensor AisaFENIX (SPECIM) no dia 01/05/2016

Imagem	Altitude média do terreno (m)	Altitude média de voo (m)	Tamanho de <i>pixel</i> (m)	Ângulo Solar Zenital	Ângulo Solar Azimutal
FES-1	400,0	823,00	0,35	38,8°	348,6°
FES-2	400,0	780,00	0,35	38,4°	346,7°
FES-3	400,0	805,00	0,35	38,6°	345,2°
FES-4	400,0	796,00	0,35	38,9°	343,3°

3.2.4 Correções das imagens hiperespectrais geradas pelo sensor AisaFENIX

As imagens geradas pelo sensor aerotransportado foram corrigidas geométrica e radiometricamente no programa CaliGEO Pro 2.2 (SPECIM, 2013). A correção atmosférica foi realizada utilizando o programa ATCOR-4 (RICHTER e SCHLÄPFER, 2012), no qual

foram inseridos diversos parâmetros para a transformação dos dados de radiância em reflectância, tais como:

- Campo de visada (FOV): 32,3 graus;
- Número de *pixels* em toda a faixa imageada: informação específica para cada imagem gerada pelo sensor AisaFENIX;
- Número de bandas do sensor: 363 bandas;
- Fator de escala: 1.000, pois os arquivos foram radiometricamente corrigidos para radiância no CaliGeo nesta escala;
- Amplitude de altitude de voo: 1.000 a 3.000 metros. Apesar da altitude de voo ter sido inferior, o programa determina como altitude mínima 1.000m;
- Tipo de aerossol: rural;
- Zênite e Azimute solar: o cálculo da geometria é realizado pelo próprio programa, por meio das informações de data, hora e coordenadas do voo para cada imagem;
- Elevação do solo: 400m acima do nível do mar.

Durante a correção radiométrica, todas as imagens foram reamostradas para apresentarem resolução espacial final de 0,35m, o que não compromete sua qualidade. Esse fator está relacionado com a validação da correção atmosférica, realizada conforme Souza (2017), utilizando imagens que continham alvos padrões, como lonas de diversas colorações e uma placa de sulfato de bário (Figura 13). Contudo, as imagens foram obtidas na Universidade Estadual de Maringá (UEM, Paraná), e, conforme altitude do terreno, apresentaram tamanho de *pixel* de 0,35m, assim, como forma de padronização, as imagens utilizadas no presente estudo foram reamostradas radiometricamente.



Figura 13. Alvos padrões para a validação da correção atmosférica, imageados pelo sensor AisaFENIX no dia 01/05/2016, na Universidade Estadual de Maringá (UEM), Paraná, Brasil.

3.2.5 Georreferenciamento de espécies arbóreas nativas da FES

Após a obtenção das imagens referentes ao fragmento da FES, realizou-se levantamento a campo para identificação e georreferenciamento de indivíduos arbóreos componentes do estrato superior do dossel, a fim de localizá-los nas imagens hiperespectrais corrigidas.

Essa etapa do trabalho englobou nove espécies arbóreas, sendo elas, as mesmas sete espécies utilizadas na etapa anterior (caracterização espectral em escala de folha) e:

- farinha-seca (FSECA) (*Albizia niopoides* (Spruce ex Benth.) Burkart);
- jerivá (JERIV) (*Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Glassman).

Farinha-seca possui folhas recompostas e seus foliólulos não apresentam dimensões mínimas necessárias para a realização de leituras radiométricas utilizando o espectrorradiômetro acoplado ao acessório *Plant Probe*. Jerivá é uma palmeira pertencente à família Arecaceae, apresentando características fenotípicas de copa semelhantes à macaúba, sendo inserida nessa fase do estudo para fins comparativos.

O equipamento utilizado para georreferenciamento dos indivíduos das espécies selecionadas foi o receptor GPS Trimble GeoXM 2008, com precisão submétrica (0,5 metros), na projeção: UTM, Datum: WGS-84, Zona 22 K (Figura 14).

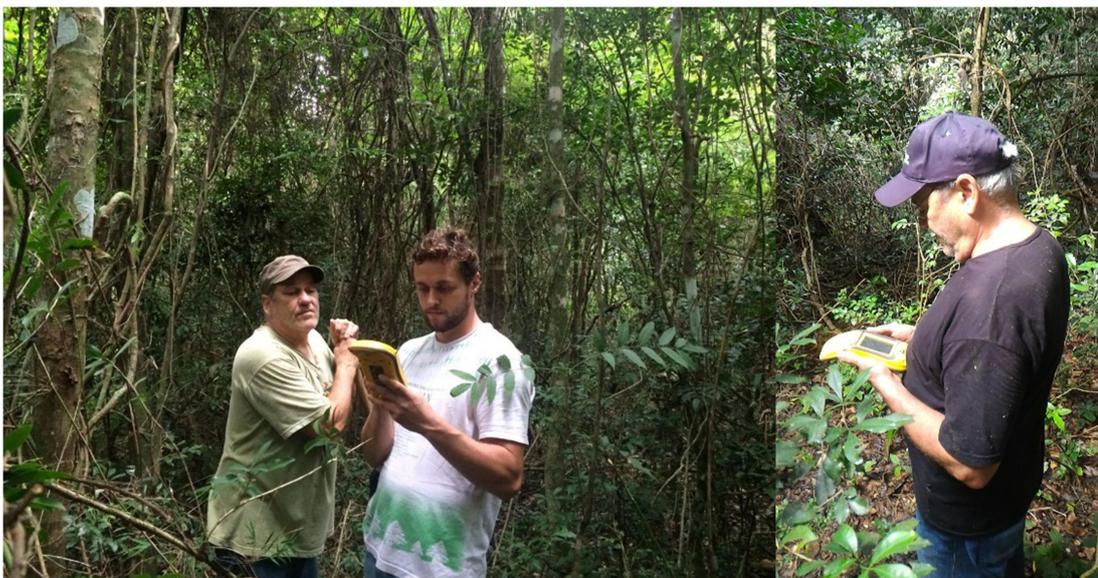


Figura 14. Georreferenciamento de espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual, Estação Ecológica do Caiuá. Diamante do Norte, PR, Brasil.

Os pontos coletados foram corrigidos utilizando o programa GPS Pathfinder Office versão 4.0 (Trimble), com auxílio de arquivos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC). A estação operacional utilizada foi a da cidade de Maringá, PR, Brasil (Figura 15).

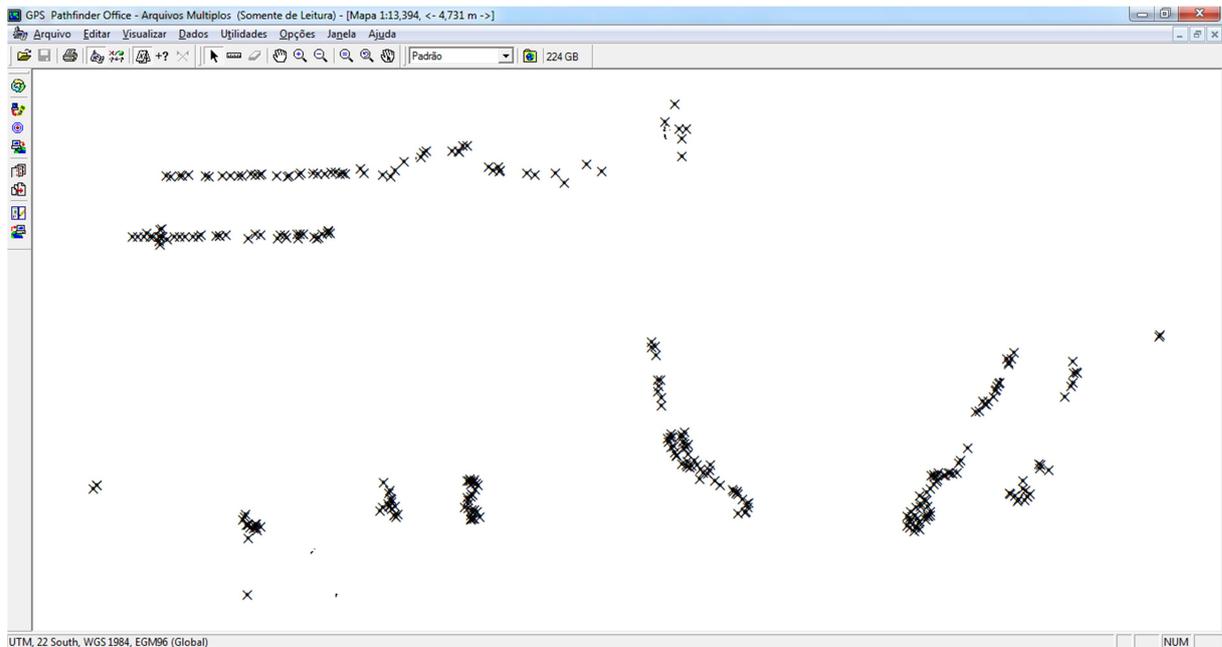


Figura 15. Pontos corrigidos no programa GPS Pathfinder Office

Os pontos de localização dos indivíduos amostrais foram plotados nas imagens geradas pela AisaFENIX, utilizando o programa ENVI® Classic, Versão 5.0 (ENVI, 2012). Após a localização de cada indivíduo nas imagens, curvas de reflectância referentes a *pixels* inseridos nas delimitações das copas foram coletadas, conforme esquema representado na Figura 16.

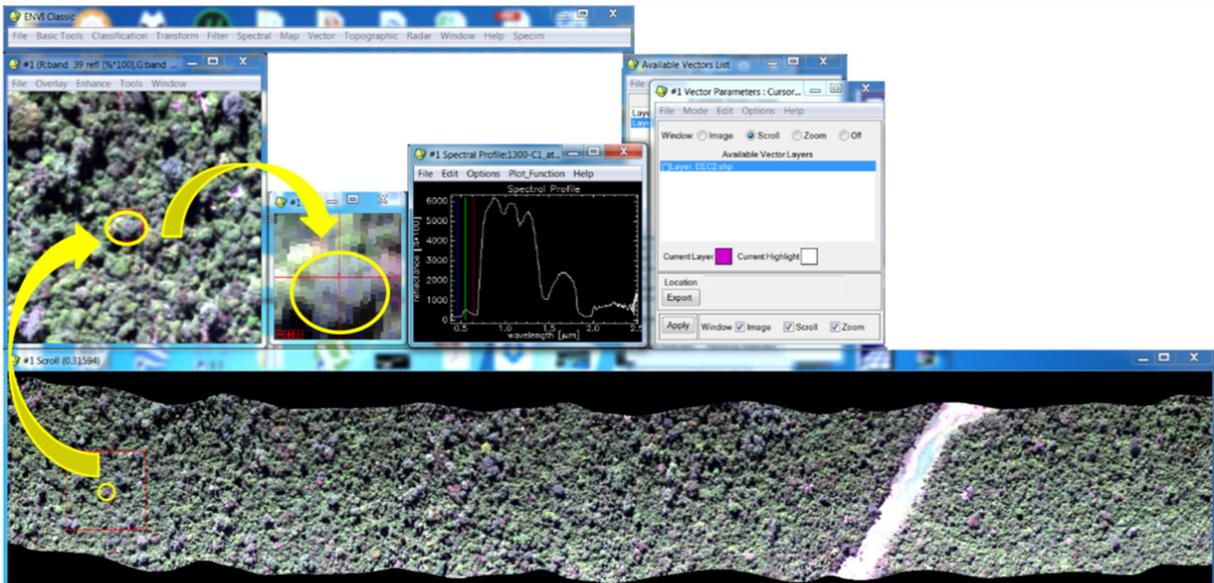


Figura 16. Coleta de dados de reflectância de copas utilizando imagens hiperespectrais geradas pelo sensor AisaFENIX (SPECIM) por meio do programa ENVI® Classic, Versão 5.0.

Fonte: adaptado de ENVI, 2012.

Para as análises estatísticas, algumas regiões com ruídos na curva espectral (379 – 447nm e 2.456 – 2.505nm) e as bandas de absorção da REM pela atmosférica (1.300 – 1.500nm e 1.750 – 2.000nm) foram eliminadas, resultando em dados de reflectância abrangendo a faixa do espectro eletromagnético entre 453 e 2.396nm (251 bandas espectrais), para dados obtidos com o sensor hiperespectral AisaFENIX.

3.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados de reflectância de folhas e *pixels* foram analisados nos programas Unscrambler® X 10.4.1 (CAMO, 2016) e SAS 8.2 (2001). As análises estatísticas foram realizadas em duas etapas:

- Discriminação de sete espécies arbóreas nativas da FES, utilizando dados de reflectância de folhas, coletados a campo com o espectrorradiômetro FieldSpec® 3 Jr (ASD);
- Discriminação de nove espécies arbóreas nativas da FES, utilizando dados de reflectância de *pixels*, coletados com o sensor hiperespectral AisaFENIX (SPECIM), por meio de aerolevanteamento.

Em todas as análises, o conjunto amostral foi dividido, de maneira aleatória, em dados de treinamento e dados de validação, ou seja, 70% das amostras participaram da

calibração e predição do modelo discriminante e 30% foram utilizadas para a sua validação externa.

Apesar de haver diversos métodos para a discriminação de indivíduos, métodos paramétricos foram utilizados no presente estudo por serem comumente empregados em análises de dados obtidos por meio de técnicas de SR, incluindo a discriminação de espécies vegetais, como mencionado previamente.

Dessa maneira, utilizando o programa Unscrambler®, após transformação dos dados por meio da análise de componentes principais (PCA), a análise discriminante foi realizada.

No programa SAS, a fim de estabelecer as variáveis preditoras que melhor discriminam as espécies arbóreas, utilizou-se o procedimento de seleção de dados STEPDISC, ao nível de 5% de probabilidade ($\alpha = 0,05$). Após essa seleção, o procedimento DISCRIM foi utilizado para a discriminação das espécies, o qual, segundo Afifi et al. (2004), possibilita a obtenção de coeficientes das equações discriminantes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA EM ESCALA DE FOLHA

As coletas de dados de reflectância em escala de folha resultaram no total de 794 amostras. A quantidade de indivíduos e amostras por espécie, assim como suas proporções no conjunto amostral são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Espécies, quantidade de indivíduos e total de amostras de folhas coletadas na Estação Ecológica do Caiuá, Diamante do Norte, PR, Brasil

Espécie	Total de indivíduos	Total de amostras	Proporção
CAPIX	25	249	0,31
ESPET	18	182	0,23
GARAP	3	40	0,05
GUARI	14	141	0,18
MACAU	5	51	0,06
PAUM	5	50	0,06
PEROB	5	81	0,11
Total	75	794	1,00

As leituras radiométricas de reflectância em folhas sadias foram realizadas utilizando o espectrorradiômetro ASD FieldSpec®3 Jr, sendo possível examinar visualmente diferenças nas curvas espectrais das amostras de uma mesma espécie (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

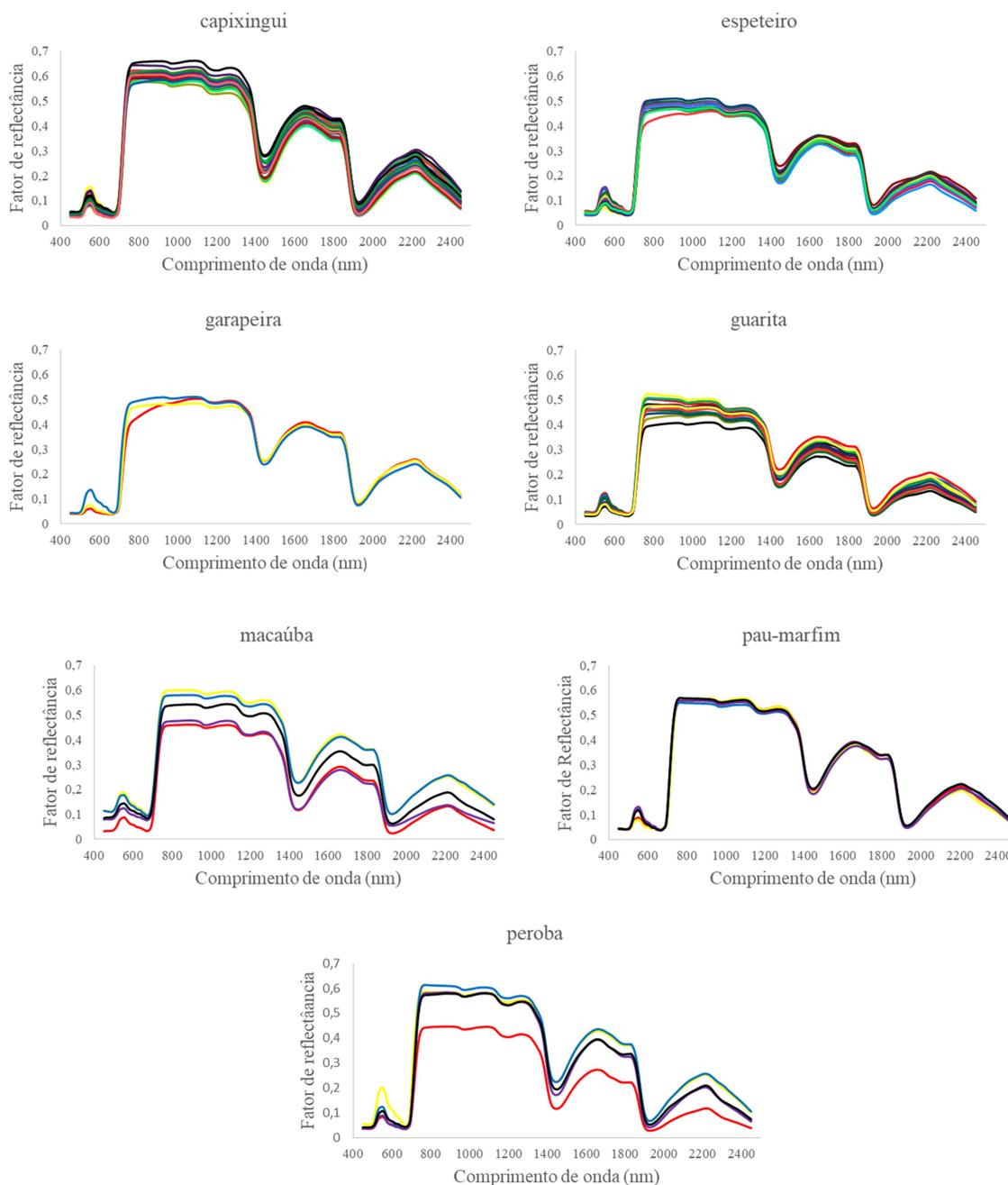


Figura 17: Curvas de reflectância médias de todas as folhas de cada indivíduo das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual, coletadas na Estação Ecológica Caiuá.

Os valores de reflectância máximos e mínimos referentes às regiões consideradas importantes no comportamento espectral de vegetais: azul (450 a 490nm); verde (490 a 620nm); vermelho (620 a 760nm); NIR (760 a 1.300nm); SWIR-1 (1.300 a 1.900nm); e SWIR-2 (1.900 a 2.450nm), das curvas espectrais das espécies coletadas neste estudo, estão sinteticamente demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores de reflectância máximo e mínimo (%) de folhas das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual, coletadas na Estação Ecológica do Caiuá.

Espécie	Azul	Verde	Vermelho	NIR	SWIR-1	SWIR-2
CAPIX	3,3 - 4,5	7,5 - 15,0	3,1 - 6,0	56,6 - 66,0	40,0 - 48,0	20,63 - 29,88
ESPET	4,0 - 5,4	7,0 - 14,0	4,1 - 6,0	45,6 - 50,8	32,6 - 36,2	16,19 - 21,19
GARAP	3,9 - 4,3	5,9 - 13,0	3,8 - 5,1	48,0 - 50,9	39,0 - 40,8	23,78 - 25,93
GUARI	3,1 - 4,6	6,6 - 11,6	3,3 - 4,8	40,6 - 50,1	27,0 - 35,0	13,04 - 20,38
MACAU	3,3 - 11,1	8,3 - 18,2	4,0 - 11,1	45,7 - 59,2	27,7 - 42,0	13,10 - 25,53
PAUM	3,9 - 4,1	7,4 - 12,3	3,9 - 4,2	54,0 - 56,4	37,2 - 39,1	19,58 - 22,20
PEROB	3,5 - 5,2	7,9 - 19,0	3,7 - 6,0	44,3 - 60,2	27,2 - 43,4	11,51 - 25,49

Analisando visualmente as curvas de reflectância das espécies utilizadas neste trabalho (Figura 17) e os valores dos intervalos de reflectância (Tabela 5), as espécies que apresentaram as maiores variações foram a macaúba para a região do azul e vermelho e a peroba para a região do verde, NIR, SWIR-1 e SWIR-2.

Uma vasta gama de fatores pode ocasionar esse tipo de variação entre os dados espectrais de folhas da mesma espécie, por exemplo, idade das plantas, arquitetura e composição química foliar, concentração de água, mudanças no mesófilo foliar, ataques por animais, insetos, fungos, necroses, etc., bem como os fatores ambientais, como mudanças no micro e macro clima, mudanças edáficas nas áreas de coletas das espécies, distribuição no dossel, entre outros (CLARK et al., 2005; PORTIGAL et al., 1997).

Contudo, apesar das curvas espectrais das espécies estudadas apresentaram variações intraespecíficas, quando comparadas às médias de cada espécie conjuntamente, é possível observar um comportamento espectral visualmente distinto, indicando possível sucesso na discriminação das espécies utilizando dados espectrais em escala de folha.

Na Figura 18, as curvas de reflectância média de cada espécie arbórea coletadas na EEC são plotadas.

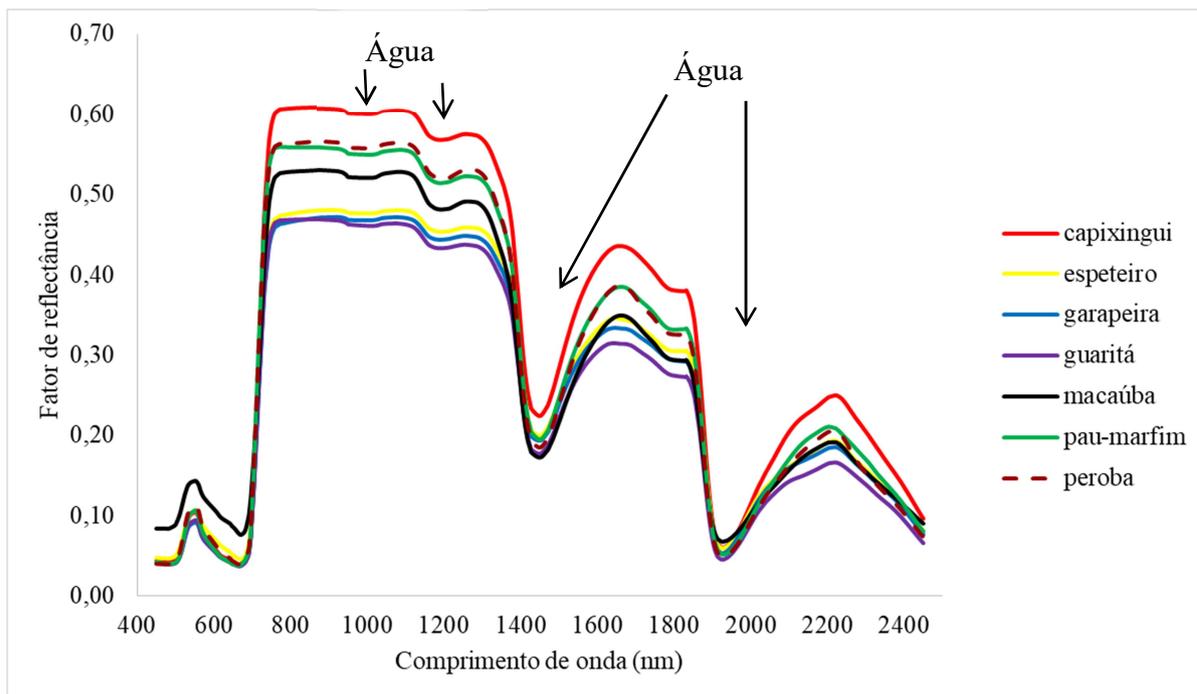


Figura 18. Médias das curvas de reflectância das espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual coletadas em escala de folha na Estação Ecológica do Caiuá.

Todas as curvas apresentaram comportamentos típicos de vegetação sadia: baixa reflectância na região do visível, entre 5 e 15%, devido à absorção da irradiância pela clorofila e outros pigmentos presentes nas folhas (regiões do azul e vermelho, 480 e 650nm, respectivamente) e um pico de reflectância ao redor de 560nm, que se refere à região verde do espectro; alta e constante reflectância no NIR (entre 40 a 60%) que está relacionada com a estrutura interna foliar (tamanho e formato das células e quantidade de espaços intercelulares no mesófilo) e aos mecanismos de equilíbrio energético, para que não aconteça o superaquecimento, impedindo a degradação foliar.

Verifica-se também nessa região, leves feições de absorção da REM em 980 e 1.200nm devido à presença de água na folha e, finalmente, no SWIR, é possível observar reflectâncias entre 30 e 40%, com depressões características de absorção pela água em 1.400 e 1.900nm (GAUSMAN, 1985; ROBERTS et al., 2004).

Esse comportamento espectral típico é reflexo da composição química e morfológica em comum das espécies vegetais que propiciam dados de reflectância altamente correlacionados (PRICE, 1992; PORTIGAL et al., 1997). Assim, e diferentemente de outros objetos de estudo da ciência do SR, como solos e água, a elaboração de bibliotecas espectrais da vegetação torna-se extremamente complexa.

No entanto, salienta-se que, apesar dessas espécies apresentarem comportamento espectral semelhante, pequenas variações entre suas composições químicas e morfológicas são refletidas em suas assinaturas espectrais (figura 18) e podem ser detectadas por meio de técnicas de sensoriamento remoto hiperespectral, proporcionando a discriminação de espécies.

4.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ESPÉCIES NATIVAS DA FES EM ESCALA DE FOLHA

Como mencionado no item Material e Métodos, dois conjuntos de métodos estatísticos foram utilizados para a discriminação das espécies da FES. Os resultados descritos separadamente encontram-se a seguir.

4.2.1 Classificação das espécies nativas da FES em escala de folha utilizando PCA seguida de análise discriminante

As componentes principais (PC) são computadas de forma ranqueada, de modo que a PC-1 é a que carrega maior quantidade de informações e a PC-2 englobará informações que não foram explicadas pela PC-1 e assim sucessivamente. Assim, a escolha da quantidade de PCs a serem utilizadas depende do nível de ruído que elas trazem para a análise (SAS, 2001).

A PCA aplicada a esse conjunto amostral demonstrou, preliminarmente, que duas PCs foram suficientes para a obtenção de 95% da variância total explicada, desse valor, 82% refere-se à PC-1 e 13% à PC-2. Contudo, para as análises subsequentes, decidiu-se utilizar cinco componentes principais que, de forma prospectiva, foram os que apresentaram melhores resultados para a análise discriminante, por englobarem informações importantes no refinamento dos resultados finais.

O gráfico de *Scores* representa a localização de cada amostra no novo plano de coordenadas formado pelas PCs, possibilitando análise de padrões e grupos. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, observa-se um padrão de distribuição dos *scores* referentes a todas as espécies, possibilitando a distinção de dois grandes blocos. Analisando as distribuições das amostras, nota-se que a garapeira apresenta um agrupamento com clara distinção das demais espécies. Por outro lado, não se observa um padrão de agrupamento para peroba e macaúba. As demais espécies apresentam-se agrupadas, porém sobrepostas umas às outras.

No mesmo gráfico (*Scores*), a elipse representada refere-se ao teste Hotelling T^2 ($\alpha=0,05$). As amostras que não estão inseridas nesta elipse provavelmente são *outliers*.

Contudo, esta avaliação deve ser feita conjuntamente com o gráfico de Influência (Figura 20), que demonstra limites para o parâmetro Leverage e teste F-resíduos. O teste F-resíduos demonstra como as amostras se encaixam no modelo, ou seja, amostras com elevado resíduo não são bem descritas pelo modelo. Leverage é uma medida de quão extremo um conjunto de dados é comparado à maioria (CAMO, 2006), assim, é possível verificar se uma amostra influencia o modelo.

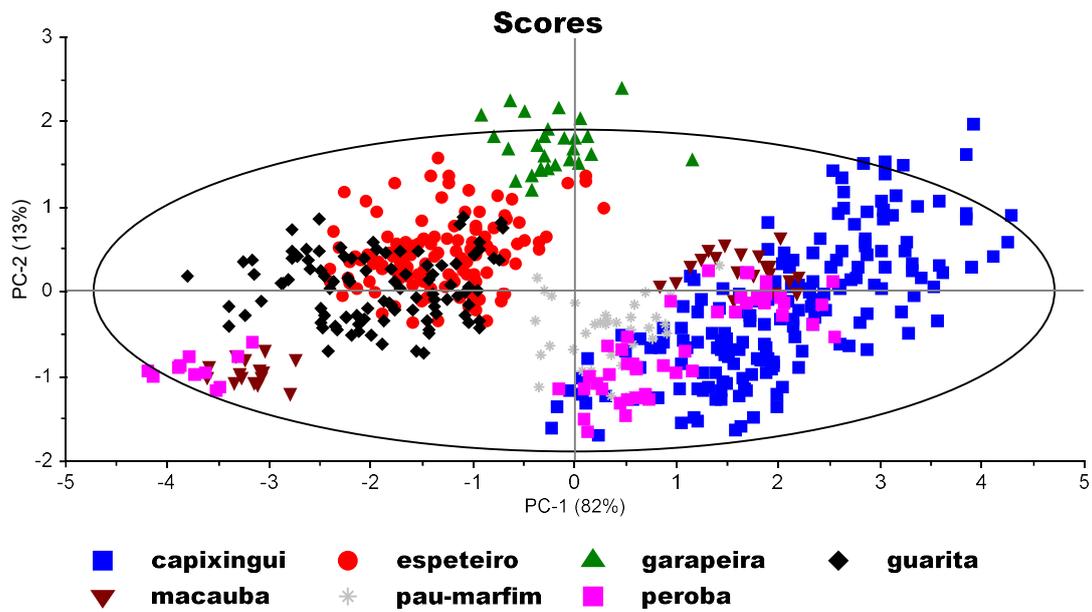


Figura 19: Gráfico demonstrando estrutura dos dados e padrões de distribuição ao longo das duas primeiras componentes principais.

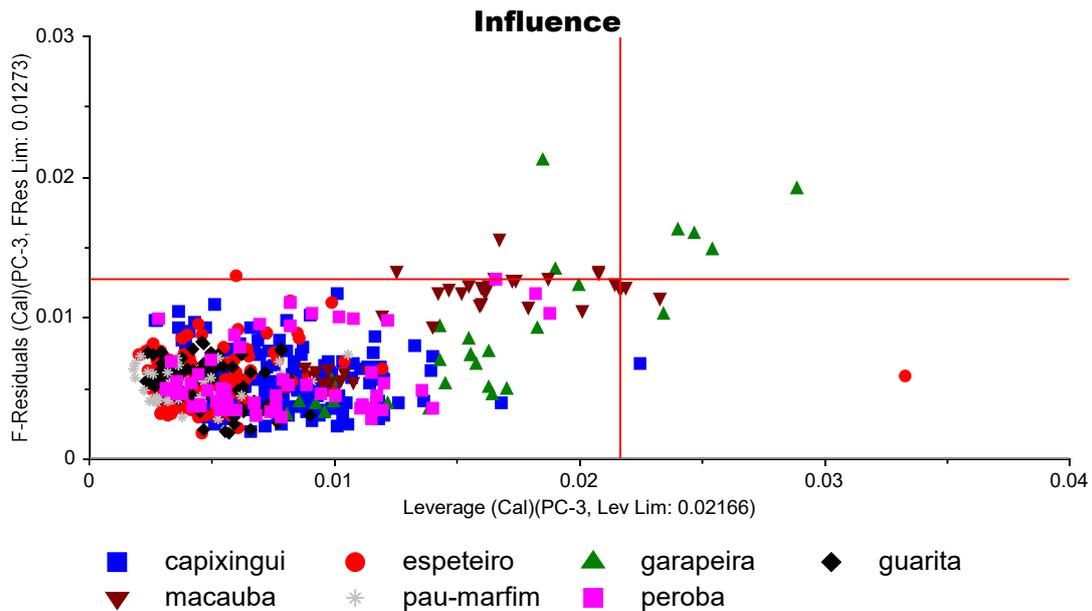


Figura 20. Gráfico demonstrando o impacto que cada amostra tem sobre modelo.

No gráfico de *Scores*, é possível observar que algumas amostras estão no limite exterior da elipse de Hotelling T^2 (Figura 19). Na análise desses dados, associadamente com o gráfico de Influência (Figura 20), nota-se que algumas amostras referentes à espécie garapeira possuem altos valores para o teste F-resíduo e Laverege, demonstrando que esses dados podem ser tendenciosos na calibração do modelo discriminante.

Neste contexto, para avaliar as observações constatadas com base nos resultados da PCA, a análise discriminante foi realizada utilizando cinco componentes principais e todo o conjunto amostral de treinamento.

O modelo discriminante quadrático proporcionou a precisão global de 85,35% na discriminação de espécies na fase de treinamento (Figura 21 e Tabela 6). A validação externa do modelo calibrado resultou em 182 amostras classificadas corretamente (67,55%), de um total de 240 amostras (Tabela 7).

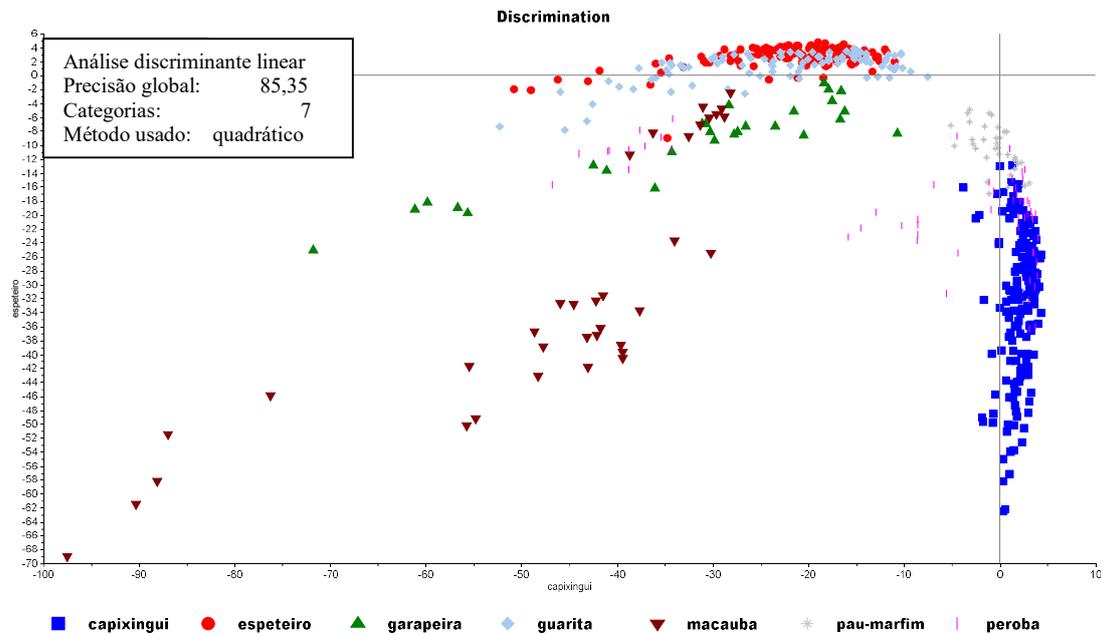


Figura 21. Gráfico representativo da fase de treinamento da análise discriminante quadrática realizada a partir de dados de reflectância de folhas das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual.

Tabela 6. Resultados da fase de treinamento da análise discriminante quadrática de dados de reflectância de folhas das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual, realizada a partir de cinco componentes principais

Treinamento (70%)								
	CAPIX	ESPET	GARAP	GUARI	MACAU	PAUM	PEROB	Média
Acertos	163 93,68%	103 92,79%	28 100%	93 80,87%	36 83,72%	35 76,08%	26 70,27%	85,35%
Erros	11 6,32%	8 7,21%	0	22 19,13%	7 16,28%	11 23,92%	11 29,73%	14,65%
Total	174	111	28	115	43	46	37	554

Tabela 7. Resultados da validação externa da análise discriminante quadrática de dados de reflectância de folhas das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual, realizada a partir de cinco componentes principais

Validação Externa (30%)								
	CAPIX	ESPET	GARAP	GUARI	MACAU	PAUM	PEROB	Média
Acertos	67 89,33%	51 92,73%	2 16,67%	26 61,90%	15 93,75%	12 80,00%	10 38,46%	67,55%
Erros	8 10,67%	4 7,27%	10 83,33%	16 38,10%	1 6,25%	3 20,00%	16 61,54%	32,45%
Total	75	55	12	42	16	15	26	240

A validação externa do modelo discriminante gerado demonstrou que somente as espécies capixingui, espeteiro, guaritá, macaúba e pau-marfim foram classificadas satisfatoriamente. As demais espécies, mesmo apresentando resultados satisfatórios na fase de treinamento, demonstraram elevada porcentagem de erro quando submetidas à validação externa, evidenciando que o modelo não engloba todas as informações necessárias para a discriminação das sete espécies deste estudo.

Castro-Esau et al. (2004) demonstraram ser possível a distinção entre lianas e espécies arbóreas do fragmento florestal inserido no Parque Natural Metropolitano, Panamá, utilizando PCA e métodos discriminantes paramétricos e não-paramétricos.

Campos (2017) também avaliou a função discriminante quadrática como método classificador, após a transformação de dados por meio da PCA, para a discriminação de espécies nativas da FES e da exótica eucalipto, obtendo acurácia de 95,40% na classificação. Contudo, em ambos os estudos, apenas duas classes foram previamente definidas (lianas e arbóreas; nativas e exótica).

4.2.2 Classificação das espécies nativas da FES em escala de folha utilizando o procedimento STEPDISC (SAS) e LDA

Inicialmente, os dados de reflectância de folhas gerados pelo espectrorradiômetro FieldSpec®3 Jr apresentavam 2.001 variáveis (bandas espectrais). Deste total, 357 variáveis foram selecionadas pelo procedimento STEPDISC do sistema SAS, ao nível de significância de 5%.

Das 357 bandas selecionadas: 14,85% estão inseridas na região do Vis (450 – 760nm), estas estão relacionadas com as faixas do azul (3 bandas), verde (21 bandas) e vermelho (29 bandas); 12,60% no NIR (760 – 1.300nm); e 72,55% no SWIR (1.300 – 2.450nm).

Após a seleção das variáveis preditoras, o procedimento DISCRIM, do sistema SAS, classificou as amostras dentro das sete classes previamente determinadas, utilizando a função discriminante linear. Na Tabela 8, os resultados referentes ao critério discriminante, ou seja, dos valores do quadrado da distância generalizada são apresentados.

Tabela 8. Quadrado das distâncias euclidianas generalizadas entre as espécies, geradas pela LDA, após seleção de variáveis preditoras pelo procedimento STEPDISC (SAS)

Espécie	CAPIX	ESPET	GARAP	GUARI	MACAU	PAUM	PEROB
CAPIX	0	929,85	825,57	817,85	1.184,00	1.242,00	540,11
ESPET	929,85	0	548,91	320,89	815,82	994,61	769,57
GARAP	825,57	548,91	0	541,48	1.166,00	1.189,00	879,59
GUARI	817,85	320,89	541,48	0	1.146,00	1.156,00	941,29
MACAU	1.184,00	815,82	1.166,00	1.146,00	0	1.355,00	674,67
PAUM	1.242,00	994,61	1.189,00	1.156,00	1.355,00	0	747,30
PEROB	540,11	769,57	879,59	941,29	674,67	747,30	0

Coleman e Montgomery (1987) descreveram que quanto maior for a distância entre classes, melhor será a discriminação, por outro lado, quando os valores entre classes são próximos a zero, maior é a probabilidade de ocorrerem erros de classificação. Por meio desses resultados (Tabela 8), pode-se observar um alto valor do quadrado da distância generalizada entre as classes, ficando em evidência sua alta probabilidade de discriminação, utilizando esse conjunto de métodos estatísticos.

Dessa forma, a Tabela 9 resume a porcentagem total de discriminação de cada classe de espécies arbóreas nativas da FES utilizando dados de treinamento (70%) para a calibração das funções discriminantes lineares.

Tabela 9. Resumo da fase de treinamento (70%) da análise discriminante linear, após seleção de variáveis preditoras (STEPDISC/SAS), utilizando dados de reflectância de folha de espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual

Espécie ¹	CAPIX	ESPET	GARAP	GUARI	MACAU	PAUM	PEROB	Total ²
CAPIX	188	0	0	0	0	0	0	188 ²
	100 ³	0	0	0	0	0	0	100
ESPET	0	122	0	0	0	0	0	122
	0	100	0	0	0	0	0	100
GARAP	0	0	27	0	0	0	0	27
	0	0	100	0	0	0	0	100
GUARI	0	0	0	92	0	0	0	92
	0	0	0	100	0	0	0	100
MACAU	0	0	0	0	38	0	0	38
	0	0	0	0	100	0	0	100
PAUM	0	0	0	0	0	32	0	32
	0	0	0	0	0	100	0	100
PEROB	0	0	0	0	0	0	57	57
	0	0	0	0	0	0	100	100
Total ⁴	188	122	27	92	38	32	57	556

¹espécie arbórea nativa da FES; ²total de amostras; ³porcentagem de erro e acerto de cada classe; ⁴total de observações estimadas para cada classe.

Os resultados obtidos na fase de calibração da LDA demonstram que 100% das amostras, de todas as espécies, foram discriminadas corretamente, corroborando os dados da tabela 8, em que se observa altos valores para o quadrado da distância generalizada entre as classes.

Na tabela 10, as porcentagens de discriminação para cada espécie, na fase de validação externa do modelo discriminante estimado, são apresentadas.

Tabela 10. Resumo da validação externa (30%) da análise discriminante linear, após seleção de variáveis preditoras (STEPDISC/SAS), utilizando dados de reflectância de folha de espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual.

Espécie ¹	CAPIX	ESPET	GARAP	GUARI	MACAU	PAUM	PEROB	Total ²
CAPIX	61	0	0	0	0	0	0	61
	100 ³	0	0	0	0	0	0	100
ESPET	0	60	0	0	0	0	0	60
	0	100	0	0	0	0	0	100
GARAP	0	0	13	0	0	0	0	13
	0	0	100	0	0	0	0	100
GUARI	0	0	0	49	0	0	0	49
	0	0	0	100	0	0	0	100
MACAU	0	0	0	0	13	0	0	13
	0	0	0	0	100	0	0	100
PAUM	0	0	0	0	0	18	0	18
	0	0	0	0	0	100	0	100
PEROB	0	0	0	0	0	0	24	24
	0	0	0	0	0	0	100	100
Total ⁴	61	60	13	49	13	18	24	238

¹espécie arbórea nativa; ²total de amostras; ³percentagem de erro e acerto de cada classe; ⁴total de observações estimadas para cada classe.

Como demonstrado na tabela 10, assim como na fase de calibração do modelo discriminante, todas classes foram discriminadas com 100% de precisão na fase de validação externa. Dessa forma, o modelo gerado pela análise discriminante linear é preciso para a classificação dessas espécies arbóreas nativas da FES, a partir de dados hiperespectrais de reflectância de folhas.

Clark et al. (2005) obtiveram resultados extremamente satisfatórios utilizando LDA combinada com seleção de bandas, para a classificação de sete espécies da FT costa-riquenha, obtendo, também, 100% de precisão na classificação de dados hiperespectrais coletados a partir de folhas.

Castro-Esau et. al. (2006) ampliaram a constatação da possibilidade de utilização de dados hiperespectrais em escala de folha para classificação de diversas espécies arbóreas coletadas em diferentes ambientes tropicais. Em Los Horizontes, Costa Rica, 4 e 9 espécies foram discriminadas com precisões de 100 e 93,63%, respectivamente. O mesmo sucesso foi constatado para 10 espécies coletadas no Parque Natural Metropolitano, Panamá, 15 espécies (Fort Sherman, Panamá) e 27 espécies (Chamela-Cuixmala, México), nos quais as precisões globais de discriminação foram de 95,74%, 97,33% e 90,31%, respectivamente.

Em estudo realizado na Estação Biológica La Selva, Costa Rica, Clark e Roberts (2012) registraram 86,8% de exatidão global para escala foliar e 84,9% de exatidão global, utilizando folhas mais as cascas das árvores.

Ferreira et. al. (2013), após selecionarem bandas espectrais relevantes para a discriminação de 7 espécies arbóreas, em escala de folha, também obtiveram elevada acurácia (96,20%) por meio do classificador LDA.

Outros autores constataram o mesmo potencial de classificação de espécies vegetais, a partir de dados espectrorradiométricos, utilizando o método paramétrico LDA (CUSHNAHAN et al., 2016; DURGANTE et. al., 2013; PU, 2008), corroborando com os resultados obtidos no presente estudo, no qual 7 espécies nativas da FES foram totalmente discriminadas (100% de acurácia) após seleção de variáveis preditoras e LDA.

4.3 CLASSIFICAÇÃO EM ESCALA DE *PIXEL*

As coletas de dados de reflectância de *pixels*, a partir de imagens hiperespectrais geradas pelo sensor aerotransportado AisaFENIX (SPECIM) resultaram em um total de 2.511 amostras. A quantidade de indivíduos e amostras por espécie, assim como suas proporções no conjunto amostral, são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11. Espécies, quantidade de indivíduos e total de amostras de *pixels* coletados a partir de imagens hiperespectrais geradas pelo sensor aerotransportado AisaFENIX (SPECIM)

Espécie	Total de indivíduos	Total de amostras	Proporção
CAPIX	39	387	0,15
ESPET	42	415	0,16
FSECA	20	198	0,09
GARAP	22	220	0,09
GUARI	39	390	0,15
JERIV	9	90	0,04
MACAU	17	170	0,06
PAUM	16	157	0,07
PEROB	49	484	0,19
Total	253	2.511	1,00

A Figura 22 apresenta a localização georreferenciada dos indivíduos amostrados nesta fase do estudo.

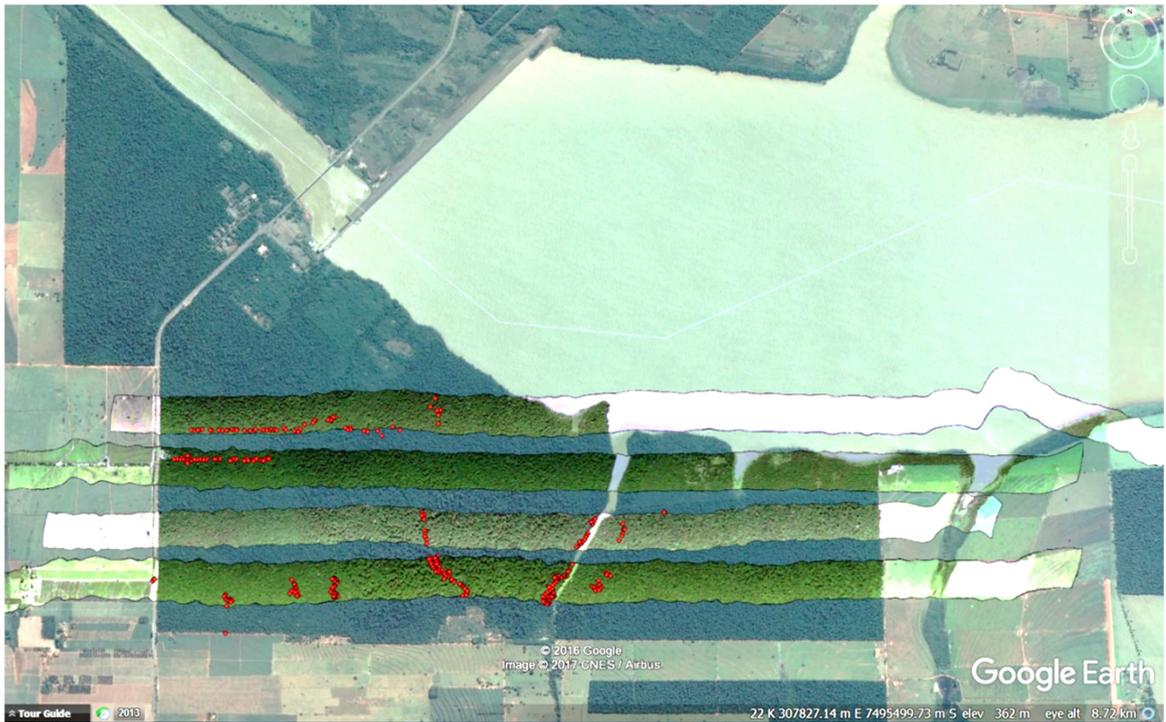


Figura 22. Pontos em destaque representam a localização dos indivíduos arbóreos da Floresta Estacional Semidecidual, Estação Ecológica do Caiuá, inseridos nas imagens hiperespectrais geradas pelo sensor AisaFENIX (SPECIM).
Fonte: Google Earth, 2016.

As curvas de reflectância média de *pixels*, para cada indivíduo, são apresentadas na Figura 23, de modo que as variações visuais para a mesma espécie também são observadas.

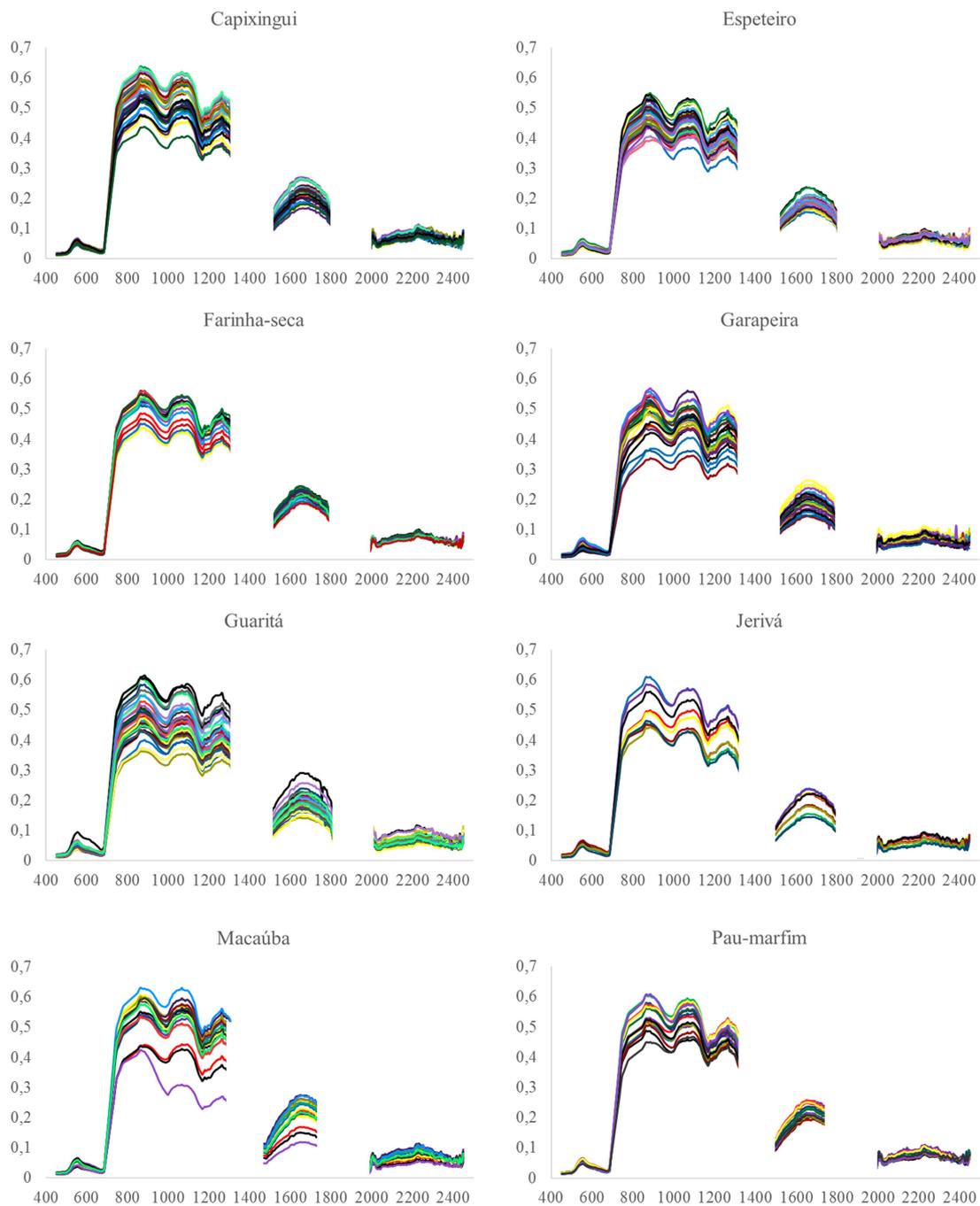


Figura 23. Curvas espectrais das espécies coletadas pelo sensor hiperespectral aerotransportado AisaFENIX.

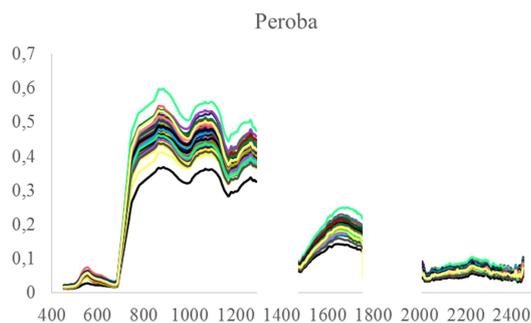


Figura 23 Cont. Curvas espectrais das espécies coletadas pelo sensor hiperespectral aerotransportado AisaFENIX.

Os valores de reflectância máximos e mínimos referentes às regiões do azul, verde, vermelho, NIR, SWIR-1 e SWIR-2 estão sinteticamente demonstrados na Tabela 12.

Tabela 12. Valores de reflectância máximo e mínimo da curva das espécies da Floresta Estacional Semidecidual coletadas na Estação Ecológica Caiuá

Espécie	Azul	Verde	Vermelho	NIR	SWIR-1	SWIR-2
CAPIX	1,3 – 2,2	4,3 – 6,4	2,1 – 3,4	40,1 – 61,3	16,6 – 27,0	6,07 – 9,60
ESPET	1,1 – 2,6	3,5 – 6,3	1,8 – 3,8	36,4 – 52,5	15,4 – 23,8	5,46 – 8,46
FSECA	1,2 – 2,1	4,4 – 6,0	1,9 – 3,3	41,8 – 54,1	18,7 – 24,4	6,65 – 8,26
GARAP	1,0 – 2,3	2,8 – 6,8	1,8 – 3,5	33,6 – 55,1	14,4 – 26,3	5,14 – 9,81
GUARI	1,2 – 2,4	3,6 – 9,1	1,9 – 4,9	35,1 – 57,6	14,4 – 29,1	4,94 – 10,24
JERIV	1,2 – 2,3	4,3 – 6,4	1,9 – 3,6	42,3 – 56,5	14,4 – 23,9	5,00 – 8,37
MACAU	1,3 – 2,0	3,5 – 6,2	1,8 – 3,3	30,7 – 62,3	11,9 – 27,5	4,97 – 9,75
PAUM	1,5 – 2,1	4,4 – 6,2	2,1 – 3,1	45,3 – 58,8	19,3 – 25,8	6,55 – 9,34
PEROB	1,3 – 2,5	2,7 – 7,1	1,9 – 3,7	37,7 – 55,4	14,3 – 24,7	5,00 – 9,05

Analisando visualmente os dados de reflectância de *pixels* das nove espécies caracterizadas nessa fase (Figura 23) e os valores dos intervalos de reflectância registrados na tabela 12, as espécies que apresentaram maiores variações foram: espeteiro, para a região do azul; guaritá, para a região do verde, vermelho e SWIR-2; e macaúba, para a região do NIR e SWIR-1.

De acordo com Asner (1998) e Clark et al. (2005), coletas em escala de *pixel* são influenciadas por diversos fatores, tais como adicional vegetativo (folhas, flores, frutos, ramos, caules, tronco, epífitas, lianas, plantas de subosque etc.) e componentes não vegetativos (solo,

água, atmosfera etc.) que interferem de modo importante no processo de coleta dos dados espectrais.

A Figura 24 apresenta as médias de todos os dados de reflectância de *pixels*, para cada espécie identificada nas quatro imagens geradas pelo sensor AisaFENIX, do dossel da FES-EEC.

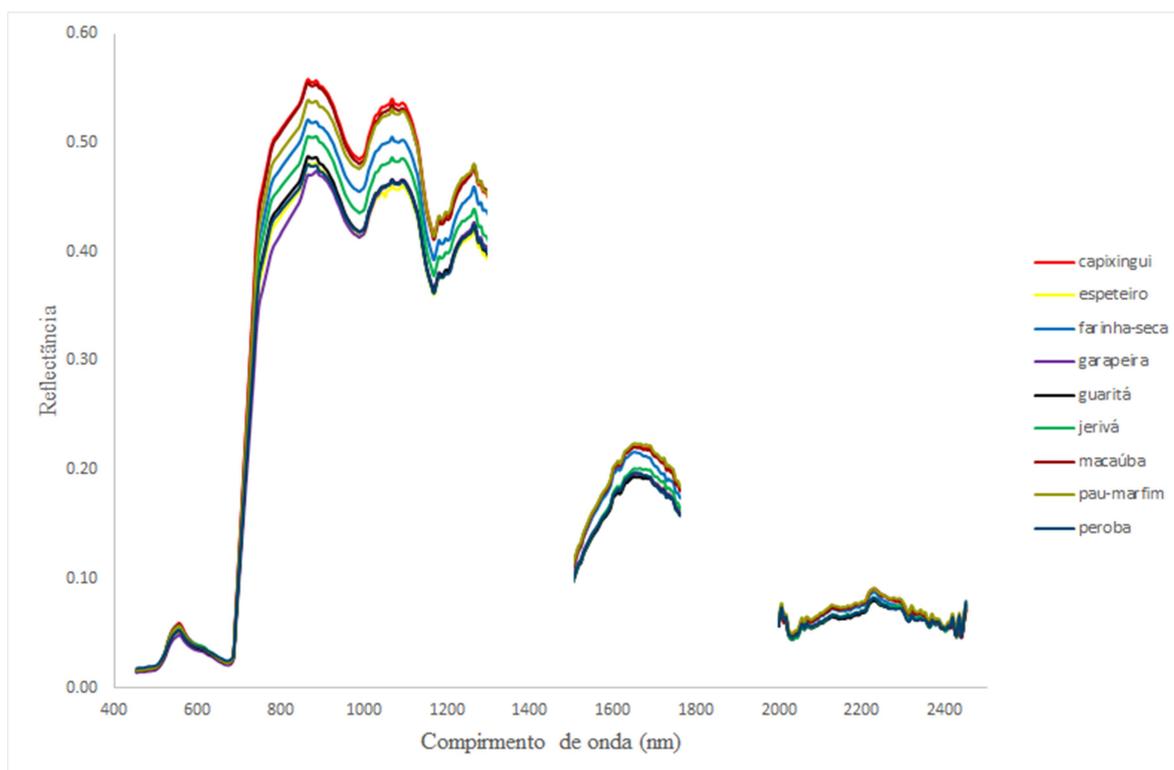


Figura 24. Curvas de reflectância média de espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual, coletadas em escala de *pixel* a partir de imagens hiperespectrais geradas pelo sensor AisaFENIX (SPECIM).

As curvas espectrais coletadas em escala de *pixel* seguem um padrão semelhante às de reflectâncias de folha. Observa-se que as inflexões relacionadas à água, ao redor de 980 e 1.200nm, são mais acentuadas, como constatado por Campos (2017), além disso, Clark et al. (2005). Roberts et al. (2004) verificaram que a distribuição e a densidade dos tecidos de copa são fatores que influenciam o espalhamento da radiação no campo de visada de sensores hiperespectrais, interferindo nas respostas espectrais relacionadas a fatores bioquímicos.

Ademais, dados coletados a nível suborbital estão sujeitos a interferências atmosféricas, especialmente umidade – mesmo minimizando este fator por meio de correções – as quais também acarretam valores de reflectância menores ao longo de todo o espectro, quando comparados a dados de folha.

Observando a figura 24, detectou-se visualmente ruídos na região da curva espectral SWIR-2. Para avaliar se estes ruídos poderiam interferir na discriminação dessas espécies, testes prospectivos foram realizados para verificar a influência de cada região no processo. Dessa forma, procederam-se análises excluindo as regiões do SWIR-1, SWIR-2 e ambas, assim, se pôde constatar que o melhor resultado foi obtido quando todas regiões da curva espectral foram utilizadas.

Van Aardt e Wynne (2001) demonstraram que as regiões Vis, NIR e SWIR-1 são úteis para discriminar espécies de coníferas e angiospermas em floresta temperada, ao usar dados hiperespectrais *in situ* na escala de copa (lados ensolarados de copas).

Asner et al. (2008), utilizando dados do SWIR, associados com o conteúdo de água e arquitetura de copa, discriminaram espécies exóticas invasoras de não invasoras através de diferenças no SWIR.

Ferreira et al. (2016) obtiveram precisões globais maiores de discriminação de árvores da FES quando incorporaram dados SWIR em relação a resultados, utilizando somente o Vis e NIR, demonstrando a importância dessa faixa do espectro eletromagnético, principalmente nas regiões próximas a 1.700, 2.100 e 2.300 nm.

Dessa forma, assim como mencionado por Rivard et al. (2009) e Clark et al. (2005), ao constatarem diferenças significativas entre espécies vegetais na região do SWIR, estudos são necessários para melhor compreensão das respostas espectrais nessa região e sua influência na discriminação de espécies utilizando dados hiperespectrais.

4.3.1 Classificação das espécies nativas da FES em escala de *pixel* utilizando PCA seguida de análise discriminante

Para a classificação de espécies nessa etapa, tal como em escala de folha, cinco componentes principais, que explicaram 99% da variância total contida nos dados, foram utilizados.

No gráfico de *Scores* (Figura 25), não foi possível observar padrões de agrupamentos representativos das espécies, indicando dificuldades na discriminação.

Analisando as amostras localizadas fora da elipse (teste Hotelling T^2), conjuntamente ao gráfico de Influência (Figura 26), conclui-se que nenhum dado é caracterizado como *outlier* influente (altos valores para F-resíduos e Leverage simultaneamente), mantendo, assim, todos os dados para análise discriminante.

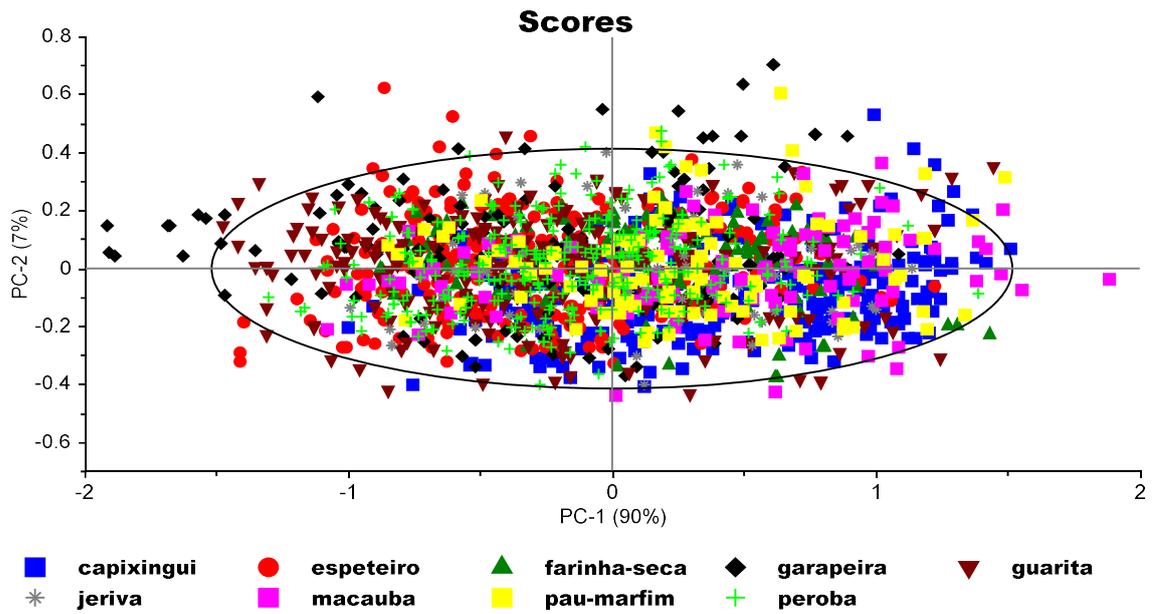


Figura 25. Gráfico demonstrando estrutura dos dados e padrões de distribuição ao longo das duas primeiras componentes principais.

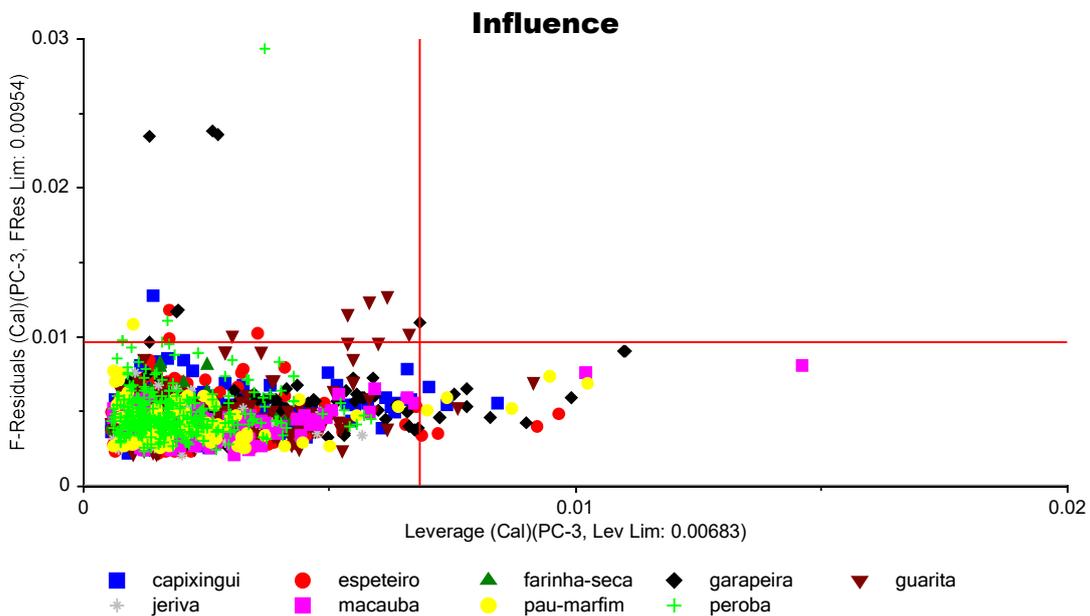


Figura 26. Gráfico demonstrando o impacto que cada amostra tem sobre o modelo.

Posteriormente à análise dos resultados da PCA, a análise discriminante quadrática para as 1.756 amostras de treinamento foi realizada, utilizando 5 PCs. A acurácia na discriminação das classes foi de 34,25% (Figura 27 e Tabela 13), de modo que somente 589 amostras foram classificadas corretamente. Já na validação externa do modelo gerado (Tabela

14), das 755 amostras, 193 foram corretamente classificadas, e 562 erroneamente (precisão de 27,75%).

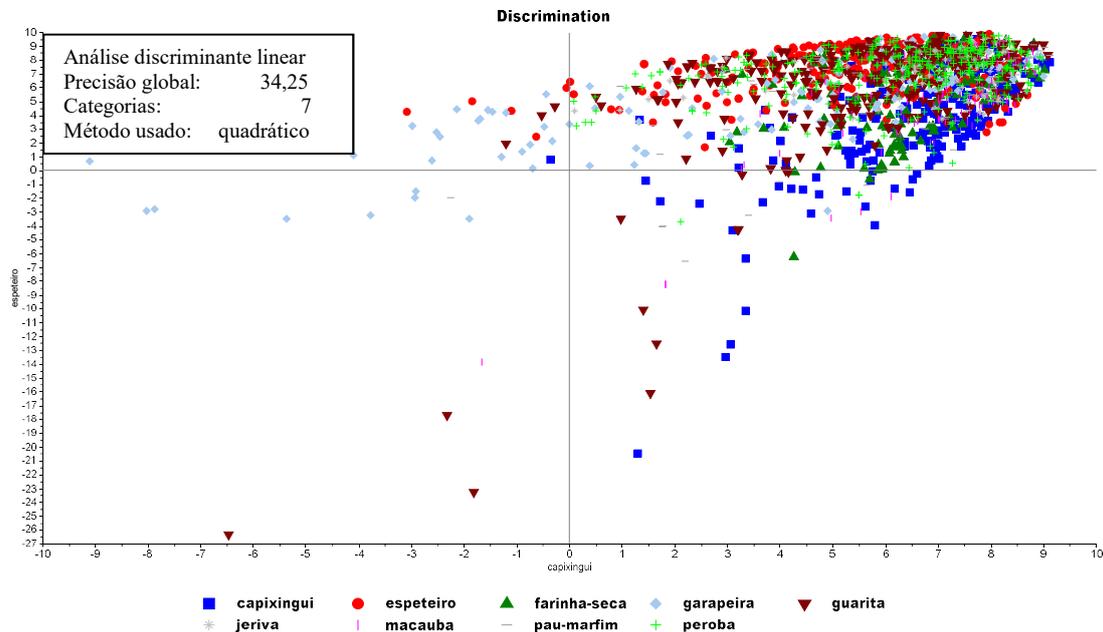


Figura 27. Gráfico representativo da fase de treinamento da análise discriminante quadrática realizada a partir de dados de reflectância de *pixels* das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual.

Tabela 13. Resultados da fase de treinamento da análise discriminante quadrática de dados de reflectância de *pixels* das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual, realizada a partir de cinco componentes principais

TREINAMENTO (70%)										
	CAPIX	ESPET	FSECA	GARAP	GUARI	JERIV	MACAU	PAUM	PEROB	Média
Acertos	66 47,48%	134 42,14%	88 42,51%	75 33,94%	42 39,62%	36 13,00%	64 26,34%	19 22,89%	65 40,37%	34,25%
Erros	73 52,52%	184 57,86%	120 57,69%	146 66,0%	64 60,38%	241 87,00%	179 73,66%	64 77,11%	96 59,63%	65,75%
Total	139	318	207	221	106	177	243	83	161	1.756

Tabela 14. Resultados da validação externa da análise discriminante quadrática de dados de reflectância de *pixels* das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual, realizada a partir de cinco componentes principais

VALIDAÇÃO EXTERNA (30%)										
	CAPIX	ESPET	FSECA	GARAP	GUARI	JERIV	MACAU	PAUM	PEROB	Média
Acertos	28 24,14%	41 23,80%	17 28,81%	24 36,36%	7 5,98%	4 14,81%	17 32,08%	7 14,89%	48 33,10%	27,78%
Erros	88 75,86%	84 67,20%	42 71,19%	42 63,64%	110 94,02%	23 85,19%	36 67,92%	40 85,11%	97 66,10%	75,22%
Total	116	125	59	66	117	27	53	47	145	755

Como observado nos resultados das tabelas 13 e 14, com erro superior a 75% na validação do modelo, fica evidente que a utilização da PCA, seguida da análise discriminante quadrática, não obteve boa separabilidade entre as espécies do estudo, a partir de dados de reflectância obtidos por meio de imagens hiperespectrais geradas pelo sensor AisaFENIX.

4.3.2 Classificação das espécies nativas da FES em escala de *pixel* utilizando o procedimento STEPDISC (SAS) e LDA

Inicialmente, os dados de reflectância de folhas, gerados pelo sensor AisaFENIX, apresentavam 251 bandas espectrais. Deste total, 100 foram selecionadas pelo procedimento STEPDISC, do sistema SAS, ao nível de significância de 5%.

Das 100 bandas selecionadas, 22% estão inseridas na região do Vis (450 – 760nm), estas estão relacionadas com as faixas do azul (5 bandas), verde (7 bandas) e vermelho (10 bandas), 30% no NIR (760 – 1.300nm) e 48% no SWIR (1.300 – 2.450nm). Esses resultados evidenciam a importância do SWIR na discriminação de espécies arbóreas a partir de dados gerados por espectroscopia de imageamento, como mencionado anteriormente.

Assim, após a seleção das variáveis preditoras (100 bandas), o procedimento DISCRIM (SAS) classificou as amostras dentro das nove classes previamente determinadas, a partir do modelo paramétrico linear.

Na Tabela 15, os resultados referentes aos valores do quadrado da distância generalizada gerados pela LDA são apresentados.

Tabela 15. Quadrado das distâncias generalizadas entre as espécies, geradas pela LDA, após seleção de variáveis preditoras pelo procedimento STEPDISC (SAS)

Espécie	CAPIX	ESPET	FSECA	GARAP	GUARI	JERIV	MACAU	PAUM	PEROB
CAPIX	0	6,81	6,57	10,95	6,04	10,46	4,05	6,31	10,73
ESPET	6,81	0	6,48	6,83	2,34	6,67	6,79	6,90	5,30
FSECA	6,57	6,45	0	8,68	4,82	11,31	6,38	7,068	7,66
GARAP	10,95	6,88	8,68	0	8,50	14,17	10,83	12,90	11,38
GUARI	6,04	2,34	4,82	8,50	0	6,30	5,93	4,82	3,68
JERIV	10,46	6,67	11,31	14,17	6,30	0	10,63	9,53	8,08
MACAU	4,05	6,79	6,38	10,83	5,93	10,63	0	5,75	9,79
PAUM	6,31	6,90	7,06	12,90	4,82	9,53	5,75	0	8,54
PEROB	10,73	5,30	7,66	11,38	3,68	8,08	9,79	8,54	0

Usando esse procedimento, pode-se observar que, ao contrário das análises em escala de folha, as classes não apresentaram distâncias discrepantes quando comparadas umas às outras, podendo, assim, apresentar baixa probabilidade de discriminação entre si.

A Tabela 16 resume a porcentagem de discriminação de cada classe de espécies arbóreas nativas da FES, a partir de dados hiperespectrais de *pixel*, na fase calibração da LDA.

Tabela 16. Resumo da fase de treinamento (70%) da análise discriminante linear, após seleção de variáveis preditoras (STEPDISC/SAS), utilizando dados de reflectância de *pixel* de espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual

Espécie ¹	CAPIX	ESPET	FSECA	GARAP	GUARI	JERIV	MACAU	PAUM	PEROB	Total ²
CAPIX	174	9	12	8	12	12	30	18	2	277 ²
	62,82 ³	3,25	4,33	2,89	4,33	4,33	10,83	6,5	0,72	100
ESPET	18	150	6	12	35	23	15	11	22	292
	6,16	51,37	2,05	4,11	11,99	7,88	5,14	3,77	7,53	100
FSECA	5	3	79	2	17	10	7	8	2	133
	3,76	2,26	59,4	1,5	12,78	7,52	5,26	6,02	1,5	100
GARAP	7	12	6	98	11	9	4	2	2	151
	4,64	7,95	3,97	64,9	7,28	5,96	2,65	1,32	1,32	100
GUARI	14	42	14	8	114	21	10	18	33	274
	5,11	15,33	5,11	2,92	41,61	7,66	3,65	6,57	12,04	100
JERIV	4	3	0	0	0	51	2	3	1	64
	6,25	4,69	0	0	0	79,69	3,13	4,69	1,56	100
MACAU	16	9	3	1	2	3	85	7	2	128
	12,5	7,03	2,34	0,78	1,56	2,34	66,41	5,47	1,56	100
PAUM	4	3	5	1	10	2	5	73	3	106
	3,77	2,83	4,72	0,94	9,43	1,89	4,72	68,87	2,83	100
PEROB	4	23	8	8	27	20	8	15	220	333
	1,2	6,91	2,4	2,4	8,11	6,01	2,4	4,5	66,07	100
Total ⁴	246	254	133	138	228	151	166	155	287	1758

¹espécie arbórea nativa; ²total de amostras; ³porcentagem de erro e acerto de cada classe; ⁴total de observações estimadas para cada classe.

A maioria das espécies apresentaram valores de discriminação acima de 50%, com exceção do guaritá, que obteve valor de 41,61%. Esta espécie foi objeto de estudo realizado na FES por Ferreira et al. (2016) que, também utilizando LDA para a discriminação, registraram valor superior ao encontrado neste estudo (93,00%).

O jerivá obteve uma precisão global de 79,69% na discriminação entre as espécies, registrando o maior percentual de acerto. Um fato interessante a ser observado é a

discriminação entre as duas palmeiras objetos do estudo (jerivá e macaúba) que, mesmo apresentando características fenotípicas semelhantes, obtiveram baixa probabilidade de confusão.

Com relação à farinha-seca, que possui folhas recompostas com pequenos foliólulos, a porcentagem de acerto foi de 59,40%, porém, esperava-se uma porcentagem de discriminação baixa, haja vista que essa espécie não apresenta uma arquitetura foliar densa. Assim, em seu processo de coleta da reflectância, poderia ocorrer a interferência do sobosque, influenciando o processo discriminatório.

A peroba é uma espécie clímax, considerada indicadora de estágios sucessionais de fragmentos florestais (CARVALHO, 2003), o conhecimento de sua densidade e distribuição contribui para realização de estudos ecológicos objetivando a identificação de áreas estratégicas para conservação. Na tabela 16, um valor de 66,07% de discriminação desta espécie foi obtido, utilizando LDA. Ferreira et al. (2016), no entanto, obtiveram o valor de 72,80% para sua discriminação.

O pau-marfim, espécie ameaçada de extinção no Estado do Paraná (PARANÁ, 1995), obteve precisão global de 68,87% na discriminação utilizando o procedimento DISCRIM no programa SAS. Com a perspectiva de identificação, *a priori*, deste percentual de localização dos indivíduos em uma floresta, sem informações desta espécie, medidas práticas podem ser tomadas para sua conservação *in situ*, além disso, elas podem ser protegidas como porta sementes, possibilitando a produção de mudas para projetos de restauração e conservação da biodiversidade.

Capixingui e garapeira são espécies de ampla distribuição geográfica no Brasil e apresentaram, segundo a tabela 16, valores de discriminação próximos, já o espeteiro juntamente com guaritá apresentaram os menores valores.

A Tabela 17 demonstra a taxa de erro na discriminação das espécies e a taxa de erro total na fase de treinamento.

Tabela 17. Erro da análise discriminante por espécies e erro médio total na fase de treinamento para a discriminação de espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual na Estação Ecológica do Caiuá

Espécie	CAPIX	ESPET	FSECA	GARAP	GUARI	JERIV	MACAU	PAUM	PEROB	Total ¹
Porcentagem ²	37,18	48,63	40,60	35,10	58,39	20,31	33,59	31,13	33,93	37,65

¹erro total médio na reclassificação das espécies arbóreas pela análise discriminante;

²porcentagem de erro para cada classe.

Na Tabela 18, os resultados da validação externa, para a avaliação do modelo gerado pela análise discriminante linear, estão apresentados. Como pode-se observar, as porcentagens de validação do modelo variaram entre 34 e 63% para nove espécies da FES.

Tabela 18. Número de observações e percentual classificado dentro das espécies de validação externa (30%) em escala de *pixel*

Espécie	CAPIX	ESPET	FSECA	GARAP	GUARI	JERIV	MACAU	PAUM	PEROB	Total
CAPIX	62	5	4	5	6	6	13	9	0	110
	56,36	4,55	3,64	4,55	5,45	5,45	11,82	8,18	0	100
ESPET	8	58	7	5	9	10	7	11	8	123
	6,5	47,15	5,69	4,07	7,32	8,13	5,69	8,94	6,5	100
FSECA	2	2	40	1	3	5	5	4	3	65
	3,08	3,08	61,54	1,54	4,62	7,69	7,69	6,15	4,62	100
GARAP	2	8	2	44	5	2	0	2	4	69
	2,9	11,59	2,9	63,77	7,25	2,9	0	2,9	5,8	100
GUARI	7	25	4	4	40	7	1	11	17	116
	6,03	21,55	3,45	3,45	34,48	6,03	0,86	9,48	14,66	100
JERIV	1	1	1	0	4	14	1	4	0	26
	3,85	3,85	3,85	0	15,38	53,85	3,85	15,38	0	100
MACAU	9	6	0	1	0	2	19	3	2	42
	21,43	14,29	0	2,38	0	4,76	45,24	7,14	4,76	100
PAUM	1	5	0	1	7	4	4	26	3	51
	1,96	9,8	0	1,96	13,73	7,84	7,84	50,98	5,88	100
PEROB	5	14	1	5	14	11	7	7	87	151
	3,31	9,27	0,66	3,31	9,27	7,28	4,64	4,64	57,62	100
Total	97	124	59	66	88	61	57	77	124	753

Como demonstrado na Tabela 19, a validação externa do modelo gerado pelo procedimento DISCRIM, apresentou erro total de 47,67%.

Tabela 19. Erro por espécie e erro total para a validação do modelo gerado pela LDA

	CAPIX	ESPET	FSECA	GARAP	GUARI	JERIV	MACAU	PAUM	PEROB	Total ¹
Porcentagem ²	43,64	52,85	38,46	36,23	65,52	46,15	54,76	49,02	42,38	47,67

¹erro total médio na reclassificação das espécies arbóreas pela análise discriminante;

²porcentagem de erro para cada classe.

A precisão global desse método de análise foi de 62,35%, muito superior quando comparado com o método utilizando a PCA, cujo percentual de discriminação foi 34,25%. Essa diferença pode estar relacionada com o fato de que a PCA é um procedimento de transformação de variáveis, podendo simplificar excessivamente o conjunto de dados, não

englobando variações importantes para a discriminação de espécies vegetais, uma vez que, quando se trata de dados referentes a dosséis, essas variações são ainda mais complexas, por abrangerem diversos elementos inerentes às condições florestais e ambientais.

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE A DISCRIMINAÇÃO EM ESCALA DE FOLHA E *PIXEL*

As leituras espectrais realizadas diretamente da folha geraram resultados com maior acurácia quando comparados com as aquisições da reflectância obtidas com o sensor hiperespectral AisaFENIX (Tabela 20). Estes resultados eram esperados, pois as coletas das reflectâncias em escala de *pixel* sofrem interferências de fatores ambientais e outros componentes da vegetação.

Tabela 20. Comparativo entre os métodos de discriminação e escalas de aquisição utilizada

	PCA-QDA	STEPLDISC-LDA
Folhas	85,35%	100%
<i>Pixel</i>	34,25%	62,35%

Utilizando folhas saudáveis nas leituras realizadas pelo FieldSpec®3 Jr, constata-se variações visuais nas curvas espectrais das amostras coletadas da mesma espécie (Figura 17). Quando o procedimento for realizado em escala de *pixel*, as variações intraespecíficas poderão ser acentuadas, pois cada indivíduo apresenta características individuais peculiares (folhas e características de copa, por exemplo). As variações microespaciais do ambiente no qual estão localizados os indivíduos amostrados podem, também, ter interferido na curva espectral, acarretando menor precisão na discriminação de espécies, como registrado.

De acordo com Asner (1998) e Clark et al. (2005), coletas em escala de *pixel* são influenciadas por diversos fatores, tais como adicional vegetativo (folhas, flores, frutos, ramos, tronco, epífitas, lianas, plantas de subosque etc.) e componentes da floresta não vegetativo (solo, água, atmosfera, etc.), que interferem de modo importante no processo de coleta dos dados espectrais, interferindo na discriminação de espécies.

Castro-Esau et al. (2006) exploraram ainda mais o problema da variabilidade intra e interespecíficas, usando um abrangente conjunto de dados foliares de árvores de florestas secas e tropicais da Mesoamérica. Esses autores concluíram que um certo nível de separabilidade existe entre diferentes espécies em escala de folha e que o nível de variabilidade intraespecíficas

é, por vezes, tão grande como as diferenças interespecíficas, tornando complexas as discriminações da vegetação.

Cochrane (2000), utilizando a abordagem designada por Price (1994), ilustrou a possibilidade de identificação remota de espécies utilizando o mogno, além de várias espécies da Amazônia brasileira, mas a abordagem foi limitada à avaliação da amplitude e da forma do espectro.

Estudos semelhantes em escala folhas e plantas foram realizados por Fung et al. (1998), Lucas e Carter (2008) e Lucas et al. (2008).

Além dos estudos mencionados acima, outros estudos têm mostrado a validade do uso de abordagens hiperespectrais para caracterizar os padrões de estrutura regional e função do ecossistema (CHAMBERS et al., 2007; KALACSKA et al., 2007b), bem como estimativas de biomassa e diversidade biológica (BROADBENT et al., 2008; FOSTER et al., 2002; THENKABAIL et al., 2003). Embora vários destes estudos tivessem demonstrado algum grau de sucesso, muitas destas abordagens tendem a ser locais e específicas, apresentando problemas quando aplicadas aos diferentes ecossistemas (NAGENDRA e ROCCHINI, 2007).

Estudos pioneiros, analisando em escala de *pixel*, têm demonstrado resultados satisfatórios com imagens orbitais e suborbitais de alta resolução para monitoramento de diâmetro copa e mortalidade de árvores em ambientes tropicais (ASNER et al., 2002; CLARK et al., 2004; PALACE et al., 2008). Os trabalhos de Asner et al. (2002) e Palace et al. (2008) têm sido especialmente promissores em relação à delimitação/identificação da copa em regiões tropicais, que, por sua vez, podem ser ligados a estudos da arquitetura árvore.

Van Aardt e Wynne (2001) constataram que as regiões VIS, NIR e SWIR1 são úteis para discriminar espécies de coníferas e angiospermas de floresta temperada, ao usarem dados hiperespectrais em escala de *pixel* coletados *in situ*. Derivadas espectrais proporcionaram as melhores precisões na classificação geral que foram 84% para as espécies de coníferas e 93% para as espécies de angiospermas.

Naidoo et al. (2012) obtiveram precisão global de 80,29% na discriminação de oito espécies arbóreas da savana africana, localizada no Parque Nacional Kruger, África do Sul. O uso combinando dados hiperespectrais com os do sensor LiDAR (da sigla inglesa *Light Detection And Ranging*) aumentaram a acurácia para 87,68%.

Lehmann et al. (2015) utilizaram análise de componentes principais e análise discriminante para identificação de espécies exóticas invasoras na região do Mediterrâneo, obtendo 98,90% de precisão, utilizando regiões específicas do espectro eletromagnético.

Van Aardt (2000) também obteve resultados satisfatórios utilizando como classificador a análise discriminante, obtendo diferenciações entre 78,36% e 100%.

Tagliabue et al. (2016) classificaram, via imagens aéreas hiperspectrais, cinco espécies arbóreas dominantes em Forêt de Hardt, França, alcançando 74,4% de discriminação.

Ballanti et al. (2016), em Marin County, EUA, utilizando seleção de bandas para discriminar oito espécies arbóreas em escala de *pixel*, obtiveram precisões globais acima de 90%.

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). Dados de distribuição e variabilidade de espécies vegetais em florestas tropicais, geralmente são adquiridos por meio de levantamentos florísticos realizados a campo, demandando grandes esforços, tempo e elevada disponibilidade de recursos. De acordo com Foody (2003), é extremamente difícil extrapolar dados obtidos em trabalhos de campo, realizados em pequenas áreas e que não apresentam reamostragens frequentes, para escalas regionais e globais. Contudo, essa busca deve ser uma meta a ser atingida.

5 CONCLUSÕES

O método mais preciso para a discriminação de espécies da vegetação, utilizando dados hiperespectrais, é a mensuração espectral direta na folha, como constatado neste e em diversos estudos. No entanto, para aplicação dessa metodologia, é necessário o deslocamento a campo, pessoal capacitado, identificação das espécies *in loco* e outros fatores que podem demandar tempo e recursos. Por isso, busca-se metodologias que visam facilitar os processos de discriminação de espécies vegetais.

Os resultados obtidos foram consonantes com outros estudos para a discriminação de espécies nativas da Florestas Estacional Semidecidual utilizando o sensoriamento remoto hiperespectral, exceto o método empregando a PCA seguida de análise discriminante quadrática a partir de dados de reflectância de *pixels*, obtidos com o sensor hiperespectral AisaFENIX.

A discriminação das espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual em escala de folha, utilizando o espectrorradiômetro FieldSpec®3 Jr (ASD), obteve precisão global de 85,35%, utilizando a PCA seguida de análise discriminante quadrática, e 100%, empregando o procedimento de seleção de variáveis STEPDISC (SAS) seguido de análise discriminante linear. Para discriminação em escala de *pixel*, com imagens hiperespectrais geradas pela AisaFENIX, a precisão global na discriminação das espécies foi de 34,25 e 62,35%, utilizando, respectivamente, os procedimentos mencionados acima.

Estes resultados são influenciados por uma infinidade de fatores que podem interferir no processo de captação da energia eletromagnética pelo sensor, como adicionais vegetativos (flores, frutos, ramos, caules, epífitas e lianas, plantas de sobosque, etc) e componentes da floresta não vegetativa (solo, água, umidade atmosférica, etc.).

6 RECOMENDAÇÕES

Os métodos de correção atmosférica de imagens geradas pelo sensor AisaFENIX devem ser aprimorados para que se possa obter dados com o mínimo de ruído possível. Assim, com dados mais precisos, será possível uma caracterização de mais espécies arbóreas, elevando o número de espécies na biblioteca espectral.

Avaliação de outros métodos estatísticos é recomendada para a verificação e validação dos dados.

A compreensão dos fatores que podem interferir no processo de captação da energia eletromagnética pelo sensor em escala de *pixels* deve ser aprofundada por estudos específicos.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAM, E.; MUTANGA, O.; RUGEGE, D. Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review. **Wetlands Ecol Manage**, 2010. v.18, p.281 -286.
- AFIFI, A.; CLARK, V. A.; MAY, S. **Computer-aided multivariate analysis**. EUA, Boca Raton: Chapman & Hall, 2004. 419 p.
- ASD Inc. **ViewSpec Pro User's Guide: ViewSpec Pro™ User Manual**, ASD Document 600555 Rev. A 2008.
- ASNER G. P. E MARTIN R. E. Spectral and chemical analysis of tropical forests: scaling from leaf to canopy levels. **Remote Sensing of Environment**, 2008. v. 112, p. 3958–3970
- ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, 1998. v. 64, p. 134–153.
- ASNER, G. P. Hyperspectral remote sensing of canopy chemistry, physiology and diversity in tropical rainforests. In M. Kalacska, & G. A. Sanchez-Azofeifa (Eds.), **Hyperspectral remote sensing of tropical and subtropical forests**, 2008. p. 261–296.
- ASNER, G. P.; MARTIN, R. E. Airborne spectranomics: Mapping canopy chemical and taxonomic diversity in tropical forests. **Frontiers in Ecology and the Environment**, 2009. v. 7, p. 269–276
- ASNER, G.P.; PALACE, M.; KELLER, M.; PEREIRA, R.; SILVA, J.N.M.; ZWEEDE, J.C. Estimating Canopy Structure in an Amazon Forest from Laser Range Finder and IKONOS Satellite Observations. **Biotropica**, 2002. v. 34, p.483-492.
- BALLANTI, L.; BLESÍ.; HINES, E.; KRUSE, B. Tree Species Classification Using Hyperspectral Imagery: A Comparison of Two Classifiers. **Remote sensing**, 2016. v.8, p.445.
- 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**, 2009 v. 113, p. S38-S55.
- 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.
- BLACKBURN, G. A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. **International Journal of Remote Sensing**, 1998. v. 19, p. 657 – 675.
- BOHRER, C. B. A. Vegetação, paisagem e o planejamento do uso da terra. **Geographia**, 2000. v.4, p. 103-120.

- BOHRER, C.B.A. et al. Mapeamento da vegetação e do uso do solo no centro de diversidade vegetal de Cabo Frio, Rio de Janeiro, Brasil. **Rodriguésia**, 2009. v.60, n.1, p. 1-23.
- BROADBENT, E.N.; ASNER, G.P.; PENA-CLAROS, M.; PALACE, M.; SORIANO, M. Spatial partitioning of biomass and diversity in a lowland Bolivian forest: Linking field and remote sensing measurements, **Forest Ecology and Management**, 2008. v. 255, p. 2602-2616.
- BROOK, A.; BEN DOR, E. Supervised vicarious calibration (SVC) of hiperespectral remote-sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 1545-1555, 2011.
- BUNTING, P.; LUCAS, R. M., The delineation of tree crowns in Australian mixed species forests using hyperspectral compact airborne spectrographic imager (CASI) data, **Remote Sensing of Environment**, 2006. v. 101, p. 230.
- CAMO. **The Unscrambler User Manual: Methods**. 2006. Disponível em: <<http://www.camo.com/downloads/U9.6%20pdf%20manual/The%20Unscrambler%20Methods.pdf>>. Acesso em: jan. 2017
- 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.
- CAMPBELL, J.B. **Introduction to remote sensing**. New York: The Guilford Press, 1996. 622p.
- 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, T. L. L. **Discriminação de espécies arbóreas nativas da Floresta Estacional Semidecidual e da exótica *Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden utilizando dados hiperespectrais**. Dissertação (Mestrado). Maringá, PR: UEM, 2017. Dados não publicados.
- 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.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; CAELLI, T. Discrimination of lianas and trees with leaf level hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**. 2004. v. 90 p. 353-372.
- CASTRO-ESAU, K.L.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; RIVARD, B.; WRIGHT, S. J.; QUESADA, M. Variability in Leaf Optical Properties on Mesoamerican Trees and the Potential for Species Classification. **American Journal of Botany**, 2006. v. 93, p. 517-530.
- CEMIN, G. et al. Uso de Sistemas de Informações Geográficas para análise de estrutura da paisagem no Município de Arvorezinha, RS. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 12., 2005, Goiânia. Anais... p. 2113-2120.
- CHAMBERS, J. Q.; ASNER, G. P.; MORTON, D. C.; ANDERSON, L. O.; SAATCHI, S. S.; ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; PALACE, M.; SOUZA, C., JR. Regional ecosystem structure

and function: ecological insights from remote sensing of tropical forests. **Trends in Ecology & Evolution**, 2007. v. 22, p. 414-423.

CHAPPELLE, E. W.; KIM, M. S.; AND MCMURTREY, J. E. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids. **Remote Sensing of Environment**, 1992. v.39, p. 239–247.

CLARK, C. L.; ROBERTS, A. D. Species-Level Differences in Hyperspectral Metrics among Tropical Rainforest Trees as Determined by a Tree-Based Classifier. **Remote Sensing**, 2012. v.4, p. 1820-1855.

CLARK, D. B., READ, J. M., CLARK, M. L., MURILLO CRUZ, A., FALLAS DOTTI, M., and CLARK, D. A. Application of 1-m and 4-m resolution satellite data to studies of tree demography, stand structure and land-use classification in tropical rain forest landscapes. **Ecological Applications**, 2004. v.14(1), p. 61–74.

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**, 2005. v. 96, p. 378–398.

CNCFlora. *Syagrus romanzoffiana* in **Lista Vermelha da flora brasileira versão 2012.2** Centro Nacional de Conservação da Flora. Disponível em <[http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Syagrus romanzoffiana](http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Syagrus_romanzoffiana)>. Acesso em 8 maio 2017.

COCHRANE, M. A. Using vegetation reflectance variability for species level classification of hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, 2000. v. 21(10), p. 2075–2087.

COLEMAN, T. L.; MONTGOMERY, O. L. Soil Moisture, organic matter and iron content effect on the spectral characteristics of selected vertisols and alfisols in Alabama. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 1987 v.53, p.1659- 1663.

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.; MANTOVANI, W. Composição e estrutura de clareiras em mata mesófila na Bacia de São Paulo. In: Instituto Florestal (ed.), II Congresso Nacional sobre Essências Nativas, São Paulo, SP, Rev. Inst. Ftal., 1992, 1: 178-173.

COURA, S. M. C.; PIROMAL, R. A. S.; CANAVESI, V.; GOMES, M. N.; QUIRINO, V. F.; PONZONI, F. J. Comparação das características espectrais das espécies *Ligustrum japonicum* Thunb. e *Cassia macranthera* DC. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, 2005, Goiânia. Anais... São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 1477-1484. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.28.09.01/doc/1477.pdf>> Acesso em: 3 out. 2016.

CURRAN, P. J. Remote sensing of foliar chemistry. **Remote Sensing of Environment**, 1989. v. 3, p. 271–8.

- CUSHNAHAN, T.A., YULE, I.J., PULLANAGARI, R.; GRAFTON, M.C.E. Identifying grass species using hyperspectral sensing. **Fertilizer and Lime Research Centre**, 2016. no. 29, p.13
- DALPONTE, M.; ORKA, H. O.; GOBAKKEN, T.; GIANELLE, D.; NAESSET, E. Tree species classification in boreal forests with hyperspectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 2013. v. 51, p. 2632-2645.
- DAUGHTRY, C. S. T.; BIEHL, L. L. **Changes in Spectral Properties os Detached Leaves**. Laboratory for Applications of Remote Sensing (LARS) Technical Reports. West Lafayette, IN, 1984. 21 p.
- 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, Eric et al. **Evaluación del estado de conservación de las eco-regiones terrestres de América Latina y el Caribe**. Washington, D.C.: Banco Mundial, 1995. 135 p.
- DURGANTE, M. F.; HIGUCHI, N.; ALMEIDA, A.; VICENTINI, A. Species Spectral Signature: Discriminating closely related plant species in the Amazon with Near-Infrared Leaf-Spectroscopy. **Forest Ecology and Management**, 2013. v. 291, p. 240-248
- DURIGAN, G.; NOGUEIRA, J.C.B. **Recomposição de matas ciliares**. São Paulo: Instituto Florestal, 1990. p. 14
- ELVIDGE, C. D.; CHEN, Z. K. Comparison of broadband and narrowband red and nearinfrared vegetation indices, **Remote Sensing of Environment**, 1995. v. 54, p. 38.
- ENVI. **ENVI Classic**. Versão 5.0. 2012. Exelis Visual Information Solutions Disponível em: <<http://www.envi.com.br/index.php/downloads>>. Acesso em: mar. 2016.
- ESPÍNDULA, A.; SOUZA, E. M. F. R.; VICENS, R. S.; CRUZ, C. B. M. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação (mata atlântica): comparações das curvas espectrais de sensores multiespectrais e hiperespectrais. **IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife - PE, 06- 09 de Maio de 2012. p. 001 – 006
- FÉRET, J. B.; ASNER, G. P. Tree species discrimination in tropical forests using airborne imaging spectroscopy. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 2013. v. 51, p. 73-84.
- FÉRET, J.; ASNER, G. P. Semi-supervised methods to identify individual crowns of lowland tropical canopy species using imaging spectroscopy and LiDAR. **Remote Sensing**, 2012. v.4, p.2457–2476.
- 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, M. P., GRONDONA, A. E. B., ROLIM, S. B. A., & SHIMABUKURO, Y. E. 2013. Analyzing the spectral variability of tropical tree species using hyperspectral feature selection and leaf optical modeling. **Journal of Applied Remote Sensing**, 2013. v. 7, p. 14

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**, 2016 v. 179, p. 66-78.

FOODY, G. M. Remote sensing of tropical forest environments: Towards the monitoring of environmental resources for sustainable development. **International Journal of Remote Sensing**, 2003. v. 24(20), p. 4035–4046.

FOSTER, J.R.; KINGDON, C.C.; TOWNSEND, P.A. Predicting tropical forest carbon from EO-1 hyperspectral imagery in Noel Kempff Mercado National Park, Bolivia. In **Geoscience and Remote Sensing Symposium**, Toronto, Canada, 24–28 June 2002. v. 6, p. 3108–3110.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA / INPE / ISA. **Atlas da evolução dos remanescentes florestais e ecossistemas associados do domínio da Mata Atlântica no período de 1990 - 1995**. São Paulo: INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, ISA– Instituto Sócio Ambiental. 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. 2015. Disponível em: https://www.sosma.org.br/link/atlas_2013-2014_Mata_Atlantica_relatorio_tecnico_2015.pdf. Acesso em: mai. 2015.

FUNG, T.; MA, F. Y.; SIU, W. L. Hyperspectral data analysis for subtropical tree species recognition. In **Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium**, IGARSS '98; Seattle, WA, USA, 6–10 July 1998. v. 3, p. 1298-1300.

GAUSMAN, H. W. Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light. **Graduate Studies No. 29**, Texas Tech Press, Lubbock, TX, 1985.

GILLESPIE, T.W.; BROCK, J.; AND WRIGHT, C. W. Prospects for quantifying structure, floristic composition and species richness of tropical forests, **International Journal of Remote Sensing**, 2004. v. 25, p. 707.

GITELSON, A. A. Nondestructive estimation of foliar pigment (chlorophylls, carotenoids and anthocyanins) contents: evaluating a semianalytical threeband model. In: Thenkabail, P.S., Lyon, J.G., Huete, A. (Eds.), **Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation**, 2012. p. 141–165.

GITELSON, A. A.; KEYDAN, G. P.; MERZLYAK M. N. Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves. **Geophysical Research Letters**, 2006. v. 33. L11402.

GOETZ A.F.H. Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. **Remote Sensing of Environment**, 2009. v. 113(Supplement 1), p. 5–16.

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

GRANT, L. Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance. **Remote Sensing of Environment**, 1987. v. 22, p. 309– 322.

GUBERT-FILHO, F.A. 1993. O desflorestamento do Estado do Paraná em um século. In: Conferência del mercosur sobre medio ambiente e aspectos transfronteirizos, 2. Posadas, Argentina, 1993. **Anales...** Posadas : Argentina: p. 61-69.

HAIR, J.F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 600p.

HERMANN, B. C.; RODRIGUES, E.; LIMA, A. A paisagem como condicionadora de bordas de fragmentos florestais. **Floresta**, 2005. v. 35 (1), p.14-22.

INNES J. L.; KOCH B. Forest biodiversity and its assessment by remote sensing. **Global Ecology & Biogeography Letters**, 1998. v. 7, p. 397–419.

Instituto Ambiental do Paraná – IAP; Diretoria de Biodiversidade e Áreas Protegidas. – DIBAP. **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

JACQUEMOUD, S.; USTIN S. L.; VERDEBOUT J.; SCHMUCK G.; ANDREOLI G.; HOSGOOD B. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. **Remote Sensing of Environment**, 1996. v. 56, p. 194–202.

JENSEN, J.R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. USA. 544 p. 2000.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 4 ed. Upper Saddle River, New Jersey, USA: Prentice-Hall, 1999, 815 p.

KALACSKA, M.; BOHMAN, S.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; CASTRO-ESAU, K. L.; CAELLI, T. Spectral Discrimination of Tropical Dry Forest Lianas and Trees: Comparative Data Reduction Approaches at the Leaf and Canopy Levels. **Remote Sensing of Environment**, 2007a. v. 109, p. 406-415.

KALACSKA, M.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; RIVARD, R.; CAELLI, T.; WHITE, H.P.; CALVO-ALVARADO, J. C. Ecological fingerprinting of ecosystem succession: Estimating secondary tropical dry forest structure and diversity using imaging spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, 2007b. v. 108, p. 82-96.

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

KUMAR, R. and SILVA, L., "Light Ray Tracing through a Leaf Cross Section" (1972). **LARS Technical Reports**. Paper 16.

LANDGREBE D. On information extraction principles for hyperspectral data. **Cybernetics**, 1999a. v. 28 part c, 1, p. 1-7.

LANDGREBE D. Some fundamentals and methods for hyperspectral image data analysis. **Systems and Technologies for Clinical Diagnostics and Drug Discovery II**, 1999b.

- 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**, 2015 v. 7, p. 1225-1241, 2015.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 1999.
- LORENZI, G.M.A.C.; NEGRELLE, R.R.B. *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.: **Aspectos ecológicos, usos e potencialidades**. Disponível em http://www.entabanbrasil.com.br/downloads/Macauba_Aspectos-Ecológicos_Revisão_UFPR.pdf. Acesso em 7 de maio de 2017.
- LUCAS, K. L.; CARTER, G. A. The use of hyperspectral remote sensing to assess vascular plant species richness on Horn Island, Mississippi. **Remote Sensing of Environment**, 2008. v. 112, p. 3908-3915.
- LUCAS, R. M.; BUNTING, P.; PATERSON, M.; CHISHOLM, L. Classification of Australian forest communities using aerial photography, CASI and HyMap data. **Remote Sensing of Environment**, 2008. v. 112, p. 2088-2103.
- MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro: J. Olympio Ed.; 1968. 442 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.
- MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. **Sensoriamento Remoto: refletância dos alvos naturais**. Brasília UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 262p.
- MEYER, P., STAENZ, K., & ITTEN, K. I. Semi-automated procedures for tree species identification in high spatial resolution data from digitized colour infrared-aerial photography. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 1996. v. 51(1), p. 5 – 16.
- MORAES, E. C. **Fundamentos de sensoriamento remoto**. São José dos Campos, Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), 2007. p. 26.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3. Ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005. 320 p.
- MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIERS, C. G.; FONSECA, G. A. B.; JENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, 2000. v. 403, p. 853-858.
- NAGENDRA, H.; ROCCHINI, D. High-resolution satellite imagery for tropical biodiversity studies: The devil is in the detail. **Biodiversity and Conservation**, 2007. v. 17, p. 3431-3442.
- 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. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 2012. v.69, p. 167-179

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>. Acesso em: nov. 2016

OKIN, G. S.; ROBERTS, D. A.; MURRAY, B.; OKIN, W. J. Practical limits on hyperspectral vegetation discrimination in arid and semiarid environments. **Remote Sensing of Environment**, 2001. v. 77, p. 212-225.

OLIFIERS, N.; CERQUEIRA, R. Fragmentação de habitat: efeitos históricos e ecológicos. In: **Biologia da Conservação Essências**. Rio de Janeiro. Editora RIMA, 2006. p.262-279.

PALACE, M.; KELLER, M.; ASNER, G.P.; HAGEN, S.; BRASWELL, B. Amazon Forest Structure from IKONOS Satellite Data and the Automated Characterization of Forest Canopy Properties. **Biotropica** 2008. v. 40, p. 141-150.

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

PARANÁ – Secretaria do Estado do Meio Ambiente. **Lista Vermelha de Plantas Ameaçadas de Extinção no Estado do Paraná**. SEMA, Curitiba, 1995. 105p.

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>. Acesso em: mar. 2016.

PEERBHAY, K.Y.; MUTANGA, O.; RIYAD, I. Commercial tree species discrimination using airborne AISA Eagle hyperspectral imagery and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) in KwaZulu–Natal, South Africa. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 2013. v. 79, p. 19-28.

PESTANA, M.H.; GAGEIRO, H.N. **Análise de dados para as ciências sociais: a complementaridade do SPSS**. 4.ed. Lisboa: Silabo, 2005. 690p.

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: **Biologia da Conservação Essências**. Rio de Janeiro. Editora RIMA, 2006. p.231-260.

PONZONI, F. J. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação: diagnosticando a mata atlântica**. V Curso de uso e sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente. São José dos Campos. Cap. 8, INPE, 22-26 de julho de 2002.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. Edição 2010. São Jose dos Campos: Editora Parêntese, 2010. 127p.

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**, 1997, Copenhagen, Dinamarca. Anais... 1997. v. 3, p. 2593-2610

PRICE, J. C. How Unique are Spectral Signatures? **Remote Sensing of Environment**, 1994. v. 49, p. 181-186.

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

PU, R. An exploratory analysis of in situ hyperspectral data for broadleaf species recognition. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2008. v.38, p.6.

READ, J. M.; CLARK, D. B.; VENTICINQUE, E. M.; MOREIRA, M. P. Application of merged 1-m and 4-m resolution satellite data to research and management in tropical forests. **Journal of Applied Ecology**, 2003. v. 20, p. 592– 600.

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.; CALVO-ALVARADO, J. C. Species Classification of Tropical Tree Leaf Reflectance and Dependence on Selection of Spectral Bands. In **Hyperspectral Remote Sensing of Tropical and Subtropical Forests**, Kalacska, M., Sánchez-Azofeifa, G. A., Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2009. p. 141-160.

ROBERTS, D. A.; Nelson, B. W.; Adams, J. B.; et al., Spectral changes with leaf aging in Amazon caatinga, **Trees**, 1998. v. 12, p. 315.

ROBERTS, D. A.; USTIN, S. L.; OGUNJEMIYO, S.; GREENBERG, J.; DOBROWSKI, S. Z.; CHEN, J. Q.; et al. Spectral and structural measures of northwest forest vegetation at leaf to landscape scales. **Ecosystems**, 2004. v. 7, p. 545–562.

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. **Cadernos de Biodiversidade**, 1998. v. 1, n. 2, p. 1-6.

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.

SAS - INSTITUTE. **SAS, software: user's guide**. version 8.2, Cary, 2001.

SAS software. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc., 2008

SILVA, E.L.S.; PONZONI, F.J. Comparação entre a reflectância hemisférica de folhas e a reflectância bidirecional de um dossel. **Revista Árvore**, 1995. v.19, n. 4. p. 466-478.

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.

SMITH, R. B. Introduction to hyperspectral imaging. www.microimages.com. 2001a. Acesso em: mar. 2016

SMITH, R. B. Introduction to remote sensing of the environment. www.microimages.com. Acesso em: mar. 2016. 2001b.

SOUZA, C. L.; RIBEIRO, M. C.; PONZONI, F. J. Influência do tempo e do tipo de armazenamento na reflectância espectral de folhas de *Eucalyptus grandis* "EX-SITU". **Revista Árvore**, 1996. v. 20, p. 255-265.

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

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

SPECIM. CaliGEO Pro. Versão 2.2. 2013. Disponível em: <<http://www.specim.fi/>>. Acesso em: jul. 2016.

SPVS - SOCIEDADE DE PESQUISA EM VIDA SELVAGEM E EDUCAÇÃO AMBIENTAL. Manual para recuperação da reserva florestal legal. Curitiba, FNMA – Fundo Nacional do Meio Ambiente. 1996. 84p.

TAGLIABUE, G.; PANIGADA, C.; COLOMBO, R.; FAVA, F.; CILIA, C.; BARET, F.; VREYS, K.; K.; Rossini, M. Forest species mapping using airborne hyperspectral APEX data. **Miscellanea geographica – regional studies on development**, 2016. v. 20, p. 28-33.

THENKABAIL, P. S.; HALL, J.; LIN, T.; ASHTON, M. S.; HARRIS, D.; ENCLONA, E. A. Detecting floristic structure and pattern across topographic and moisture gradients in a mixed species Central African forest using IKONOS and Landsat-7 ETM+ images, **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 2003. v. 4, p. 255-270.

THENKABAIL, P. S.; SMITH, R. B.; DE PAUW, E. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics, **Remote Sensing of Environment**, 2000. v. 71, p. 158.

THENKABAIL, P.S.; ENCLONA, E.A.; ASHTON, M.S.; et al. Hyperion, IKONOS, ALI, and ETM+ sensors in the study of African rainforests, **Remote Sensing of Environment**, 2004. v. 90, p. 23.

THENKABAIL, P.S.; SMITH, R.B.; AND DE PAUW, E. Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization, **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 2002. v. 68, p. 607.

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

VAN AARDT, J. A. N. **Spectral Separability among Six Southern Tree Species**. Dissertação (Mestrado). Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000. 184 p.

VAN AARDT, J. A. N.; WYNNE, R. H. Spectral separability among six southern tree species. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 2001. v.67 (12), p. 1367–1375.

VIANA, V.M; PINHEIRO, L.A.F.V. Conservação da biodiversidade em fragmentos florestais. **Série Técnica IPEF**, dezembro de 1998. v. 12, n. 32, p. 25-42

WENG, Q. **Remote Sensing and GIS Integration: Theories, Methods, and Applications**. New York: McGraw-Hill, 2010. 397p.

Whitmore, T. C. **An introduction to tropical rain forests**. Oxford's Clarendon Press, 1990

WILLSTATTER, R.; STOOLL, A. **Untersuchungen über die assimilation der kohlenzure**. Springer, Berlin, 1918.

WOOLLEY, J. T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Plant Physiology**, 1971. v. 47, p. 656– 662.

8 APENDICE

APÊNDICE A

Capixingui (Figura A1)

Divisão: Magnoliophyta (Angiospermae)

Classe: Magnoliopsida (Dicotyledonae)

Ordem: Euphorbiales

Família: Euphorbiaceae

Espécie: *Croton floribundus* Spreng.

Espécie arbórea de médio porte, com altura em torno de 12m, pioneira, comum em vegetação secundária (DURIGAN e NOUGUEIRA, 1990), heliófila, habita as bordas de fragmentos florestais e interiores como cicatrizadoras de clareiras (COSTA e MANTOVANI, 1992). As folhas são simples, semidecíduas e discolores (a face superior tem coloração verde escura e a face inferior tem coloração branca) (CARVALHO, 2003).

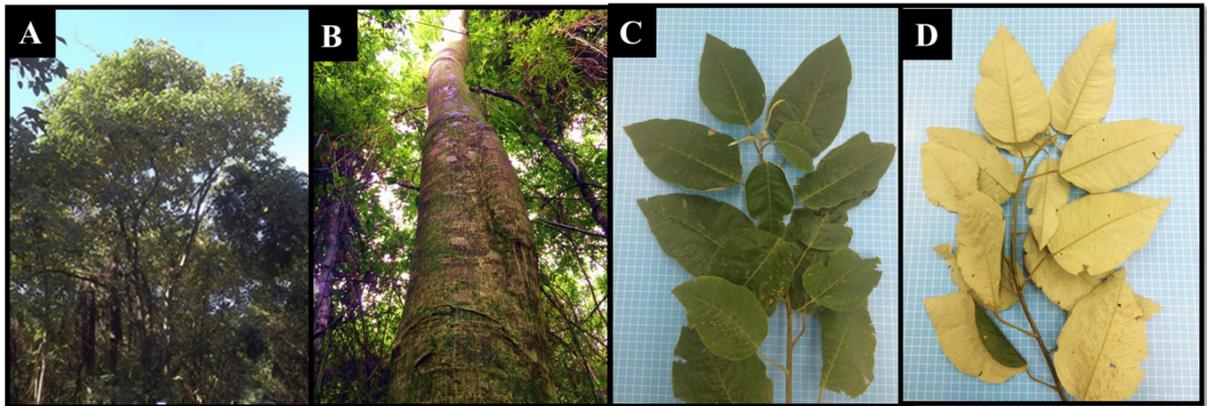


Figura A1. *Croton floribundus* Spreng.: (A) árvore; (B) tronco; (C) folhas face adaxial; (D) folhas face abaxial.

Imagens: Silva, V. L.; Campos, T. L. L.

Espeteiro (Figura A2)

Divisão: Magnoliophyta (Angiospermae)

Classe: Magnoliopsida (Dicotyledonae)

Ordem: Malpighiales

Família: Salicaceae

Espécie: *Casearia gossypiosperma* Briq.

Espécie arbórea de médio porte, com altura em torno de 15, secundária inicial, heliófila, com folhas simples e decíduas, habita interiores de florestas, ocupando o dossel intermediário (CNCFlora, 2012).

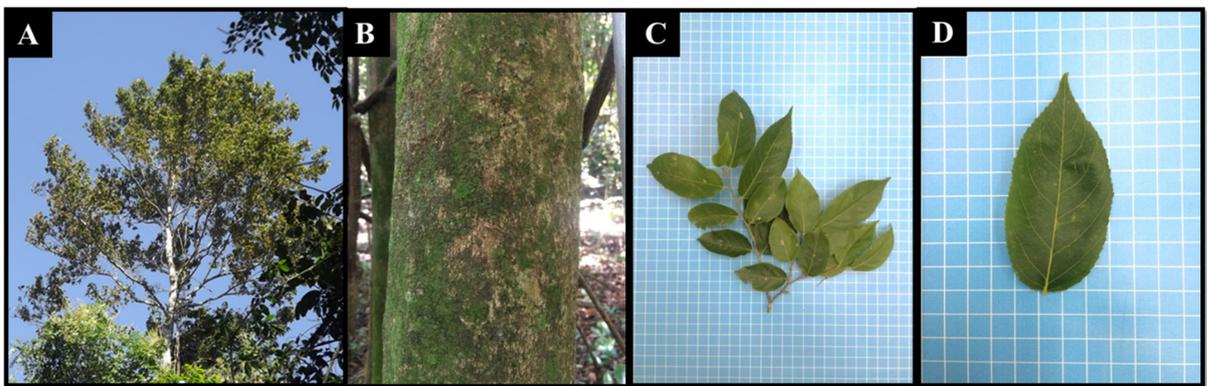


Figura A2. *Casearia gossypiosperma* Briq. (A) copa; (B) tronco; (C) ramo; (D) folha.
Imagens: Silva, V. L; Campos, T. L. L.

Farinha-seca (Figura A3)

Divisão: Magnoliophyta (Angiospermae)

Classe: Magnoliopsida (Dicotyledonae)

Ordem: Fabales (Rosales)

Família: Fabaceae (Leguminosae)

Espécie: *Albizia niopoides* (Spruce ex Benth.) Burkart.

Árvore de médio a grande porte, podendo atingir 35m de altura, apresenta folhas decíduas recompostas com pequenos foliólulos, o nome farinha-seca é em decorrência ao tronco da mesma, pois, quando em atrito libera (CARVALHO, 2003).



Figura A3. *Albizia niopoides* (Spruce ex Benth.) Burkart. (A) árvore; (B) tronco; (C) ramo; (D) folha recomposta.

Imagens: Silva, V. L.

Garapeira (Figura A4)

Divisão: Magnoliophyta (Angiospermae)

Classe: Magnoliopsida (Dicotyledonae)

Ordem: Fabales

Família: Caesalpiniaceae (Leguminosae)

Espécie: *Apuleia leiocarpa* (Vogel) Macbride.

Árvore de médio a grande porte, podendo atingir 30 metros de altura, secundária inicial, com folhas compostas e decíduas, habitando o interior das florestas, ocupando o dossel intermediário e, às vezes, o dominante, espécie com regeneração abundante em florestas secundárias (CARVALHO, 2003).



Figura A4. *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F.Macbride. (A) copa; (B) tronco; (C) ramo; (D) folhas.

Imagens: Silva, V. L; Campos, T. L. L.

Guaritá (Figura A5)

Divisão: Magnoliophyta (Angiospermae)

Classe: Magnoliopsida (Dicotyledonae)

Ordem: Sapindales

Família: Anacardiaceae

Espécie: *Astronium graveolens* Jacq.

Árvore de grande porte, podendo atingir mais de 35m de altura, secundária tardia, com folhas compostas e decíduas, ocorrendo, com frequência baixa, no interior das florestas, não ocorrendo geralmente a céu aberto, ocupando o dossel dominante na EEC (CARVALHO, 2003). No Estado de São Paulo, está na lista de espécies ameaçadas de extinção (SIQUEIRA e NOGUIRA, 1992).

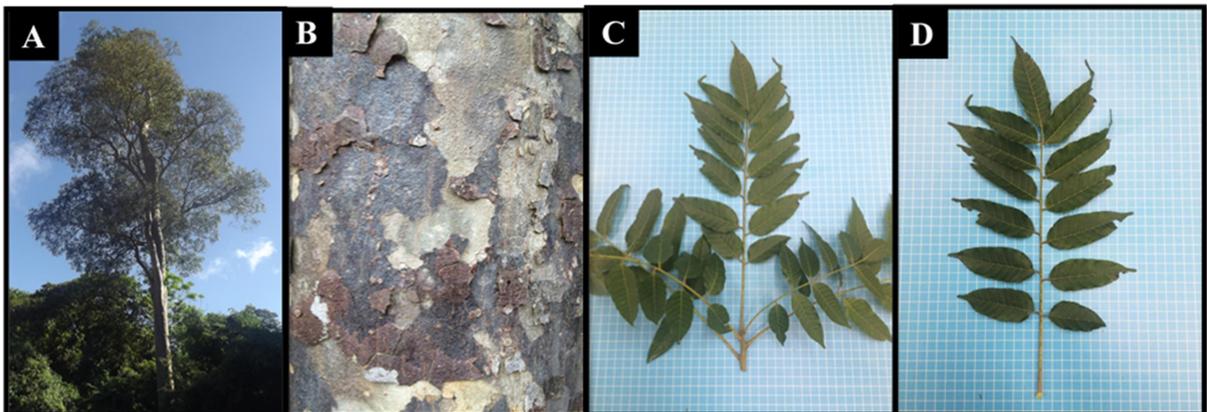


Figura A5. *Astronium graveolens* Jacq. (A) árvore; (B) tronco; (C) ramo; (D) folha composta. Imagens: Silva, V. L.; Campos, T. L. L.

Jerivá (Figura A6)

Divisão: Magnoliophyta (Angiospermae)

Classe: Liliopsida (Monocotyledonae)

Ordem: Arecales

Família: Arecaceae (Palmae)

Espécie: *Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Glassman

Palmeira que pode atingir até 30 m, normalmente atingindo de 6 a 20 m de altura, com folhas compostas e perenes, diferencia-se facilmente da macaúba por não possuir espinhos no caule e folhas, de caule solitário (CNCFlore, 2012).

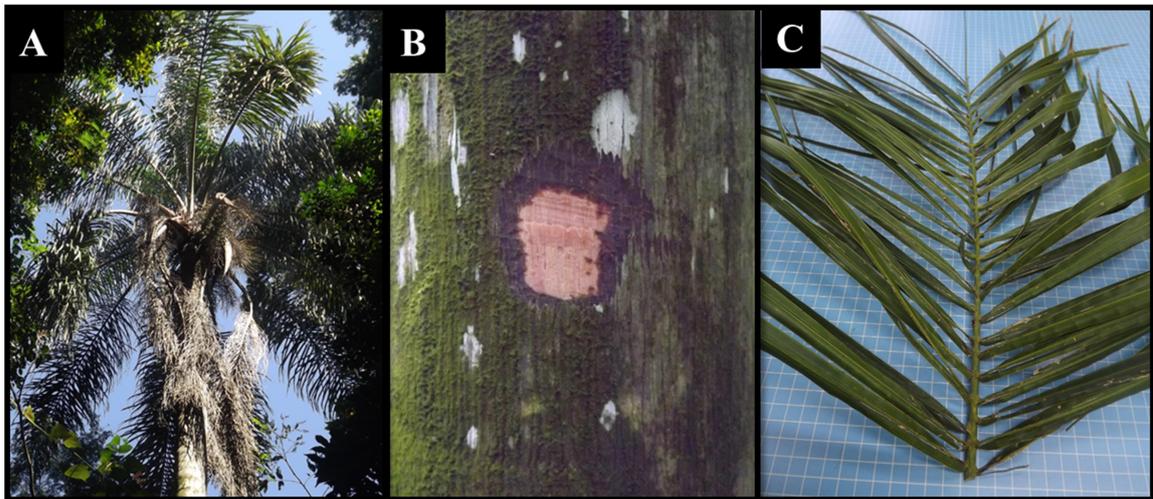


Figura A6. *Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Glassman. (A) palmeira; (B) tronco; (C) folha. Imagens: Silva, V. L.

Macaúba (Figura A7)

Divisão: Magnoliophyta (Angiospermae)

Classe: Liliopsida (Monocotyledonae)

Ordem: Arecales

Família: Arecaceae (Palmae)

Espécie: *Acrocomia aculeata* Jacq.

Palmeira que pode atingir até 20m de altura, espécie pioneira, muito tolerante a incêndios florestais, com folhas compostas e perenes, ocorrendo principalmente em locais abertos, bordas de fragmentos e raramente no interior florestal. É espécie nativa das florestas tropicais, cuja principal característica é a presença de espinhos escuros, longos e pontiagudos na região dos nós (LORENZI e NEGRELLE, 2006).



Figura A7. *Acrocomia aculeata* (Jacq) Lood. ex Mart. (A) palmeira; (B) tronco; (C) folha.
Imagens: Silva, V. L.

Pau-marfim (Figura A8)

Divisão: Magnoliophyta (Angiospermae)

Classe: Magnoliopsida (Dicotyledonae)

Ordem: Rutales

Família: Rutaceae

Espécie: *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl.

Espécie de grande porte, podendo atingir até 35m de altura, secundária tardia com folhas compostas e decíduas, habitam desde o interior das florestas até áreas em sucessão secundária, ocupando o dossel sub-dominante (CARVALHO, 2003). É considerada no Estado do Paraná como espécie ameaçada de extinção (PARANÁ, 1995).

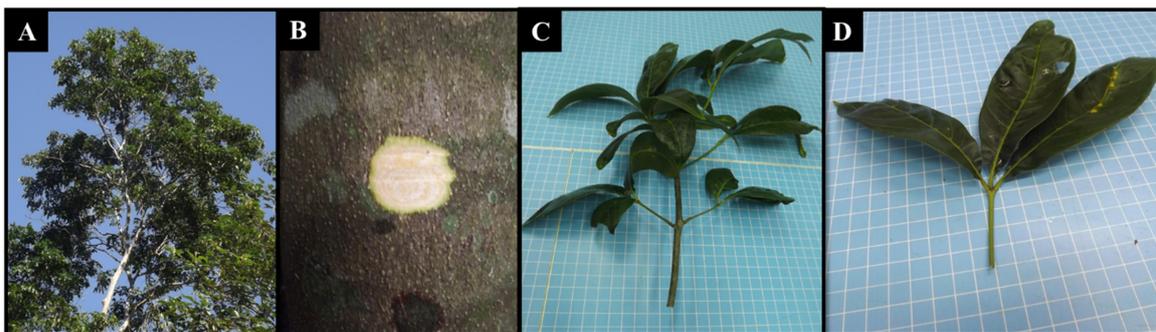


Figura A8. *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl. (A) copa; (B) tronco; (C) ramo; (D) folha composta.

Imagens: Silva, V. L.

Peroba-rosa (Figura A9)

Divisão: Magnoliophyta (Angiospermae)

Classe: Magnoliopsida (Dicotyledonae)

Ordem: Gentianales

Família: Apocynaceae

Espécie: *Aspidosperma polyneuron* Müeller Argoviensis

Árvore de grande porte, podendo chegar a mais 50m de altura, secundária tardia de folhas simples e perenes, habitam o interior das florestas de forma gregária, ocupando o dossel dominante, sendo a espécie típica e predominante da FES.



Figura A9. *Aspidosperma polyneuron* Müll.Arg. (A) copa; (B) tronco; (C) ramo; (D) folhas.
Imagens: Silva, V. L; Campos, T. L. L.