

Número: UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA ANÁLISE AMBIENTAL E DINÂMICA TERRITORIAL

#### PRISCILA BROCHADO GOMES

Análise espacial de espécies arbóreas pertencentes à Floresta Estacional Semidecidual e ao Cerradão baseada em imagens de alta resolução espacial

> Tese apresentada ao Instituto de Geociências como parte dos requisitos para obtenção do título Doutor em Ciências, Análise Ambiental e Dinâmica Territorial.

Orientador: Prof. Dr. Marcos César Ferreira

## **CAMPINAS - SÃO PAULO**

Fevereiro - 2009

#### Catalogação na Publicação elaborada pela Biblioteca do Instituto de Geociências/UNICAMP

Gomes, Priscila Brochado.
G585a "Análise espacial de espécies arbóreas pertencentes à floresta estacional semidecidual e ao cerradão baseada em imagens de alta resolução espacial" / Priscila Brochado Gomes-- Campinas,SP.: [s.n.], 2009.
Orientador: Marcos César Ferreira. Tese (doutorado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.
1. Mapeamento florestal. 2. Análise espacial (estatística). 3. Sensoriamento remoto. I. Ferreira, Marcos César. II. Universidade

Sensoriamento remoto. I. Ferreira, Marcos César. II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. III. Título.

Título em inglês "Spatial analysis of tree species from semi-deciduous seasonal Forest and Savana Forest based on images with high resolutions".

Keywords: - Forest mapping;

- Spatial analysis (Statistical);

- Remote sensing.

Área de concentração: Análise Ambiental e Dinâmica Territorial

Titulação: Doutor em Ciências.

Banca examinadora: - Marcos César Ferreira;

- João Roberto dos Santos;
- Marisa Gesteira Fonseca;
- Jurandir Zullo Junior

- Lindon Fonseca Matias.

Data da defesa: 12/02/2009

Programa de Pós-graduação em Geografia.



UNICAMP

## UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA ÁREA ANÁLISE AMBIENTAL E DINÂMICA TERRITORIAL

## AUTORA: PRISCILA BROCHADO GOMES

Análise Espacial de Espécies Arbóreas Pertencentes à Floresta Estacional Semidecidual e ao Cerradão Baseada em Imagens de Alta Resolução Espacial.

#### ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcos César Ferreira

Aprovada em: 12/02/2009

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Marcos César Ferreira

Prof. Dr. João Roberto dos Santos

Dra. Marisa Gesteira Fonseca

Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior

Prof. Dr. Lindon Fonseca Matias

1	/		
(	Strat	-	
	2 March	- Pr	esidente
pai	Robert	66 ×	and
G	and and	RANC	3
Jone	din 2	10- 1	7
man	Juli Ju	en p	uno)
LE?	manos		
	)		

Campinas, 12 de fevereiro de 2009.

iii

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Paulo e Maria Luisa

Valeu a pena! Tudo vale a pena Se a alma não é pequena. Quem quer passar além do Bojador Tem que passar além da dor. Deus ao mar o perigo e o abismo deu Mas nele é que espelhou o céu!

Fernando Pessoa

#### AGRADECIMENTOS

Deixo aqui meus sinceros agradecimentos às instituições, colegas e profissionais cujo conhecimento e dedicação foram fundamentais para execução deste trabalho:

Ao Professor Marcos César Ferreira, pela sua impecável orientação, pelo seu exemplo de ética e por ter sempre acreditado em mim e neste trabalho, contribuindo com sua experiência e conhecimento.

Ao Professor João Roberto dos Santos, do INPE, que me ajudou desde o princípio, com sugestões na concepção do projeto, e por sua confiança no meu trabalho me convidando para ser palestrante do *VIII Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e SIG Aplicados à Engenharia Florestal.* 

À Professora Christel Lingnau, da Universidade Federal do Paraná, pela importante participação no trabalho, pelos valiosos ensinamentos e por me receber tão bem em Curitiba.

À Dra Marinez Ferreira de Siqueira, do CRIA, que chegou na reta final mas teve uma contribuição fundamental. Pela frutífera parceria e troca de conhecimentos nestes últimos meses.

Ao Professor Jorge Trabanco, da Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp, por ter sido sempre tão solícito e pela importante contribuição na etapa de georreferenciamento das imagens. A ele e ao Wagner pela boa disposição no exaustivo (e cheio de carrapatos...) trabalho de campo.

Aos Professores Eduardo Pinheiro, da Universidade Federal do Amazonas, e Giselda Durigan, do Instituto Florestal de São Paulo, por todas as informações e conhecimentos compartilhados que foram essenciais para a realização desta pesquisa.

Ao Professor Lindon Fonseca Matias, do Instituto de Geociências da Unicamp, e à Dra. Marinez Ferreira de Siqueira pelas sugestões durante a qualificação que ajudaram a enriquecer o trabalho.

Aos Professores João Roberto dos Santos, Jorandir Zullo Junior, Marisa Gesteira

Fonseca e Lindon Fonseca Matias, pelas valiosas contribuições dadas durante a defesa desta tese.

À FAPESP, pelo auxílio financeiro concedido a esta pesquisa.

Ao colega e amigo Édson Bolfe pelas incontáveis vezes que me ajudou tirando dúvidas sobre SIG e sensoriamento remoto, emprestando livros, indicando bibliografias.

Aos colegas do Instituto de Geociências da Unicamp, em especial ao Edson e à Bel, pelo convívio e amizade. Aos colegas da UFPR por me receberem tão bem em Curitiba, em especial à Lorena que me ajudou muito com o trabalho no ArcGIS.

À Flaviana de Souza pelos dados cedidos e por ter se disponibilizado a ajudar na identificação das árvores nas imagens. À Ana Cláudia Destefani pelos dados cedidos.

Aos funcionários do Instituto de Geociências da Unicamp, em especial ao Sr. Aníbal, por estar sempre disposto a ajudar, ao pessoal da informática, pelo apoio técnico prestado, e, principalmente, à Valdirene e Edinalva pelo exemplo de profissionais que são.

Aos funcionários da Estação Ecológica de Caetetus pela simpatia e apoio no trabalho de campo.

Ao Laboratório de Análise Espacial e Geoprocessamento, do Instituto de Geociências da Unicamp, que me proporcionou a estrutura necessária para realização desta pesquisa, além de ser um excelente ambiente de troca de conhecimentos.

À Unicamp que tem me proporcionado crescimento profissional e pessoal desde o colégio técnico, passando pela graduação, mestrado e agora doutorado.

À equipe do projeto temático da FAPESP "*Diversidade, Dinâmica e Conservação em Florestas do Estado de São Paulo: 40 ha de Parcelas Permanentes*", pelos dados de campo fornecidos.

Ao Centro de Referência em Informação Ambiental (CRIA), pelo auxílio no trabalho de modelagem.

Ao Jackson por ter reaparecido de uma maneira tão especial na minha vida e por ser meu maior incentivador.

Á minha querida família, em especial minhas irmãs, Deda e Keka, e meu sobrinho Diogo, por serem presença constante na minha vida.

Finalmente, mas sempre em primeiro lugar, aos meus pais, pelo amor incondicional, pelo exemplo de vida que são e por terem me permitido chegar até aqui.

#### SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	1
OBJETIVOS	6

## CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Biogeografia	7
1.2. Sensoriamento remoto em estudos biogeográficos da vegetação	. 13
1.2.1. As diferentes escalas no estudo florestal	. 15
1.2.2. Sensoriamento Remoto e a identificação de espécies arbóreas	. 18
1.2.3. Comportamento espectral da vegetação	. 19
1.2.4. Índices de Vegetação	22
1.2. Imagens Quickbird	27
1.3. Técnicas de processamento de imagens	28
1.3.1. Segmentação	28
1.3.1.1. Segmentação Multi-resolução	29
1.3.2. Classificação	30
1.3.2.1. Classificação Orientada a Objetos	31
1.4. Modelagem de Distribuição Potencial de Espécies	32

# CAPÍTULO 2: Classificação de copas de árvores de uma parcela de floresta estacional semidecidual baseado em imagens Quickbird através do método de Classificação Orientada a Objetos

2.1. Introdução	. 37
2.2. Material e Métodos	. 38
2.2.1. Área de estudo	. 38
2.2.2. Material utilizado	. 40
2.2.3. Dados de campo	. 40
2.2.4. Espécies de estudo	. 42
2.2.5. Correção geométrica das imagens	. 46
2.2.6. Fusão das imagens	. 48
2.2.7. Segmentação e classificação	. 48
2.2.8. Análise dos resultados	. 52
2.3. Resultados	. 52
2.3.1. Fusão das imagens	. 52

2.3.2. Segmentação e classificação	54
2.4. Discussão	61

## CAPÍTULO 3: Identificação de duas espécies de árvore (*Mabea fistulifera* e *Sclerolobium paniculatum*) em imagens Quickbird através do método de Classificação Orientada a Objetos

3.1. Introdução	.65
3.2. Material e Métodos	.66
3.2.1. Área de estudo	.66
3.2.2. Espécies estudadas	.70
3.2.3. Material utilizado	.72
3.2.4. Métodos	.73
3.2.4.1. Ortorretificação	.74
3.2.4.2. Obtenção dos pontos de ocorrência das espécies	.74
3.2.4.3. Segmentação e classificação	.75
3.2.4.4. Análise dos resultados	.79
3.3. Resultados	.82
3.4. Discussão	.95

## CAPÍTULO 4: Modelagem de distribuição potencial das espécies arbóreas *Mabea fistulifera* e *Sclerolobium paniculatum* na Estação Ecológica de Assis baseado em dados de alta resolução

4.1. Introdução	97
4.2. Objetivos	99
4.3. Material e Métodos	100
4.3.1. Área de estudo	100
4.3.2. Espécies estudadas	100
4.3.3. Dados de ocorrência	101
4.3.4. Planos de informação	102
4.3.5. Métodos de modelagem	105
4.4. Resultados	107
4.5. Discussão	113
CONSIDERAÇÕES FINAIS	115

BIBLIOGRAFIA	
ANEXOS	

#### LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Evolução no número de publicações indexadas na web-of-science com os termos de busca "remote sensing" e "forest", de 1968 até 04 de novembro de 2008
Figura 1.2: Corte transversal de uma folha. Fonte: <u>http://www.emc.maricopa.edu</u>
Figura 1.3. Curva de refletância típica de uma folha verde sadia na faixa óptica do espectro eletromagnético. Fonte: adaptada de Leblon (1999)
Figura 1.4. Espectro de ação para fotossíntese (curva superior) e o espectro de absorção para a clorofila a e b (curvas inferiores) no cloroplasto de uma planta. Fonte: <u>http://www.herbario.com.br</u> 22
Figura 1.5. Gráficos bidimensionais dos índices de vegetação baseados em inclinação (a) e baseados em distância (b) (Jackson e Huete 1991)
Figura 2.1. Mapa da Estação Ecológica de Caetetus, destacando sua localização no estado de São Paulo e a localização da parcela permanente estudada neste trabalho (Datum WGS-84, Fuso 22S)
Figura 2.2. Gráfico ombrotérmico da região de entorno da Estação Ecológica de Caetetus baseado em dados do município de Gália (julho de 2002 a agosto de 2008) (Fonte: IAC)
Figura 2.3. Desenho esquemático da parcela permanente da Estação Ecológica de Caetetus39
Figura 2.4. Aspidosperma polyneuron (Fonte: Lorenzi 2002)43
Figura 2.5. Balfourodendron riedelianum (Fonte: Lorenzi 2002)
Figura 2.6. Chorisia speciosa (Fonte: Lorenzi 2002)45
Figura 2.7. Gallesia integrifólia (Fonte: Lorenzi 2002)46
Figura 2.8. Posicionamiento do receptor GPS Topcon Hiper Lite durante o trabalho de campo (Foto da autora)
Figura 2.9. Hierarquia de classe usada na classificação50
Figura 2.10. Imagens Quickbird fundidas pelo método PCA utilizando respectivamente as bandas 4, 3 e 2 no sistema RGB
Figura 2.11. Imagens Quickbird fundidas pelo método PCA utilizando respectivamente as bandas 3, 2 e 1 no sistema RGB
Figura 2.12. Mapa do dossel da parcela da Estação Ecológica de Caetetus, gerado pela classificação orientada a objeto, considerando-se apenas as classes "perenifólia", "decídua" e "sombreada" (Datum WGS-84, Fuso 22S)
Figura 2.13. Mapa do dossel da parcela da Estação Ecológica de Caetetus, gerado pela classificação orientada a objeto com parâmetro escalar 10 (Datum WGS-84, Fuso 22S)
Figura 2.14. Mapa do dossel da parcela da Estação Ecológica de Caetetus, gerado pela classificação orientada a objeto com parâmetro escalar 20 (Datum WGS-84, Fuso 22S)

Figura 2.15. Mapa do dossel da parcela da Estação Ecológica de Caetetus, gerado pela classificação orientada a objeto com parâmetro escalar 40 (Datum WGS-84, Fuso 22S)
Figura 3.1 - Localização da Estação Ecológica de Assis no estado de São Paulo (Datum WGS-84, Fuso 22S) e imagem Quickbird da EEA
Figura 3.2: Gráfico ombrotérmico do município de Assis referente ao período de julho de 2002 a agosto de 2008 (Fonte: IAC)
Figura 3.3. Mapa de uso e ocupação do solo da Estação Ecológica de Assis em 2006 (Fonte: Durigan et al. 2008)
Figura 3.4. Sclerolobium paniculatum (Fonte: Lorenzi 2002)70
Figura 3.5. Mabea fistulifera (Fonte: Lorenzi 2000)71
Figura 3.6: Fluxograma dos procedimentos realizados para a classificação das imagens73
Figura 3.7: Detalhe dos agrupamentos de S. paniculatum (A, B e C) e M. fistulifera (D, E e F) nas imagens PAN (A e D), composição colorida com as bandas 4, 3 e 2 (B e E), e composição colorida com as bandas 3, 2 e 1 (C e F)
Figura 3.8. Mapa de distribuição potencial de Mabea fistulifera (A) e Sclerolobium paniculatum (B) na Estação Ecológica de Assis
Figura 3.9. Hierarquia de classe usada na classificação76
Figura 3.10. Localização dos pontos de controle (verdade de campo) da presença e ausência das espécies Sclerolobium paniculatum e Mabea fistulifera na estação ecológica de Assis
Figura 3.11. Mapa de distribuição espacial das espécies Sclerolobium paniculatum e Mabea fistulifera gerados pela classificação da imagem da Estação Ecológica de Assis utilizando-se o Tratamentos 2 (Imagens MS e parâmetros escalar 20)
Figura 3.12. Mapa de distribuição espacial das espécies Sclerolobium paniculatum e Mabea fistulifera gerados pela classificação da imagem da Estação Ecológica de Assis utilizando-se o Tratamento 2 (Imagens MS e parâmetros escalar 40
Figura 3.13. Mapa de distribuição espacial das espécies Sclerolobium paniculatum e Mabea fistulifera gerados pela classificação da imagem da Estação Ecológica de Assis utilizando-se o Tratamento 3 (Imagens MS e parâmetros escalar 80)
Figura 3.14. Mapa de distribuição espacial das espécies Sclerolobium paniculatum e Mabea fistulifera gerados pela classificação da imagem da Estação Ecológica de Assis utilizando-se o Tratamento 4 (Imagens MS mais modelos e parâmetros escalar 20)
Figura 3.15. Mapa de distribuição espacial das espécies Sclerolobium paniculatum e Mabea fistulifera gerados pela classificação da imagem da Estação Ecológica de Assis utilizando-se o Tratamento 5 (Imagens MS mais modelos e parâmetros escalar 40)
Figura 3.16. Detalhe das manchas de Mabea fistulifera classificadas pelo Tratamento 2 (A) e Tratamento 5 (B), na coloração vermelha, e as mesmas manchas visualizadas na imagem pancromática (C) e composição colorida (D, vermelho mais brilhante) do satélite Quickbird93

Figura 3.17. Detalhe de uma mancha de Sclerolobium paniculatum classificadas pelo Tratamento 2 (A) e Tratamento 5 (B), na coloração verde, e a mesma mancha visualizada na imagem pancromática (C, cor mais esbranquiçada) e composição colorida (D, vermelho mais claro) do satélite Quickbird. ......94

Figura 4.3. Mapa de distribuição potencial de Mabea fistulifera na Estação Ecológica de Assis ..111

Figura 4.5. Resultado do teste Jacknife para AUC dos dados de teste de Mabea fistulifera......112

#### LISTA DE TABELA

Tabela 1.1. Níveis de organização para o estudo florestal e seus componentes (adaptado deBongers 2001).16
Tabela 1.2. Exemplos de aplicação de sensoriamento remoto no estudo florestal em diferentes escalas.         17
Tabela 1.3. Especificações técnicas do Quickbird27
Tabela 2.1. Parâmetros usados para a segmentação multi-resolução da imagem Quickbird deCaetetus no programa Definiens Professional
Tabela 2.2: Matriz de confusão para análise da acurácia obtida na classificação digital da imagem Quickbird da Estação Ecológica de Caetetus pela técnica de Classificação Orientada a Objetos56
Tabela 2.3. Valores obtidos para a acurácia da classificação, segundo os índices Kappa, Tau e Exatidão Global
Tabela 2.4. Matriz de confusão para análise da acurácia obtida na classificação digital da imagem Quickbird da Estação Ecológica de Caetetus pela técnica de Classificação Orientada a Objetos
Tabela 2.5. Valores obtidos para a acurácia da classificação, segundo os índices Kappa, Tau e Exatidão Global
Tabela 3.1. Matriz de confusão para avaliação da qualidade da classificação da imagem Quickbird da Estação Ecológica de Assis pela técnica de Classificação Orientada a Objetos utilizando-se o tratamento 1 (Imagens MS e parâmetros escalar 20)
Tabela 3.2. Matriz de confusão para avaliação da qualidade da classificação da imagem Quickbird da Estação Ecológica de Assis pela técnica de Classificação Orientada a Objetos utilizando-se o tratamento 2 (Imagens MS e parâmetros escalar 40)
Tabela 3.3. Matriz de confusão para avaliação da qualidade da classificação da imagem Quickbird da Estação Ecológica de Assis pela técnica de Classificação Orientada a Objetos utilizando-se o tratamento 3 (Imagens MS e parâmetros escalar 80)
Tabela 3.4. Valores obtidos para a acurácia da classificação, segundo os índices Kappa, Tau e Exatidão Global para os tratamentos 1 (Imagens MS e parâmetros escalar 20), 2 (Imagens MS e parâmetros escalar 40) e 3 (Imagens MS e parâmetros escalar 80)
Tabela 3.5. Interpretação dos valores de Kappa segundo Landis e Koch (1977)
Tabela 3.6. Matriz de confusão para avaliação da qualidade da classificação da imagem Quickbird da Estação Ecológica de Assis pela técnica de Classificação Orientada a Objetos utilizando-se o tratamento 4 (Imagens MS mais modelos e parâmetros escalar 20)
Tabela 3.7. Matriz de confusão para avaliação da qualidade da classificação da imagem Quickbird da Estação Ecológica de Assis pela técnica de Classificação Orientada a Objetos utilizando-se o tratamento 5 (Imagens MS mais modelos e parâmetros escalar 40)
Tabela 3.8. Valores obtidos para a acurácia da classificação, segundo os índices Kappa, Tau e Exatidão Global para os tratamentos 1 (Imagens MS e parâmetros escalar 20), 2 (Imagens MS e

 Tabela 4.2. Resultado da análise da contribuição de cada variável ambiental para a geração do modelo pelo Maxent.

 112



## UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS Pós-Graduação em Geografia

Análise espacial de espécies arbóreas pertencentes à Floresta Estacional Semidecidual e ao Cerradão baseada em imagens de alta resolução espacial

## RESUMO Tese de Doutorado Priscila Brochado Gomes

O surgimento de sensores de alta resolução espacial permitiu que o nível de detalhamento das imagens de satélite chegasse ao ponto em que estudos de ecologia florestal pudessem ser realizados, através deste instrumento, com base em informações de espécies e indivíduos arbóreos. Tal tema de pesquisa é um campo promissor, já que a possibilidade de se estudar árvores de uma floresta à distância, pode contribuir para maior agilidade e menor custo do manejo florestal, minimizando custos de boa parte dos levantamentos de campo. Os objetivos deste trabalho foram investigar alguns procedimentos metodológicos utilizando imagens do satélite Quickbird, combinadas a dados de campo e a ferramentas computacionais para detecção, identificação e mapeamento de árvores de uma floresta semidecidua e de um cerradão no estado de São Paulo. O método de classificação orientada a objetos foi adequado para a identificação das espécies Sclerolobium paniculatum e Mabea fistulifera nas imagens Quickbird. A baixa resolução espectral destas imagens pode ser compensada pelo uso de informações espaciais dos indivíduos de interesse na classificação orientada a objetos. O método utilizado foi apropriado para a separação entre árvores decíduas e perenefólias da floresta semidecidua, porém, para esta formação florestal, a identificação de espécies não foi possível. Índices de vegetação obtidos através da álgebra de bandas de imagens Quickbird e Aster se mostraram boas fontes de informação para a elaboração de mapas de distribuição potencial de espécies arbóreas. Estes resultados indicam que, dependendo da formação florestal estudada e da espécie de interesse, a resolução espacial do satélite Quickbird pode ser satisfatória para a identificação de espécies arbóreas e que essas imagens têm grande aplicação em estudos biogeográficos.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS Pós-Graduação em Geografia

Spatial analysis of tree species from Semi-deciduous Seasonal Forest and Savanna Forest based on images with high spatial resolution

## ABSTRACT Doctorate Thesis Priscila Brochado Gomes

New high resolution satellite images, like lkonos and Quickbird, provide great potential to monitor and study trees of tropical forest through species identification and mapping. This topic of research is a promising field since remote sensing has potential to provide, at lower cost, forest information with great coverage than is attainable using field sampling. The objective of this thesis was to investigate some methodological proceedings using Quickbird images, combined with field data and informatics tools, to detection, identification and mapping of trees from a *cerradão* (Savanna Forest) and a semi-deciduous seasonal forest in the state of São Paulo. Sclerolobium paniculatum and Mabea fistulifera had good results in their identification by object oriented classification in Quickbird images. The low spectral resolution of Quickbird images is somewhat compensated by the spatial information available for the species of interest defined in our object-oriented classification. The species identification for semi-deciduous forest was not satisfactory, however in this kind of vegetation it was possible the separation among deciduous and evergreen trees. Vegetation indexes from Quickbird and Aster band math were good information source for tree species potential distribution maps. The results show that, depending on the forest type and species of interest, the spatial resolution of Quickbird images is sufficient for the identification of individual tree crowns. These images have big application in biogeography studies.

#### APRESENTAÇÃO

Nas últimas décadas, a atenção da comunidade científica e da sociedade em geral tem se voltado cada vez mais à exploração racional e conservação dos recursos naturais. Esse interesse tem coincidido com o período de maior pressão da sociedade sobre os sistemas naturais, levando à necessidade de se conhecer os elementos que os compõem. Dentre os processos impactantes, destacam-se a redução de áreas com cobertura florestal e, principalmente, a fragmentação das florestas e sua conseqüente degradação ambiental, em virtude da diminuição contínua do tamanho dos fragmentos e de seu isolamento (Silva *et al.* 2004).

Estudar e monitorar florestas tropicais em escalas regionais e locais é importante para diversos temas de interesse global, como o manejo sustentável de recursos naturais, a detecção de mudanças climáticas e conservação da biodiversidade (Read *et al.* 2003). A avaliação da biodiversidade tem se tornado uma das áreas prioritárias na pesquisa florestal (Innes & Koch 1998). A biogeografia tem contribuído para este tema ao estudar a distribuição da biodiversidade florestal em diversas escalas espaciais e temporais. Em particular, os biogeógrafos estão interessados em medir ou quantificar padrões de ocorrência e de distribuição de espécies, além de modelar ou gerar mapas de distribuição potencial de espécies e padrões de diversidade (Gillespie *et al.* 2008).

A forma mais precisa de se coletar dados biogeográficos é por meio de trabalhos de campo. Porém, os atuais métodos de levantamento de campo são trabalhosos e dispendiosos, resultando em baixa cobertura de amostragem e frequência. Além disso, em países como o Brasil, onde a taxa de biodiversidade é extremamente alta e a dimensão territorial é grande, os dados sobre a distribuição das espécies são relativamente esparsos e mal coletados. Desta forma, existe uma grande carência de dados de alta resolução sobre a ocorrência de espécies em um número grande de regiões. Por este motivo, os biogeógrafos estão continuamente pesquisando maneiras de mapear a distribuição e diversidade de espécies, o que pode ter grande aplicação em projetos de conservação (Foody *et al.* 2003).

O sensoriamento remoto tem um grande potencial como fonte de

informação sobre a biodiversidade em escalas global, continental, regional e local (Innes & Koch 1998, Turner *et al.* 2003). Seu principal atrativo como fonte de informação da biodiversidade é ser um meio relativamente barato de se obter uma cobertura espacialmente completa da informação ambiental, de maneira consistente e possível de ser atualizada com regularidade (Gillespie *et al.* 2008). O uso do sensoriamento remoto como ferramenta para estudos de biodiversidade tem se intensificado nos últimos anos. Tais estudos podem ser divididos em dois tipos de abordagem: a indireta e a direta (Gillespie *et al.* 2008, Turner *et al.* 2003). A abordagem indireta usa os sensores remotos para modelar a distribuição e a diversidade de espécies. Na abordagem direta, os sensores são utilizados para identificação de espécies (espécies arbóreas, por exemplo), tipos de cobertura do solo e elaboração de mapas de distribuição de agrupamentos de espécie (Gillespie *et al.* 2008). Ambas as abordagens têm grande aplicação em conservação de espécies e de ecossistemas, mas ainda estão em fase de desenvolvimento para sua total utilização.

A modelagem de distribuição de espécies - também denominada de modelagem de nicho ecológico - tem se desenvolvido muito desde o final dos anos 1980 (Guisan & Thuiller 2005). A maior parte dos preditores ambientais utilizados nestes modelos baseiam-se em dados geográficos de diferentes escalas. Cada vez mais estes dados estão sendo extraídos de sensoriamento remoto, como dados de clima, topográficos, de cobertura do solo ou índices de vegetação (Turner *et al.* 2003).

Para a identificação de espécies, os primeiros estudos de sensoriamento remoto utilizavam fotografias aéreas de alta resolução espacial para identificar plantas, especialmente árvores. Nos últimos anos, com o lançamento de sensores espaciais de alta resolução espacial, o uso destas imagens para a identificação de espécies arbóreas está sendo cada vez mais investigado. Para pesquisa com copas de árvores, a alta resolução espacial significa um *pixel* correspondendo, no máximo, a 1 metro no solo (Erickson 2004). As imagens de satélite de alta resolução, como o lkonos (1 m de resolução) e o Quickbird (0,6 m de resolução), podem servir para este fim, mas a exatidão e confiabilidade dos métodos para

estes estudos na densa floresta tropical ainda estão sendo investigadas (Read *et al.* 2003, Asner 2002).

Estudos recentes com imagens de satélite de alta resolução indicam que a classificação das copas baseada apenas em respostas espectrais não é suficiente para se identificar árvores da floresta tropical, pelo menos não quando consideradas apenas as poucas bandas das imagens pancromáticas ou multiespectrais (Clark *et al.* 2005, Antongiovanni *et al.* 2004, Pinheiro *et al.* 2004<sup>a</sup>, Pinheiro *et al.* 2004<sup>b</sup>, Venticinque *et al.* 2004, Read *et al.* 2003). Outras informações devem ser extraídas dessas imagens para compensar a baixa resolução espectral e aproveitar, assim, a sua alta resolução espacial.

Read e colaboradores (2003) acreditam que a combinação entre dados de imagens de satélite de alta resolução, dados de campo, associados à análise das características espectrais e espaciais dos dados de satélite, poderá fornecer informações de grande aplicação em pesquisa e manejo florestal, principalmente no mapeamento de espécies e no estudo da diversidade. O método de classificação orientada a objetos, disponível no programa *Definiens Professional*, surge como uma alternativa para a classificação dessas imagens. Isto porque este método considera, além do nível de cinza, a forma, a textura e as funções de um sistema de informação geográfica, contribuindo para o estreitamento do uso do geoprocessamento com imagens de sensoriamento remoto (Hoffmann e Vegt, 2001; Hájek 2005; Pinheiro 2003; Antunes 2003).

Este trabalho teve como objetivo contribuir para este campo de pesquisa através da análise e aplicação de alguns procedimentos metodológicos para a detecção, identificação e modelagem de distribuição potencial de árvores de duas formaçõe florestais situadas no estado de São Paulo (Floresta Estacional Semidecidual e Cerradão) baseados em imagens de satélite de alta resolução.

A tese está organizada em quatro capítulos independentes sendo que três foram elaborados na forma de artigos. Foi feita esta opção, pois consideramos que cada um possui objetivos, metodologia e resultados próprios que seriam melhor discutidos se apresentados separadamente. Além disto, este formato facilitará a publicação dos trabalhos em revistas especializadas. Porém, os três capítulos

tiveram como objetivo comum contribuir para o estudo de aplicações do sensoriamento remoto e de técnicas computacionais em estudos biogeográficos de espécies arbóreas da floresta tropical.

O primeiro capítulo contém a introdução geral, na qual é apresentada uma revisão dos principais conceitos e trabalhos na área de biogeografia e sensoriamento remoto voltados ao estudo florestal. Procurou-se abordar os estudos florestais realizados com sensoriamento remoto da escala global à escala do indivíduo arbóreo.

O capítulo 2, "Classificação de copas de árvores de uma parcela de floresta estacional semidecidual baseado em imagens Quickbird através do método *Classificação Orientada a Objetos*", trata de um estudo realizado em uma parcela da Estação Ecológica de Caetetus (Floresta Estacional Semidecidual) vinculado ao projeto temático da FAPESP "Diversidade, Dinâmica e Conservação em Florestas do Estado de São Paulo: 40 ha de Parcelas Permanentes" (processo 1999/09635-0). Este projeto temático apresenta uma grande dimensão de dados referentes aos aspectos físicos e bióticos de parcelas de 10 ha, sendo que neste trabalho foram utilizados os dados referentes à identificação е georreferenciamento das árvores do dossel florestal. O objetivo do trabalho foi identificar as copas das árvores do dossel da parcela e comparar os resultados com os dados de campo. Neste capítulo foi feita uma discussão acerca das limitações dos trabalhos de georreferenciamento de campo em uma escala tão detalhada e das potencialidades do uso de imagens Quickbird para a classificação de copas de árvores de uma Floresta Estacional Semidecidual.

O capítulo 3, "Identificação de duas espécies de árvores (Mabea fistulifera e Sclerolobium paniculatum) em imagens Quickibird através do método Classificação Orientada a Objetos", tratou da identificação nas imagens Quickbird dessas duas espécies de árvores que ocorrem no cerradão da Estação Ecológica de Assis. Para isto utilizou-se a técnica de Classificação Orientada a Objetos associando dados das imagens Quickbird com informações espaciais das espécies oriundas de seus mapas de distribuição potencial.

O experimento de modelagem da distribuição potencial das espécies

Mabea fistulifera e Sclerolobium paniculatum na Estação Ecológica de Assis é apresentado em detalhes e discutido no capítulo 4, "Modelagem de distribuição potencial das espécies arbóreas Mabea fistulifera e Sclerolobium paniculatum na Estação Ecológica de Assis baseado em dados de alta resolução". Neste experimento foram utilizados dados de ocorrência das espécies, um modelo digital de elevação da área e imagens índice de vegetação geradas através da álgebra de bandas das imagens Quickbird.

A tese termina com uma conclusão geral do trabalho, na qual são avaliados os procedimentos metodológicos e os resultados obtidos. Pretendemos nesta seção, discutir as potencialidades e as perspectivas do uso das imagens de alta resolução para o estudo de florestas tropicais.

#### HIPÓTESES

Nesta tese considera-se que as imagens Quickbird, devido a sua alta resolução, têm um enorme potencial para serem usadas em estudos florestais, uma vez que permitem a individualização de copas de árvores. Por outro lado, a mesma resolução provoca uma alta heterogeneidade de respostas espectrais dentro de uma mesma copa, o que torna a classificação tradicional, baseada em pixel, inadequada para a identificação de copas de árvores nestas imagens de alta resolução. Entende-se desta forma, que através do método de classificação orientada a objetos é possível identificar copas de árvores em imagens de alta resolução associando as resposta espectrais das copas com suas características espaciais.

Considera-se ainda que as imagens de alta resolução espacial, associadas a outras de maior resolução espectral, podem ser fontes importantes de informação do ambiente em que as espécies florestais ocupam. Considerando isto, estas imagens podem ser usadas como planos de informação adicional para a elaboração de mapas de distribuição potencial de espécies arbóreas em escala local.

#### **OBJETIVOS**

O objetivo principal deste trabalho foi testar procedimentos metodológicos para a detecção, identificação e modelagem de distribuição potencial de árvores de duas estações ecológicas pertencentes à Floresta Estacional Semidecidual e ao Cerradão (Estação Ecológica de Caetetus e Estação Ecológica de Assis) baseados em imagens de satélite de alta resolução. Os objetivos específicos são apresentados a seguir:

- Avaliar as resoluções espacial e espectral do sensor Quickbird para a identificação de copas de árvores de uma área de Floresta Estacional Semidecidual e outra de Cerradão.
- Testar as técnicas de Segmentação Multi-Resolução e Classificação Orientada a Objetos para a detecção e identificação de copas de árvores.
- Avaliar o efeito da utilização de dados espaciais das espécies na classificação orientada a objetos.
- Avaliar o uso de dados de satélite de alta resolução espacial e espectral na geração de modelos de distribuição potencial de espécies.
- 5. Apresentar mapas de distribuição real e distribuição potencial de espécies arbóreas na Estação Ecológica de Assis como forma de direcionar a busca de campo às espécies e indicar áreas propícias à sua ocorrência.

## CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

#### 1.1. Biogeografia

A diversidade biológica não se distribui uniformemente na superfície terrestre, e esta irregularidade não ocorre de forma aleatória ou ao acaso, mas determinada pela distribuição espacial de fatores físico-geográficos (clima, relevo, solo e disponibilidade de água) e antrópicos (uso e ocupação do solo). Desde que os europeus iniciaram suas expedições naturalistas nos séculos XVIII e XIX, em busca do conhecimento sobre a história natural ao redor da Terra, os biólogos e geógrafos se interessaram em conhecer os padrões de distribuição das espécies (Ricklefs 2004). A biogeografia possui uma longa e notável história, tendo sido objeto de estudo de grandes nomes da ciência natural dos séculos XIX, como Alexander von Humboldt, Charles Darwin, Alfred Russel Wallace e Joseph Dalton Hooker, bem como de alguns dos mais eminentes biólogos evolutivos do século XX, como Ernst Mayr, Robert MacArthur e Edward O. Wilson (Brown e Lomolino 2006). Porém, apenas a partir dos anos 1950, a biogeografia emergiu como uma ciência amplamente respeitada e com identidade própria (Brown e Lomolino 2006).

Biogeografia, segundo Brown e Lomolino (2006), é a ciência que se preocupa em documentar e compreender modelos espaciais de biodiversidade. Ainda segundo os autores, estuda a distribuição dos organismos, tanto no passado quanto no presente e os padrões espaciais relacionados à quantidade e aos tipos de seres vivos. Wittaker e colaboradores (2005) definem biogeografia como o estudo - em todas as escalas de análise possíveis - da distribuição da vida no espaço terrestre, e como, através do tempo, ela tem se modificado. De acordo com Troppmair (1987) e Viadana (2004), como parte integrante da ciência geográfica, a biogeografia se preocupa com as interações, organização e processos espaciais, com ênfase maior no estudo dos seres vivos que habitam determinado local, mediante uma abordagem espaço-temporal. Em todas suas

definições, a biogeografia assume uma conotação espacial, fato que a distingue de outros setores do conhecimento organizado como, por exemplo, a biologia, a botânica e a zoologia (Galina 2006).

Para Cowell e Parker (2003), a biogeografia está firmemente enraizada nas tradições da geografia, com forte ligação com a ecologia e a história, e abrange quatro temas principais:

 Foco proeminente em padrões e processos, investigando a grande amplitude de forças biológicas, físicas e culturais que afetam a distribuição de plantas e animais e, reciprocamente, são afetadas por ela.

 Ênfase nas mudanças na paisagem, geralmente resultantes da dinâmica da vegetação como conseqüência de mudanças históricas em diferentes escalas de tempo.

3. Análise da interferência humana na modificação de comunidades bióticas, bem como estudo de práticas de conservação.

 Ligação entre os elementos físicos e biológicos do meio ambiente, enfatizando a integração do clima, solos, hidrologia e a biota – sendo este o nexo entre a geografia física e a ecologia.

Ao estudar os seres vivos, a biogeografia pode apenas enfocar os vegetais (fitogeografia) ou apenas os animais (zoogeografia) (Troppmair 1987). Essas divisões podem sofrer novos desdobramentos conforme o enfoque dado ao estudo e à formulação dos problemas. Galina (2006), baseando-se em autores já consagrados na biogeografia, apresenta uma divisão desta ciência em oito sub-grupos, diferenciados segundo os recortes metodológicos de investigação:

 Biogeografia Ecológica: considera as inter-relações dos seres vivos com as condições geoecológicas do meio ambiente em determinado espaço geográfico.

• *Biogeografia Fitofisionômica*: preocupa-se em investigar os aspectos fisionômicos da vegetação (fitofisionomia), ou seja, a expressão desta no mosaico da paisagem em virtude de diferentes formas de crescimento.

 Biogeografia Faunística e Florística: enfoca, sobretudo, a distribuição geográfica e as causas da ocorrência de determinada espécie animal ou vegetal num dado espaço.

 Biogeografia Histórica e Evolucionista: a biogeografia histórica procura investigar as causas da distribuição atual dos seres vivos, além das diferenças e possíveis causas da extinção de espécies da flora e da fauna. A biogeografia evolucionista pode ser entendida como uma extensão da biogeografia histórica, entretanto, com mais ênfase no estudo na evolução dos seres vivos por meio da seleção natural, em decorrências das condições geoecológicas do passado.

 Biogeografia Antrópica: enfoca essencialmente o homem, ser vivo que é afetado e, ao mesmo tempo, influencia as condições ambientais, são pesquisas direcionadas para a análise dos impactos ambientais negativos sentidos e provocados pelo homem.

• *Biogeografia Regional*: enfatiza o estudo das espécies vegetais e animais que ocorrem em determinada região ou geossistema, integrando o mosaico da paisagem.

 Bioclimatologia: área que se preocupa com as inter-relações dos seres vivos, sobretudo com as condições climáticas e pedológicas de determinado espaço geográfico, considerando o valor e o aproveitamento econômico de espécies vegetais cultivadas pelo homem.

Porém, a divisão mais comumente utilizada em biogeografia é aquela que a separa em biogeografia histórica e biogeografia ecológica (Monge-Nájera 1999 e 2008). A abordagem histórica investiga as causas passadas da distribuição dos organismos, enquanto a abordagem ecológica estuda os fatores que definem a distribuição espacial das espécies no presente (Monge-Nájera 2008). Estes fatores são principalmente ecológicos, e incluem outros organismos e

características genéticas (fatores bióticos) bem como fatores ambientais como temperatura, umidade e salinidade (fatores abióticos) (Monge-Nájera2008).

Dentre os naturalistas que colaboraram para o início do desenvolvimento da biogeografia ecológica, Humboldt teve papel primordial, pois a partir de seus estudos, as ciências ambientais passaram a estudar a distribuição das espécies a partir da relação delas com o ambiente de entorno, o qual pode responder pelas causas dessa distribuição.

Em 1957, Hutchinson desenvolveu o conceito de nicho ecológico multidimensional para definir como as condições ambientais limitam a abundância e a distribuição das espécies. A visão de Hutchinson (1957) de nicho consistia em uma modificação dos primeiros conceitos de nicho de Grinnell (1917) e Elton (1927). Hutchinson percebeu que durante um período de tempo e sobre sua distribuição geográfica, cada espécie está limitada por certo número de fatores ambientais. Ele conceituou o ambiente das espécies como um espaço multidimensional no qual os diferentes eixos ou dimensões representam variáveis ambientais distintas. O nicho das espécies representa as combinações dessas variáveis que permite a sobrevivência dos indivíduos e a manutenção das populações. A amplitude geográfica de uma espécie pode ser vista como um reflexo espacial de seu nicho: a espécie ocorre onde as condições ambientais são adequadas e fora de áreas onde um ou mais recursos essenciais ou condições necessárias não estão presentes (Brown e Lomolino 2006).

Os conceitos de nicho propostos por Grinnell (1917), Elton (1927) e Hutchinson (1957) têm guiado grande parte dos estudos biogeográficos. A abordagem tradicional que estuda a distribuição das espécies baseia-se em duas etapas.

> A distribuição geográfica de uma espécie é sobreposta à distribuição geográfica de fatores ambientais, para identificar quais fatores coincidem com a amplitude geográfica da espécie. Apesar destes fatores serem em geral relacionados ao ambiente físico (por exemplo, temperatura, umidade, tipo de solo), eles podem ser também fatores do ambiente biótico da espécie (por exemplo,

distribuição dos predadores, competidores, parasitas, recursos, comunidades de vegetação).

 Uma determinada propriedade biológica da espécie é identificada (por exemplo, taxa reprodutiva, taxa metabólica, tolerância ao frio), a qual pode explicar a coincidência observada entre a amplitude geográfica da espécie e um fator ambiental (Parmesan *et al.* 2005). Por exemplo, o limite ao norte da distribuição de uma espécie de pássaro da América do Norte coincide com a isoterma de -4ºC de média de temperatura mínima no mês de janeiro. Root (1988) propôs que esta coincidência pode ser explicada pelas limitações energéticas dessa espécie para sobrevivência em temperaturas inferiores a -4ºC.

Técnicas estatísticas disponíveis em softwares mais recentes, como a análise das componentes principais, função discriminante, regressão múltipla e regressão logística, têm possibilitado a avaliação da correlação entre variáveis climáticas e a amplitude geográfica da distribuição de algumas espécies. Um exemplo de aplicativo dedicado a este tipo de abordagem é o BIOCLIM (Nix 1986). O surgimento dos Sistemas de Informação Geográfica e de dados digitais tem permitido a expansão dessas análises ao incluir variáveis não climáticas, tais como solo e topografia (Parmesan *et al.* 2005). Neste sentido, uma série de algoritmos de modelagem de distribuição de espécies, baseados em variáveis ambientais espacializadas, dados de ocorrência das espécies e utilizando o conceito de nicho, tem surgido recentemente. (Stockwell & Peterson 2003, Phillips *et al.* 2004).

Fenômenos como o aquecimento global, invasão de espécies exóticas, mudanças no uso da terra com conseqüente fragmentação de habitats e poluição, têm modificado a distribuição de várias espécies. Cada vez mais, os ecólogos estão sendo questionados com relação aos impactos atuais destes fenômenos nos sistemas naturais e às possíveis conseqüências das pressões antropogênicas

nas próximas décadas. Muitos dos problemas associados aos impactos humanos estão relacionados à biodiversidade e à distribuição de espécies e, desta forma, se inserem também, no campo da biogeografia (Parmesan et al. 2005). Uma das questões básicas relacionadas à conservação da biodiversidade é puramente biogeográfica, isto é, como podemos determinar onde os parcos recursos disponíveis devem ser melhor investidos para minimizar a perda da biodiversidade. Somados a esta crescente demanda por estudos sobre a distribuição biodiversidade, biogeografia da а tem se desenvolvido consideravelmente nos últimos anos graças à grande explosão de fontes de informação nas mais diversas áreas do conhecimento e aos avanços em técnicas de compilação, armazenagem, gerenciamento e análise de dados espaciais.

Uma das fontes de informação que mais tem contribuído para o desenvolvimento da biogeografia é gerada a partir de dados obtidos por sensoriamento remoto. As imagens de satélite e outras tecnologias de sensoriamento remoto têm fornecido - e prometem fornecer cada vez mais - uma grande quantidade de informações sobre a geologia, a topografia, a dinâmica das mudanças do clima, da vegetação e do uso do solo.

Algumas aplicações já estão em operação: rede de satélites e sensores de solo para monitorar o clima, radares de penetração para mapeamento de solos, imagens de satélite úteis para o mapeamento individual de plantas e outros objetos de tamanho similar, sistemas de posicionamento global baseados em satélite (GPS) para a localização precisa e mapeamento de locais e objetos. Em futuro recente, será possível monitorar com maior precisão árvores individuais em florestas temperadas e tropicais, utilizando-se tecnologia de sensoriamento remoto para mapear sua localização; medir suas alturas, as áreas da copas e o diâmetro do tronco; identificar árvores individuais; registrar seus padrões sazonais de desfolhação, floração e frutificação (Brown e Lomolino 2006).

Juntamente com a quantidade sempre crescente de dados de alta qualidade, temos os avanços em técnicas de compilação, armazenagem, gerenciamento, distribuição e análise desses dados. Muitos desses avanços metodológicos são resultados diretos da tecnologia computacional. A biogeografia

tem se beneficiado grandemente deste avanço da informática, em especial, com o uso dos sistemas de informação geográfica (SIG) que tem permitido a análise espacial dos dados de biodiversidade. Por essas razões, a biogeografia, como disciplina, tem um lugar garantido na ciência e deve continuar contribuindo para nosso entendimento com relação à distribuição da vida na Terra (Gillespie *et al.* 2008).

#### 1.2. Sensoriamento remoto em estudos biogeográficos da vegetação

O uso do sensoriamento remoto nos estudos biogeográficos da vegetação vem de longa data e sua história pode ser dividida em duas fases: período entre 1850 a 1970, quando o sensoriamento remoto era baseado na utilização de fotografias aéreas, e o período que se estende desde 1970 até os dias atuais, caracterizado pela multiplicidade de sistemas sensores multiespectrais e multitemporais (Barguil 1998).

Na década de 1850 foi realizado o primeiro mapeamento da cobertura vegetal por meio de fotografias aéreas obtidas por uma câmera presa a um balão (Olson & Weber 2000). Já na década de 1920, os Estados Unidos e o Canadá realizaram os primeiros mapeamentos sistemáticos de florestas utilizando também fotografias aéreas (Barguil 1998). Durante a Segunda Guerra Mundial, ocorreu o desenvolvimento de técnicas de sensoriamento remoto, dentre elas, a melhoria óptica das câmeras e das emulsões utilizadas, a introdução de novos sensores (radares) e o avanço dos sistemas de comunicação. Foi a partir da metade do século 20 que a interpretação visual de fotografias aéreas se concretizou e, desde então, tem sido largamente utilizada (Holmström 2002).

Desde 1950, as principais escolas de silvicultura dos Estados Unidos e Canadá passaram a oferecer cursos de interpretação de fotos aéreas, momento em que as pesquisas nesta área foram ampliadas e melhor difundidas (Olson & Weber 2000).

Em 1972, foi lançado o primeiro satélite de recursos terrestres (ERTS-1), mais tarde denominado Landsat-1. A partir de então, iniciou-se um dos períodos

de maior avanço na ciência e tecnologia do sensoriamento remoto, assim como nas áreas relacionadas que utilizam este instrumento. Desde então, a resolução espacial dos satélites multiespectrais tem aumentado continuamente, destacandose o sensor Thematic Mapper (1982), cujo sistema tem produzido imagens com resolução espacial de 30 m em sua primeira fase (TM5) e posteriormente de 15 m na segunda fase (TM7) (Carleer & Wolff 2004). A partir de 1986, o SPOT XS (resolução de 20 m) e o Ikonos-2 (com 4 m de resolução) (Carleer & Wolff 2004), e o Quickbird (resolução 2,4 m) têm fornecido imagens multiespectrais de alta qualidade.

Até 1999, a resolução espacial das imagens de satélite disponíveis era incompatível com a precisão geométrica e o nível de detalhamento requerido para o mapeamento da vegetação em uma escala local. O estudo de áreas com escalas variando de 1:5.000 a 1:500 só era realizado a partir de fotografias aéreas de alta resolução (Carleer & Wolff 2004). Estas têm sido utilizadas na detecção, delineamento e identificação de indivíduos arbóreos de alguns tipos de florestas.

Ainda hoje, a fotografia aérea permanece como um instrumento efetivo e largamente utilizado nos estudos de vegetação. Porém, os lançamentos dos satélites *lkonos*, em 1999 e *Quickbird*, em 2001, abriram novas possibilidades para o estudo das florestas, uma vez que as imagens geradas por estes satélites apresentam alta resolução espacial - 1 m para o lkonos e 0,6 m para o Quickbird - compatível, em alguns casos, ao de uma fotografia aérea, com a vantagem do menor custo por área de abrangência (Carleer & Wolff 2004). O surgimento das imagens de satélite de alta resolução abriu portas para um novo campo promissor nas áreas de pesquisa relacionadas à botânica, fitossociologia e ecologia (Read *et al.* 2003).

A evolução da tecnologia de sensoriamento remoto foi acompanhada por uma crescente produção científica na área. A pesquisa que utiliza esta ferramenta para o estudo florestal não ficou atrás. Uma busca na *web-of-science* por publicações que apresentam os termos *"remote sensing"* e *"forest"* retornou um total de 2273 trabalhos de 1968 até 4 de novembro de 2008. O rápido crescimento no número de publicações a partir da década de 1990 é facilmente visualizado na

figura 1.1, sendo que mais da metade dos trabalhos foram publicados nos últimos cinco anos (1221 trabalhos de 2004 a 2008). Além da crescente evolução do sensoriamento remoto, o surgimento dos microcomputadores pessoais, a partir da década de 1990, contribuiu para a popularização do uso desta ferramenta para estudo florestal, o que se refletiu no aumento no número de publicações nesta área.



Figura 1.1. Evolução no número de publicações indexadas na *web-of-science* com os termos de busca "*remote sensing*" e "*forest*", de 1968 até 04 de novembro de 2008.

#### 1.2.1. As diferentes escalas no estudo florestal

A diversidade de abordagens segundo as quais a floresta pode ser estudada, medida e descrita, é extremamente grande, abrangendo uma série de níveis de organização, das pequenas escalas (distribuição das florestas no globo) às grandes escalas (cada árvore de uma floresta) (Tabela 1.1). Por causa destes diferentes níveis de organização, são necessárias diferentes técnicas para seu

estudo, sendo fundamental para se definir com exatidão os objetivos e as questões de uma pesquisa.

Nível de organização	Componentes
Floresta em um mosaico de paisagem	• Floresta - não floresta, em várias escalas
	espaciais
Tipos florestais	• Diferentes tipos de fisionomias florestais
	(Exemplo: Cerradão, Floresta Ombrófila
	Densa, Floresta Semidecidua)
Manchas (patches) dentro da floresta	Fases sucessionais
	• Diferenças locais no ambiente (e.g.
	condições do solo)
Indivíduos	• Espécies (gênero, família, formas de vida,
	modelos de arquitetura)
	• Tamanho (altura, diâmetro, fase de
	desenvolvimento)
Partes da planta	• Copa (níveis de ramificação, classes de
	idade, folhas, ramos, flores, frutos)

Tabela 1.1. Níveis de organização para o estudo florestal e seus componentes (adaptado de Bongers 2001).

Uma floresta pode ser considerada uma mancha (patch) em um mosaico de paisagem, geralmente consistindo de manchas de diferentes tipos florestais. Cada floresta é também um mosaico de diferentes manchas (por exemplo, estágios sucessionais), que por sua vez são constituídas de um mosaico representado pelas copas das árvores. Estes mosaicos formam uma estrutura florestal em cada nível escalar (Bongers 2001). Para o estudo destas manchas, várias técnicas de campo estão disponíveis. Estes estudos são, todavia, complicados. Primeiro devido à variedade de parâmetros e diferentes níveis que podem ser usados como base para estes estudos. Segundo porque, em boa parte das florestas, principalmente as florestas tropicais, o acesso é difícil. Isto torna este tipo de pesquisa difícil e dependente de grande disponibilidade de tempo e recursos, podendo resultar em baixa cobertura de amostragem e freqüência. As técnicas de sensoriamento remoto são potencialmente uma alternativa de baixo custo ao levantamento de campo (Pouliot et al. 2002).

Técnicas de sensoriamento remoto de baixa resolução já são, há algum tempo, utilizadas para estudo florestal em pequenas escalas. Mais recentemente, com o desenvolvimento de técnicas de sensoriamento remoto de alta resolução, estudos mais detalhados, ao nível da copa de uma árvore, têm se tornado possíveis. A Tabela 1.2. mostra alguns exemplos de aplicações e trabalhos realizados com dados de sensoriamento remoto em três níveis escalares.

Escala	Sensores	Resolução	Exemplos de aplicação	Exemplos de
		espacial		publicação
Pequena (regional e continental)	Noaa Modis	1,1 km 250, 500 e	Mapeamento de florestas em escala global/continental	Achard e Blasco (1990), Box <i>et al.</i> 1989, Nunes 2008
		1000 m	Detecção de incêndio e desmatamento florestal	Woodwell <i>et al.</i> 1987
			Modelagem de distribuição potencial de espécies	Peterson <i>et al.</i> 2005, Peterson <i>et al.</i> 2008
			Mudanças sazonais da vegetação	Achard & Blasco (1990); Huete <i>et al.</i> (2006)
Média (sub- regional)	Aster Landsat Spot	15 a 90 m	Estrutura e/ou biomassa florestal	Fearnside (1996), Foddy <i>et al.</i> (2003),
	Obers		Detecção de incêndio e desmatamento florestal	Woodwell <i>et al.</i> 1987
			Mapeamento de floresta em escala regional	Nunes (2008)
Alta (local)	Ikonos Quickbird Fotografias	Menor que 4 m	Estrutura do dossel	Asner <i>et al.</i> (2002); Read <i>et al.</i> (2003);
	401043		Detecção de copas e identificação de espécies	Key <i>et al.</i> (2001); Trichon & Julien (2006); Carleer Wolff (2004); Erickson (2004); Pouliot <i>et al.</i> (2002)

Tabela 1.2. Exemplos de aplicação de sensoriamento remoto no estudo florestal em diferentes escalas.

#### 1.2.2. Sensoriamento Remoto e a identificação de espécies arbóreas

A interpretação visual de fotografias aéreas de alta resolução espacial tem sido o método tradicional de identificação de espécies de copas em florestas de baixa diversidade de árvores, como as florestas de coníferas e as florestas decíduas situadas em regiões de alta latitude (Clark *et al.* 2005). As espécies de árvores destas regiões podem ser identificadas em fotografias aéreas por meio de três etapas consecutivas.

- A primeira etapa consiste em eliminar aquelas espécies cuja presença em uma determinada área seja impossível ou improvável devido à localização, fisiografia ou ao clima.
- A segunda etapa estabelece quais grupos de espécies podem ocorrer nesta área, baseada em conhecimentos relativos às espécies e às suas exigências,
- A terceira e última etapa refere-se à identificação de espécies utilizando princípios básicos de foto-interpretação que levam em consideração características como forma, tamanho, padrão, sombra, tom e textura das copas (Lillesand & Kiefer 1995).

Quando se dispõe de imagens multi-temporais, a fenologia das árvores também é levada em consideração.

Em áreas tropicais, onde a quantidade de espécies de árvores pode ser maior que 300 indivíduos por hectare, os estudos sobre identificação de espécies arbóreas através de fotointerpretação são mais complexos e têm sido realizados principalmente para a identificação de uma ou até duas espécies. Estudos de fotointerpretação para identificação de um número maior de espécies de árvores tropicais são ainda muito raros (Trichon & Julien 2006).

Nos últimos anos, vem crescendo o número de trabalhos que avaliam o potencial das imagens de satélite na identificação de árvores de uma floresta. Carleer e Wolff (2004) conseguiram identificar sete espécies diferentes de árvores em área florestal situada na Bélgica, utilizando imagens *Ikonos.* Porém, estas espécies não foram identificadas através de individualização das árvores, mas
sim, por meio da análise das formações monoespecíficas.

Read *et al.* (2003) realizaram um estudo associando dados do satélite *lkonos* a medidas e observações de campo de indivíduos arbóreos, clareiras e áreas de extração de madeira na Amazônia, com o objetivo de avaliarem o potencial destas imagens na caracterização da estrutura e dinâmica de uma floresta tropical. Neste estudo, foram associados dados pancromáticos de 1 m de resolução a dados multiespectrais de 4 m de resolução. Os autores concluíram que é possível efetuar a distinção de várias copas individuais nas imagens *lkonos*, particularmente aquelas de árvores emergentes. Porém, em várias áreas não foi possível determinar várias copas presentes no dossel.

Estes resultados indicam que a resposta espectral da vegetação, em relação às bandas das imagens multiespectrais, não é suficiente para a identificação de indivíduos arbóreos da floresta tropical. Um trabalho realizado por Clark e colaboradores (2005) obteve uma alta eficiência na discriminação de espécies de árvores tropicais em imagens aéreas hiperespectrais (banda espectrais estreitas) e a discriminação de espécies diminuiu significativamente quando foram usadas imagens multiespectrais (bandas espectrais largas). Outras informações devem ser extraídas, portanto, das imagens multiespectrais para compensar a baixa resolução espectral e aproveitar a sua alta resolução espacial. Read e colaboradores (2003) acreditam que a combinação entre dados de imagens de satélite de alta resolução, dados de campo sobre a estrutura e a função da floresta e a análise das características espectrais e espaciais dos dados de satélite, poderão fornecer informações de grande aplicação em pesquisa e manejo florestal, principalmente no mapeamento de espécies e no estudo da diversidade.

### 1.2.3. Comportamento espectral da vegetação

O termo comportamento espectral relaciona-se com as propriedades de refletância da radiação eletromagnética do alvo, no caso, da vegetação. As folhas são os elementos da vegetação que mais contribuem para o sinal detectado por

sensores ópticos (Colwell, 1974), sendo que as propriedades espectrais de uma única folha dependem de sua composição química, morfologia e da estrutura interna.

Num corte transversal de uma folha pode-se observar uma série de camadas mais ou menos paralelas que são: a epiderme superior e a inferior, o parênquima paliçádico e o esponjoso, que compreendem o mesófilo (Figura 1.2). A disposição destas camadas na folha influencia a resposta espectral da vegetação na região do infravermelho, como será discutido a seguir.



Figura 1.2: Corte transversal de uma folha. Fonte: http://www.emc.maricopa.edu

A Figura 1.3 apresenta a curva de refletância típica de uma folha verde sadia, bem como os fatores determinantes de seu comportamento nas regiões do visível, do infravermelho próximo e do infravermelho médio do espectro eletromagnético.

Região do visível (0,4 – 0,7 μm)

Nessa região, a maior parte da radiação incidente é absorvida, sendo o mecanismo dominado pela presença de pigmentos na folha, principalmente pelas clorofilas *a* e *b* (Figura 1.4), carotenos e xantofilas (Ponzoni 2001). Devido à clorofila, a curva apresenta duas bandas de absorção bem destacadas - uma centrada em 0,45  $\mu$ m (região do azul) e outra em 0,65  $\mu$ m (região do vermelho), e um pico de refletância localizado em torno de 0,54  $\mu$ m (região do verde) (Ponzoni 2001).



Figura 1.3. Curva de refletância típica de uma folha verde sadia na faixa óptica do espectro eletromagnético. FONTE: adaptada de Leblon (1999).

Região do infravermelho próximo (0,7 – 1,3 μm)

A região do infravermelho próximo é caracterizada pela alta refletância e baixa absorção, decorrente de um espalhamento interno devido à estrutura interna da folha, mais especificamente do arranjo do mesófilo (Ponzoni 2001).

Região do infravermelho médio (1,3 – 3,0 μm)

O comportamento nessa região é influenciado também pela estrutura da folha, mas grande parte é afetada pela concentração de água nos tecidos, com forte absorção ocorrendo em 1,45 e 1,95 µm, causando picos de refletância entre as regiões de absorção, aproximadamente em 1,65 e 2,2 µm (Ponzoni 2001).

No que se refere ao dossel, o arranjo das folhas influencia a interação da radiação eletromagnética com as plantas. Em particular, a fotossíntese e a sua produção são determinadas pelo espalhamento de luz dentro do dossel, o qual depende do azimute, da inclinação e da distribuição espacial das folhas (Goel &

Strebel 1984).

De acordo com Goel (1988), são muitos os fatores que determinam a refletância do dossel: fluxo solar incidente, propriedades espectrais dos elementos da vegetação (folhas, galhos, troncos), arquitetura do dossel e espalhamento pelo solo.



Figura 1.4. Espectro de ação para fotossíntese (curva superior) e o espectro de absorção para a clorofila a e b (curvas inferiores) no cloroplasto de uma planta. Fonte: http://www.herbario.com.br

## 1.2.4. Índices de Vegetação

Os índices de vegetação (IVs) são combinações de dados espectrais com o objetivo de realçar o sinal da vegetação, ao mesmo tempo em que minimizam as variações de irradiância solar e os efeitos do substrato no dossel vegetal (Jackson & Huete 1991). A maior parte dos IVs baseia-se no fato da vegetação possuir refletância específica nas regiões do vermelho e do infravermelho próximo, como discutido acima, o que a diferencia de outros alvos terrestres.

Como também foi discutido anteriormente e ilustrado na Figura 1.3, a vegetação apresenta uma relação inversa entre as radiações do vermelho (R) e infravermelho próximo (NIR). Esta relação fica evidente pela alta absorção da radiação vermelha pela clorofila e pela alta reflexão da radiação infravermelha na

camada interna de células dos vegetais. Isto assegura que os valores do vermelho e do infravermelho próximo serão inteiramente distintos, logo a razão NIR/R apresentará valores mais altos em função da maior quantidade de biomassa na cobertura vegetal.

Jackson e Huete (1991) classificam os IVs em dois grupos: baseados na inclinação e baseados na distância. Para entender essa distinção, é necessário considerar a posição dos pixels de vegetação em um gráfico bidimensional da refletância do vermelho *versus* a do infravermelho (Figura 1.5). Os IVs baseados na inclinação são simples combinações aritméticas que focam no contraste entre os padrões de resposta espectral da vegetação no vermelho e no infravermelho próximo. Eles são assim denominados, porque alguns valores particulares do índice podem ser produzidos por um grupo de valores de refletância no NIR/R que formam uma linha iniciada na origem do gráfico bidimensional. Assim, os índices podem produzir um espectro cujas linhas diferem em sua inclinação (Figura 1.5a).



Figura 1.5. Gráficos bidimensionais dos índices de vegetação baseados em inclinação (a) e baseados em distância (b) (Jackson e Huete 1991).

A <u>Razão entre bandas</u>, um exemplo de IV baseado na inclinação, pode ser considerado o mais básico dos índices obtidos a partir de imagens de satélite. Foi proposto por Jordan (1969) para separar a vegetação verde do solo em imagens Landsat. Caracteriza-se pela divisão entre os valores de refletância das bandas do

infravermelho próximo pelos do vermelho.

$$Razão = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_R}$$

onde:

 $\rho_{NIR}$  = valor de refletância no infravermelho próximo  $\rho_{R}$  = valor de refletância no vermelho

O resultado da razão revela o grau de contraste entre as bandas do vermelho e do infravermelho para os pixels de vegetação, sendo que os altos valores são resultantes da combinação entre a baixa refletância no vermelho (por causa da absorção da clorofila) e a alta no infravermelho (como resultado da estrutura das folhas).

O IV baseado na inclinação mais largamente utilizado é o <u>NDVI</u> (índice de vegetação da diferença normalizada), introduzido por Rouse *et al.* (1974). O NDVI expressa a diferença entre as bandas do infravermelho próximo e do vermelho normalizada pela soma destas bandas. Ou seja:

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(\rho_{NIR} + \rho_R)}$$

onde:

 $\rho_{NIR}$  = valor de refletância no infravermelho próximo  $\rho_{R}$  = valor de refletância no vermelho

É o índice de vegetação mais comumente utilizado, pois minimiza os efeitos topográficos produzindo uma escala de medida linear. O NDVI pode ser relacionado à biomassa, ao índice de área foliar, à produtividade primária, à radiação fotossintética, ao dióxido de carbono e a parâmetros meteorológicos e ecológicos, tais como variações sazonais em diferentes tipos de vegetação (Nunes 2008). Entretanto, este índice é bastante sensível às características do substrato da vegetação e, para contornar esse problema, uma série de novos

índices foi proposta.

Em função da influência do solo sobre os valores do NDVI, Huete (1996) propôs o <u>EVI</u> (índice de vegetação realçado) como objetivo de reduzir o efeito do substrato. O EVI é um índice otimizado em relação aos outros IVs e oferece uma redução dos fatores principais que interferem na discriminação da cobertura vegetal, como as influências atmosféricas e do solo.

O EVI é expresso pela seguinte equação:

$$EVI = G. \frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(\rho_{NIR} + C1.\rho_R - C2.\rho_B + L)}$$

onde:

 $\rho_{NIR}$  = valor de refletância no infravermelho próximo

 $\rho_R$  = valor de refletância no vermelho

 $\rho_B$  = valor de refletância no azul

C1 e C2= coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera para a banda do vermelho e azul

L = fator de ajuste para o solo

G = fator de ganho

Os valores adotados para estes coeficientes são: L=1; C1=6; C2=7,5 e G=2,5 (Huete 1996).

Em contraste com o grupo baseado na inclinação, os IVs baseados na distância medem o teor de vegetação presente no terreno a partir da distância de um pixel à linha de refletância do solo exposto, traçada no diagrama bidimensional NIR x R. Um conceito chave aqui é que um gráfico bidimensional (vermelho x infravermelho) dos pixels de solo exposto com diferentes graus de umidade tende a formar uma linha (conhecida como linha do solo). Com o aumento da cobertura vegetal, os pixels de vegetação tendem a se afastar da linha do solo (Figura 1.5b). Todos os membros deste grupo (como o Índice de Vegetação Perpendicular – PVI) requerem que a inclinação e a intersecção da linha do solo sejam definidas

para que a imagem seja analisada (Jackson e Huete 1991).

O <u>PVI</u> (índice de vegetação perpendicular), sugerido por Richardson e Wiegand (1977) é o índice que deu origem a todos os IVs baseados em distância. O PVI usa a distância de cada pixel à linha do solo (figura 1.5b) e é baseado na seguinte equação:

$$PVI = a.\rho_{NIR} - b.\rho_{R}$$

onde:

 $\rho_{NIR}$  = valor de refletância no infravermelho próximo

 $\rho_R$  = valor de refletância no vermelho

a e b são os coeficientes ajustados para a linha do solo.

Além dos índices associados à quantidade de biomassa vegetal e à absorção da clorofila, outros tipos de índice relacionados à vegetação podem ser extraídos das imagens de satélite. Um exemplo são os índices de pigmento das folhas, os quais fornecem uma medida relacionada ao estresse dos pigmentos presentes na vegetação, como os índices de refletância da antocianina. As antocianinas são pigmentos abundantes em folhas que estão se formando e naquelas que estão se tornando senescentes (Gitelson *et al.* 2001). Estes índices são aplicados ao monitoramento de culturas, estudos do ecossistema, análise de estresse no dossel e agricultura de precisão. Um exemplo destes indicadores é o <u>ARI</u> (Índice de Refletância da Antocianina) proposto por Gitelson e colaboradores (2001). Valores altos do ARI indicam altas concentrações de antocianina na vegetação como reflexo do crescimento de folhas novas ou morte de folhas. O ARI é definido pela seguinte equação.

$$ARI = \rho_{NIR} \cdot \left( \frac{1}{\rho_{550}} - \frac{1}{\rho_{700}} \right)$$

onde:

 $\rho_{NIR}$  = valor de refletância no infravermelho próximo

 $\rho_{550}$  = valor de refletância na faixa dos 550 nm  $\rho_{700}$  = valor de refletância na faixa dos 700 nm

## 1.2. Imagens Quickbird

A partir da segunda metade da década 90, buscando superar algumas limitações das imagens adquiridas pelos satélites da série LANDSAT (*Land Satellite*), SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*), entre outros, foram lançados novos sistemas orbitais com alta resolução espacial (Tanaka e Sugimura, 2001). No ano de 2000, a empresa norte-americana DigitalGlobe, responsável pelo programa do QUICKBIRD, obteve a licença da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) para operar um sistema com alta resolução espacial. Em outubro de 2001, o satélite QUICKBIRD foi lançado à órbita (Pinheiro 2003). A Tabela 1.3 ilustra as especificações técnicas deste satélite (Pinheiro 2003).

Data de lançamento	18 de outubro de 2001		
Veículo de lançamento	Boeing Delta II		
Local de lançamento	Vandenberg Air Force Base, California		
Altitude da órbita	450 km		
Inclinação da órbita	97,2 graus – hélio sincrônica		
Velocidade	7,1 km/segundo		
Tempo de órbita	93,5 minutos		
Tempo de revisita	1-3, 5 dias dependendo da latitude (30º off-nadir)		
Largura da faixa imageada	16,5 km ( <i>nadir</i> )		
Acurácia métrica	23 m horizontal		
Resolução	Pan: 60 cm ( <i>nadir</i> ) to 72 cm (25º off-nadir)		
	MS: 2,44 m ( <i>nadir</i> ) to 2.88 m (25º <i>off-nadir</i> )		
Bandas	Pan: 450 - 900 nm		
	Azul (B1): 450 - 520 nm		
	Verde (B2): 520 - 600 nm		
	Vermelho (B3): 630 - 690 nm		
	Infra-vermelho próximo (B4): 760 - 900 nm		

Tabela 1.3. Especificações técnicas do Quickbird.

### 1.3. Técnicas de processamento de imagens

#### 1.3.1. Segmentação

A segmentação permite dividir uma imagem em grupos de pixels ou objetos de acordo com determinado grau de homogeneidade, a fim de associá-los a uma feição do terreno. Dependendo do tipo de imagem e do objetivo, diferentes métodos de segmentação podem ser aplicados.

A segmentação de uma imagem pode ser definida, conforme Fu & Mui (1981), como a divisão de uma imagem em diferentes regiões, onde cada uma delas possui propriedades específicas. Antunes (2003) destaca que as regiões consistem em um agrupamento de valores multiespectrais ou hiper-espectrais similares. A segmentação é uma componente importante para o reconhecimento de padrões. Entretanto, não existe um modelo formal para segmentação. O processo é essencialmente empírico e, em geral, ajustável aos diferentes tipos de imagem, com limiares definidos face à complexidade dos alvos investigados.

Uma das grandes desvantagens do agrupamento convencional é não considerar a característica espacial do *pixel* (Antunes 2003). Em imagens de alta resolução, este tipo de algoritmo possui uma eficiência reduzida. Segundo Schiewe *et al.* (2001), a alta resolução dos sensores aumenta o campo de variabilidade, e conseqüentemente o decréscimo operacional do agrupamento baseado somente na variância espectral.

A fim de superar as limitações dos segmentadores convencionais em imagens multiespectrais de alta resolução espacial, estudos se voltam a analisar os objetos de estrutura topológica vetorial agregados a informações espectrais. Desta forma, o aspecto espacial possui um importante papel e pode ser descrito por relações topológicas entre os objetos vizinhos. Antunes (2003) salienta que o procedimento de segmentação deve ser moldado de acordo com a resolução da imagem e com a escala (tamanho) esperada para os objetos.

Solberg *et al* (1996) enfatizam que a interpretação da cena e a informação contextual são importantes. Basicamente, relacionando um pixel a outras medidas,

mais informações podem ser geradas. O contexto pode ser definido ao longo de duas dimensões: a) dimensão espectral; b) dimensão espacial. A dimensão espectral refere-se a diferentes bandas do espectro eletromagnético. Modelando-se a correlação espectral, frequentemente há melhorias na separação entre as classes. A dimensão espacial é definida pela correlação espacial entre os pixels adjacentes e suas vizinhanças (Fan & Xia 2001).

### 1.3.1.1. <u>Segmentação multi-resolução</u>

Blaschke & Hay (2002) introduziram o conceito de evolução de rede fractal (*FNEA*: *fractal net evolution approach*), considerando-se para isto, a imagem de sensoriamento remoto como de natureza fractal. Ao se segmentar a imagem, simultaneamente de forma fina e de forma grosseira, dá-se origem a escalas de segmentação. O procedimento é similar ao crescimento de regiões que agrupa pixels ou sub-regiões em regiões maiores. Segundo Blaschke & Hay (2002), a segmentação da imagem resulta em objetos baseados em parâmetros espectrais e de forma, que podem ainda ser reagrupados em objetos maiores denominados *superobjetos* ou *regiões*. Estas regiões possuem relações com os segmentos que as constituem num nível hierárquico mais baixo. Esta é a principal característica do procedimento de segmentação denominado por Baatz & Schäpe (1999) de segmentação Multi-resolução.

Segundo Antunes (2003), o método proposto *FNEA* utiliza técnicas de segmentação baseada na estrutura de orientação a objetos. Ao contrário dos métodos fundamentados em pixels, a segmentação da imagem extrai objetos de interesse na escala desejada, onde a escala mais fina (objetos primitivos) está próxima da resolução da imagem.

De acordo com Schneider & Steinwendner (1999), os objetos gerados não se restringem às propriedades espectrais. Entre outros aspectos que podem ser explorados, encontram-se a textura, o tamanho e a forma dos objetos, bem como, a associação espacial entre os objetos que compõem a cena. Forma e tamanho são elementos importantes para a discriminação de objetos que possuem a mesma resposta espectral. Além dos parâmetros de forma inerentes aos objetos,

a análise da teoria dos fractais pode ser útil à descrição de pequenas variações de forma. Segundo Palmer (1988), a dimensão fractal pode ser utilizada como um índice da dependência espacial de uma variável do objeto.

A segmentação multi-resolução é um conceito que realiza a fusão de regiões (*region-merging*) que funciona da base para cima (bottom-up), onde os setores da imagem são agrupados par a par. Inicialmente, um pixel individual é sinônimo de um objeto da imagem ou de uma região. Nos passos seguintes, pequenos objetos da imagem são agregados gerando outros maiores. Em cada passo, o par adjacente do objeto da imagem é fundido segundo um patamar de crescimento definido para a heterogeneidade. O processo ocorre segundo um critério de homogeneidade, descrevendo a semelhança dos objetos vizinhos (Hofmann & Vegt 2001). A decisão de agrupar um pixel, ou não, será tomada por meio do Grau de Homogeneidade (GH). Os pixels (ou objetos) são associados se o GH calculado for inferior ao Parâmetro Escalar. O Parâmetro Escalar determina a máxima heterogeneidade dos objetos e influência o tamanho desses (Pinheiro 2003).

## 1.3.2. Classificação

Entre as principais aplicações das imagens de sensoriamento remoto, destacam-se a análise e o mapeamento temático do uso e cobertura da terra (Lillesand & Kiefer 2000). Os *pixels* que compõem uma imagem representam os diferentes alvos terrestres que possuem comportamentos específicos ao longo do espectro eletromagnético. A classificação digital de imagens representa o agrupamento e rotulação de *pixels* com características similares. Normalmente, a decisão sobre quais *pixels* devem ser rotulados e agrupados é realizada por métodos estatísticos (Lillesand & Kiefer 2000).

A análise estatística de um *pixel* individual em uma imagem de alta resolução, não é o método mais adequado para a representação da paisagem e nem dos fenômenos ecológicos. Outros parâmetros devem ser considerados na extração de informações, entre eles: textura, distância, localização e conceitos de

vizinhança. Neste sentido, a classificação por regiões e a segmentação da imagem são soluções importantes no processo de classificação (Hoffmann & Vegt 2001).

Os novos sistemas sensores orbitais, como o IKONOS-II e o QUICKBIRD, exigiram novos métodos para a extração de informações das respectivas imagens. Hoffmann e Vegt (2001) sugerem a classificação orientada a objeto para classificar imagens com alta resolução.

### 1.3.2.1. Classificação orientada a objeto

Problemas na classificação de imagens de alta resolução espacial não são exclusivos das pesquisas sobre copas de árvores. O surgimento destes novos sistemas sensores orbitais de alta resolução, exigiu novos métodos para a extração de informações das imagens, já que a classificação digital tradicional, baseada em pixels, mostrou-se problemática para a análise deste tipo de imagem (Hájek 2005). Estudos baseados em dados de alta resolução provaram que os métodos espectrais resultam em classificações pobres ou incorretas. Estudos recentes sugerem como alternativa a classificação baseada em objeto para classificar imagens com alta resolução (Hoffmann & Vegt, 2001; Hájek 2005; Pinheiro 2003; Antunes 2003).

Ao contrário dos métodos tradicionais para a classificação digital de imagens, na classificação baseada em objeto a análise é realizada sobre objetos ou segmentos na imagem e não apenas sobre *pixels*. Cada objeto ou segmento representa uma feição do mundo real, possuindo propriedades temáticas e geométricas (Antunes 2003). Desta maneira, o contexto espacial é descrito em termos de relações topológicas entre os objetos. Neste método são consideradas, além do nível de cinza, a forma, a textura e a funções de SIG - tamanhos de bordas de objetos e suas relações topológicas (Hofmann & Vegt 2001). Entre os motivos para se adotar a classificação de imagem baseada em objeto podem ser citados:

(a) o processamento de imagens se aproxima mais dos processos cognitivos humanos que as análises baseadas em *pixel*;

(b) em uma abordagem baseada em objetos, é mais fácil incorporar informações de contexto com significado, do que em uma abordagem baseada apenas em *pixels* (Gonçalves *et al.,* 2001).

Uma informação de contexto potencialmente útil para classificação de copas de árvores em imagens de satélite é o conhecimento do nicho ecológico da espécie e modelos de sua distribuição potencial, que podem ser somados às informações fornecidas pela imagem como mais um descritor na classificação orientada a objeto.

#### 1.4. Modelagem de distribuição potencial de espécie

A modelagem da distribuição potencial de espécies (MDPE) é fundamental tanto para a pesquisa básica como para a pesquisa aplicada à biogeografia. Nos últimos dez anos, modelos de distribuição de espécies têm se tornado comum nos estudos de biogeografia, biologia da conservação, ecologia, paleoecologia e manejo da vida silvestre (Araújo & Guisan 2006). Estes modelos exploram as relações entre ocorrências de espécies e uma série de variáveis ambientais que produzem dois tipos de informações úteis. A primeira é a estimativa da probabilidade de ocorrência de uma espécie em uma dada localidade na qual não foi registrada. A segunda é estimar a adequabilidade de uma área à ocorrência de determinada espécie (Araújo & Guisan 2006).

Para a realização da MDPE, são usadas coordenadas dos registros de ocorrência das espécies e mapas que resumem a informação ambiental sobre a distribuição dessas espécies. Os dados de ocorrência das espécies podem ser dados de presença ou de presença-ausência baseados em amostragens de campo aleatórias ou estratificadas, ou em observações obtidas de outras formas, como através de coleções de museus ou dados da literatura (Guisan & Thuiller 2005). Entretanto, os dados de ausência dificilmente estão disponíveis para uso em modelagem, e quando disponíveis, nem sempre refletem a inadequabilidade do ambiente para a ocorrência da espécie. Os dados de ausência devem, portanto

ser usados com cautela (Peterson et al. 2008).

Quando existem dados de presença e dados de ausência confiáveis, é possível utilizar métodos estatísticos para modelar a distribuição e nesta categoria estão o GLM (Modelo Linear Generalizado) e o GAM (Modelo Linear Aditivo) (Guisan *et al.* 2002). Quando só existem dados de presença, outra categoria de modelos tem que ser utilizada. Nesta categoria está o DOMAIN (Carpenter *et al.* 1993), o BIOCLIM (Busby 1986) e os algoritmos baseados em Distância Ambiental.

Existe ainda uma terceira categoria de algoritmos, denominados híbridos ou intermediários. Esses algoritmos usam dados de presença e de pseudo-ausências para gerar os MDPEs. Exemplos desse tipo de algoritmos são o algoritmo genético (GARP) (Stockwell & Peters 1999) e o de máxima entropia (MAXENT) (Phillips *et al.* 2006). Esses dados de pseudo-ausências (também conhecidos por *background pixels*) são pontos escolhidos aleatoriamente na área de estudo e que são usados como ausências durante a modelagem. Os dados abióticos tradicionalmente usados em modelagem são as camadas climáticas, topográficas e mais recentemente, índices de vegetação.

Os algoritmos de modelagem mais amplamente usados na literatura são:

<u>Bioclim</u> (Nix 1986): prevê as condições habitáveis de uma dada espécie baseado em um envelope ambiental, que consiste em uma região (reto-linear) representando a amplitude (ou uma porcentagem dela) de cada dimensão ambiental, baseado no cálculo da média e do desvio padrão dos valores ambientais presentes nos registros de ocorrência da espécie. Além deste envelope, cada variável ambiental tem um valor adicional referente aos limites máximo e mínimo, relacionado aos pontos de ocorrência. Sendo assim, cada pixel (célula) pode ser classificado como:

- adequado (suitable): se todos os valores ambientais estiverem dentro do envelope calculado (valores de média e desvio padrão);
- tolerável (marginal): se um ou mais valores ambientais estiverem fora do envelope, mas dentro dos valores limites máximos e mínimos das variáveis ambientais e

inadequado (unsuitable): se um ou mais valores associados estiverem fora dos valores limites máximos e mínimos das variáveis ambientais.

Um modelo é gerado com as probabilidades de 1.0, 0.5 e 0.0 (adequado, tolerável e inadequado, respectivamente).

<u>Environmental Distance</u>: algoritmo genérico baseado em dissimilaridade ambiental com quatro diferentes métricas para o cálculo de distância: Euclidiana, Mahalanobis, Chebyshev e Manhattan. A técnica normaliza os valores das variáveis ambientais e calcula a distância entre as condições ambientais para cada ponto de ocorrência e seleciona a menor distância (distância mínima); ou calcula o ponto médio no espaço ambiental considerando dois ou mais pontos de presença fornecidos e calcula a distância entre o ponto médio e cada ponto no espaço ambiental. Em ambos os casos, se o valor de distância calculado estiver entre o valor zero e o valor do parâmetro fornecido (valor máximo de distância que será utilizado), então a probabilidade de ocorrência estará entre [0,1], no caso da média da distância, com decaimento linear. Se o valor for superior ao valor do parâmetro, então a probabilidade será zero.

<u>GARP</u> (Genetic Algorithm for Rule-set Prediction): tem sido extensivamente usado para predições de distribuição geográfica de espécies (Peterson *et al* 2005, Peterson *et al* 2008, Anderson *et al* 2003, Stockwell & Peterson 2003). O GARP foca na modelagem de nicho ecológico (o conjunto de condições ecológicas na qual uma espécie pode manter sua população sem migrar), relacionando as características ecológicas dos pontos de ocorrência de pontos amostrados aleatoriamente do resto da região de estudo, desenvolvendo uma série de regras de decisões que melhor resumem os fatores associados com a presença (Peterson *et al* 2005). Baseado nas idéias de seleção natural e evolução, são aplicados operadores heurísticos às regras. São selecionadas as regras que melhor explicam a distribuição dos pontos de ocorrência da espécie, selecionando-se assim o melhor conjunto de regras que irá compor a solução final do problema (Stockwell & Peterson 2003).

Maxent (Phillips et al. 2004): baseia-se no princípio da máxima entropia, o

qual estabelece que a melhor aproximação a uma distribuição de probabilidades desconhecida é aquela que satisfaz qualquer restrição à distribuição. Trata-se de um método para realizar previsões ou inferências a partir de informações incompletas. A aplicação de máxima entropia na geração de MDE é estimar a probabilidade de ocorrência da espécie encontrando a distribuição de probabilidade da máxima entropia (que é a mais próxima da distribuição uniforme), submetidas a um conjunto de restrições que representam a informação sobre os pontos de ocorrência da distribuição alvo.

A seguir, os resultados são apresentados no formato de capítulos individualizados, contendo, nos dois primeiros capítulos, as principais conclusões referentes ao uso da classificação orientada a objetos, tanto para a identificação de copas decíduas e perenifólias, quanto para espécies arbóreas. Além destes dois capítulos, um terceiro mostra os resultados obtidos a partir da aplicação de técnicas de modelagem de distribuição potencial de espécies.

# **CAPÍTULO 2**

## Classificação de copas de árvores de uma parcela de floresta estacional semidecidual baseada em imagens Quickbird através do método de Classificação Orientada a Objetos

#### 2.1. Introdução

A Floresta Estacional Semidecidual constitui-se hoje na formação florestal mais ameaçada do estado de São Paulo, devido à sua fragmentação resultante da ocupação agrícola e expansão urbana do oeste paulista. Está localizada nas regiões mais desenvolvidas e densamente povoadas do estado, geralmente associada a solos de fertilidade média a alta, os mais procurados para expansão da fronteira agropecuária. As espécies de madeiras nobres mais conhecidas e mais utilizadas no Brasil no início do século XX eram quase todas provenientes dessas florestas, incluindo o cedro, a peroba, a cabreúva, os ipês, o pau-marfim, o jequitibá, o guarantã, o amendoim e muitas outras, o que contribuiu para a devastação deste ecossistema (Tabanez *et al.* 2005).

A recuperação e conservação deste bioma requerem o conhecimento e monitoramento dos elementos que o compõem. A informação sobre cada árvore individual aumenta o conhecimento sobre a floresta e pode ser útil para o manejo e avaliação da biodiversidade (Erikson 2004). Entretanto, os atuais métodos de levantamento de campo são trabalhosos e dispendiosos, resultando em baixa amostragem e freqüência. Técnicas de sensoriamento remoto são potencialmente uma alternativa para o trabalho de campo, mas requerem o desenvolvimento de métodos para a extração fácil e acurada das informações necessárias. Um método que possibilite a detecção e identificação de copas de árvores em imagens de sensoriamento remoto pode contribuir muito para o manejo e monitoramento deste tipo florestal.

O objetivo deste trabalho foi testar os métodos de Segmentação Multiresolução e Classificação Orientada a Objetos, para a detecção e identificação de copas de árvores em imagens Quickbird em uma parcela de 10 ha na Floresta Estacional Semidecidual da Estação Ecológica de Caetetus.

Primeiramente procurou-se classificar as copas em árvores decíduas ou perenefólias e posteriormente em espécie.

## 2.2. Material e métodos

## 2.2.1. Área de estudo

A Estação Ecológica de Caetetus (EEC) possui uma área contínua de 2.178,85 ha e está localizada na bacia hidrográfica do Médio Paranapanema, entre as coordenadas geográficas 22º41' e 22º46'S e 49º10' e 49º16'W, com altitude entre 500 e 680 m. A Unidade caracteriza-se como um grande fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, sendo um dos últimos remanescentes significativos deste tipo de formação vegetal no planalto ocidental paulista, desempenhando um importante papel como detentora de uma amostra representativa da flora regional. Abrange os municípios de Gália e Alvilândia, situados no estado de São Paulo (Figura 2.1). O clima, segundo Köppen (1948) é mesotérmico de inverno seco (Cwa) (Figura 2.2).

De acordo com Kronka et al. (2005), a região administrativa de Marília, onde está situada a Estação Ecológica dos Caetetus, está entre as regiões que apresentaram as maiores reduções (11,38%) da cobertura vegetal nativa no período entre 1990/02 e 2000/2001, sendo que atualmente, os ecossistemas naturais encontram-se quase totalmente dizimados na região. No entanto, a EEC constitui-se em um fragmento florestal relativamente extenso e com trechos muito bem preservados. Armazena várias espécies arbóreas ameaçadas de extinção, devido à agressividade do extrativismo nos demais remanescentes desse tipo florestal do estado nos últimos anos, como o guarantã (*Esenbeckia leiocarpa*), a peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron*) e a cabreúva (*Myroxylon peruiferum*), entre outras.



Figura 2.1. Mapa da Estação Ecológica de Caetetus, destacando sua localização no estado de São Paulo e a localização da parcela permanente estudada neste trabalho (Datum WGS-84, Fuso 22S).



Figura 2.2. Gráfico ombrotérmico da região de entorno da Estação Ecológica de Caetetus baseado em dados do município de Gália (julho de 2002 a agosto de 2008) (Fonte: IAC).

### 2.2.2. Material utilizado

- a) Imagens Quickbird com quatro bandas multiespectrais (resolução espacial de 2,4 m) e uma banda pancromática (resolução de 0,6 m); resolução radiométrica de 16 bits; arquivos RPCs (coeficientes polinomiais que permitem que a imagem seja ortorretificada) da EEC. As imagens foram tomadas no dia 29 de junho de 2006.
- b) Carta topográfica 1:50.000, Folha Gália (SF-22-Z-A-III-4), IBGE 1973.
- c) GPS Topcon modelos Topcon Hiper Lite

# Softwares

- d) ERDAS 8.5 para processamento de imagens
- e) ENVI 4.3 para processamento de imagens
- f) Definiens Professional 5.0 (eCognition) para classificação orientada a objetos
- g) Arcgis 9 ArcMap version 9.2 para análise espacial e processamento de imagens
- h) GeoTrans v1.0 (http://br.geocities.com/mausejas/) Transformação direta e inversa entre coordenadas geodésicas e coordenadas na projeção UTM, desenvolvido por Sejas (2006).
- i) UTM v1.0 (http://br.geocities.com/mausejas/) Transformação entre sistemas geodésicos de referência, versão 1.0 – Freeware. Desenvolvido por Sejas (2002).

# 2.2.3. Dados de campo

Todos os dados de campo utilizados neste trabalho foram coletados pela equipe do projeto "*Diversidade, Dinâmica e Conservação em Florestas do Estado de São Paulo: 40 ha de Parcelas Permanentes*" (processo 1999/09635-0). Para isso foram alocadas 256 sub-parcelas permanentes de 400 m<sup>2</sup> cada, numa parcela maior de 320 x 320 m, totalizando 10,24 ha (Figura 2.3). Em cada sub-parcela foram amostrados, georreferenciados e identificados quanto à espécie, todos os indivíduos com perímetro à altura do peito (PAP) maior ou igual a 15 cm. A altura e a posição do indivíduo em relação ao dossel também foram registradas. Os procedimentos de demarcação e georreferenciamento das parcelas, sub-parcelas

e árvores bem como o plaqueamento das árvores são descritos no Anexo 1.



Figura 2.3. Desenho esquemático da parcela permanente da Estação Ecológica de Caetetus.

Os dados de campo existentes foram organizados e separados os dados dos indivíduos das espécies emergentes ou de dossel (com mais de 50% da copa a pleno Sol) e que têm pelo menos 20 indivíduos sob estas condições. Estes dados foram então transformados em um arquivo do tipo *shape* no *software ArcGIS*.

Para algumas árvores do dossel de Caetetus foram coletados dados sobre os diâmetros maior e menor das copas das árvores. Baseados nestes dados e no posicionamento destas árvores nas sub-parcelas, foram identificadas visualmente na imagem copas de quatro espécies: *Aspidosperma polyneuron, Balfourodendron*  riedelianum, Chorisia speciosa e Gallesia integrifólia. Comparando-se o posicionamento destas árvores com as coordenadas atribuídas a elas pela equipe do Projeto Parcelas Permanentes, verificou-se erro no posicionamento das árvores. Uma análise mais acurada mostrou que o erro ocorria em todas as direções, o que inviabilizaria o uso de qualquer algoritmo para tentar corrigir estes pontos. Constatada a impossibilidade de usar o banco de dados completo do projeto temático, conforme o previsto no projeto original desta pesquisa, o estudo se restringiu às quatro espécies identificadas como descrito acima.

### 2.2.4. Espécies de estudo

Aspidosperma polyneuron Muell. Arg. (Apocynaceae), a peroba-rosa, é uma espécie arbórea, com indivíduos adultos atingindo 20 a 30 metros de altura (Figura 2.4). Segundo Lorenzi (2002), a espécie é perenifólia e ocorre exclusivamente no interior da floresta primária densa. Floresce durante os meses de outubro a novembro. A maturação dos frutos ocorre nos meses de agosto a setembro. É árvore longeva, podendo ultrapassar 1200 anos de idade (Carvalho 1994). No Brasil ocorre da Bahia até o Paraná, na região centro-oeste e em Rondônia. Foi classificada como secundária tardia (Bernacci e Leitão-Filho 1996), ou seja, espécie que se desenvolve no sub-bosque em condições de sombra densa ou leve, podendo aí permanecer toda vida, ou então crescer até o dossel ou a condição emergente. Sua madeira tem alto valor econômico, o que levou à intensa exploração seletiva da espécie em algumas áreas, sem qualquer preocupação com seu manejo e conservação (Lorenzi 2002).



Figura 2.4. Aspidosperma polyneuron (Fonte: Lorenzi 2002).

*Balfourodendron riedelianum* (Engler) Engler (*Rutaceae*), conhecido vulgarmente por pau-marfim, é uma espécie arbórea com altura variando de 20 a 30m, com tronco retilíneo de 40 a 90cm de diâmetro (Figura 2.5). É uma espécie longeva, pertencente ao grupo sucessional secundária tardia, frequente em capoeirões e em floresta secundária, podendo surgir também em pastagens e, nesse caso, apresenta comportamento de espécie antrópica. Perde as folhas durante a estação seca, pois trata-se de uma espécie decídua. A copa é, geralmente, larga e arredondada, com ramificação racemosa. Porém, podem ser também observados indivíduos com copas irregulares e achatadas (Carvalho 1994). É uma árvore de grande porte, muito apreciada e valorizada no mercado, fornecedora de madeira clara e de boa qualidade(Lorenzi 2002).



Figura 2.5. Balfourodendron riedelianum (Fonte: Lorenzi 2002).

*Chorisia speciosa* St Hil. (*Bombacaceae*) é conhecida popularmente como paineira (Figura 2.6). Ocorre em uma ampla área, abrangendo principalmente as florestas semidecíduas nos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Lorenzi 2002; Carvalho1994). É uma espécie arbórea tropical de grande porte com dimensões aproximadas de 10-15 m de altura e 30-60 cm de DAP (diâmetro a altura do peito), sendo comum, entretanto, encontrar exemplares com porte mais avantajado, ou seja, de 30 m altura e 120 cm de DAP. De folhagem verde-escura e decídua, possui flores vistosas e grandes, de cor rosa brilhante ou carmim, utilizada em arborização de parques e jardins. Além da importânica ecológica e ornamental, a madeira da paineira pode ser empregada para confecção de canoas, cochos, caixotaria, forros de móveis e no fabrico de pasta celulósica (Lorenzi 2002).



Figura 2.6. Chorisia speciosa (Fonte: Lorenzi 2002).

Gallesia integrifolia (Spreng.) Harms (Figura 2.7) pertence à família *Phytolaccaceae* e ocorre naturalmente em vários estados brasileiros, desde o Ceará até o Paraná (Carvalho 1994). É uma espécie arbórea perenefólia, de grande porte, frequente nas florestas pluvial atlântica e estacional semidecidual (Lorenzi 2002). Produz madeira de múltiplo uso, com cheiro característico de alho quando verde, por isso é denominada vulgarmente de pau-d'alho. A madeira perde esse cheiro quando seca e se torna durável, sendo utilizada em substituição ao pinheiro (Carvalho 1994). Os frutos, do tipo sâmara, amadurecem de junho a outubro, quando adquirem a coloração parda; cada sâmara contém uma semente (Carvalho 1994).



Figura 2.7. Gallesia integrifólia (Fonte: Lorenzi 2002).

# 2.2.5. Correção geométrica das imagens

• Coleta de pontos de controle

A determinação dos pontos de apoio para ortorretificação das imagens Quickbird de Gália - SP foi realizada sob a supervisão do Prof. Dr. Jorge Trabanco da Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp. Foi utilizado o método de posicionamento relativo, atendendo as seguintes especificações técnicas:

- Os receptores GPS baseados nas estações PPTE, BASE, ROVER rastrearam simultaneamente todos os satélites visíveis, com ângulo de mascaramento de 15º.
- As alturas das antenas foram medidas com precisão de ± 1 mm.
- Durante o rastreio, foram registrados pelos receptores, seis ou mais satélites.
- Nas operações de campo foram utilizados dois receptores GPS dotados de duas faixas de freqüências L1 e L2.

Os equipamentos utilizados foram das marcas Topcon modelos Topcon Hiper Lite com antenas integradas nos corpos dos aparelhos (Figura 2.8);





Figura 2.8. Posicionamento do receptor GPS Topcon Hiper Lite durante o trabalho de campo (Foto da autora) e localização do mesmo ponto na imagen Quickbird.

Foi utilizada como estação de referência a estação PPTE – Presidente Prudente, integrante da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – RBMC. O tempo de rastreio foi determinado em função do tipo de receptor, da precisão almejada e o espaçamento entre os pontos a serem determinados variando de 2 a 4 horas. Conhecendo as coordenadas da estação base PPTE e efetuada a combinação entre todos os dados rastreados, determinaram-se as coordenadas dos pontos rastreados.

Geração do Modelo Digital de Elevação

O Modelo Digital de Elevação (MDE) foi gerado para auxiliar o processo de ortorretificação das imagens Quickbird. Para a elaboração do MDE, foi utilizado a Rede Irregular de Triangulação (TIN) gerada através das curvas de nível e cotas altimétricas digitalizadas no programa ArcGIS, tendo como base a carta topográfica 1:50.000 Folha Gália (IBGE). O produto gerado foi transformado em

formato raster.

Ortorretificação

O processo de ortorretificação foi realizado no software ERDAS Imagine utilizando-se para isso a ferramenta "Correção Geométrica" – "Quickbird RPC". Essa ferramenta utiliza o Modelo Função Racional (*Rational Function Model* - RFM) e seus Coeficientes Polinomiais Racionais - RPC (OpenGIS Consortium - OGC, 1999). Os RPC são calculados a partir dos dados da câmera do sensor e da órbita do satélite e já vêm disponibilizados junto às imagens Quickbird. Neste processo, além dos arquivos RPC, também foram utilizados os pontos de controle, obtidos no campo, e o MDE descritos anteriormente.

### 2.2.6. Fusão das imagens

As imagens Quickbird, nos modos pancromática (PAN) e multiespectral (MS), foram fundidas com o objetivo de unir a resolução espacial da imagem PAN (0,6 m) à resolução espectral das imagens MS. Para isso, em primeiro lugar, as imagens foram transformadas em imagens RGB de duas formas. Na primeira, as bandas 4, 3 e 2 assumiram as cores vermelha, verde e azul, respectivamente. Na segunda, as bandas 3, 2 e 1 assumiram as cores vermelha, verde e azul, respectivamente (cor natural). Posteriormente, estas imagens RGB, foram fundidas com a imagem PAN através da técnica de Análise de Componentes Principais (PCA) no software ERDAS Imagine.

#### 2.2.7. <u>Segmentação e classificação</u>

Para esta metodologia, as imagens fundidas de Caetetus foram recortadas em um retângulo de 472 x 458 m de forma que a parcela ficasse toda inserida neste retângulo. Este recorte foi realizado no *software ArcGIS* através da ferramenta "clip". O processamento de imagens no *Definiens Professional* se desenvolveu, basicamente, seguindo três etapas: segmentação, construção de uma hierarquia de classes e classificação.

## Segmentação

A segmentação da imagem foi realizada pelo método de Segmentação Multi-Resolução. Para isto foram seguidas as seguintes etapas:

- As imagens utilizadas foram as imagens fundidas nas composições coloridas "banda 4 = vermelho, banda 3 = verde e banda 2 = azul" e "banda 3 = vermelho, banda 2 = verde e banda 1= azul".
- Para cada uma das bandas foi atribuído o peso 1 para a segmentação.
- No primeiro nível de segmentação foi utilizado um parâmetro escalar mais fino, igual a 10, buscando segmentar pequenos objetos presentes nas imagens.
- Na segmentação do segundo nível o parâmetro escalar utilizado foi 20.
- No terceiro nível o parâmetro escalar foi 40, e os objetos consequentemente maiores. Ao final deste processo foram criadas três imagens segmentadas que apresentaram distintos tamanhos de objetos.
- 6. Para todos os níveis de segmentação, foi utilizado um critério que privilegiou a homogeneidade da cor dos objetos (Tabela 2.1).

		Critério de homogeneidade				
Nível de	Parâmetro	Cor Forma				
segmentação	escalar			Suavização	Compactação	
1	10	0,7	0,3	0,5	0,5	
2	20	0,7	0,3	0,5	0,5	
3	40	0,7	0,3	0,5	0,5	

Tabela 2.1. Parâmetros utilizados para a segmentação multi-resolução da imagem Quickbird de Caetetus no programa *Definiens Professional*.

# Hierarquia de classes

Foram cosiderados três diferentes níveis hierárquicos na classificação (Figura 2.9). O primeiro separou as árvores do dossel (classe "*copa*") daquelas

abaixo da sombra das árvores mais altas (classe "*sombreadas*") e que, portanto, não teriam como ser classificadas, sendo este nível considerado como o das superclasses. Herdeiro da superclasse "copa", foi estabelecido um segundo nível hierárquico composto pelas classes "perene" e "decídua". O terceiro nível hierárquico foi composto pelas subclasses "Aspidosperma" e "Gallesia" (herdeiras da classe "perene") e "Balfourodendron" e "Chorisia" (herdeiros da classe "decídua").



Figura 2.9. Hierarquia de classe usada na classificação.

### Classificação

Na classificação digital das imagens Quickbird foi utilizada a metodologia de classificação orientada a objetos, também realizada pelo software *Definiens Professional*, através do classificador por Funções Fuzzy de Pertinência (Fuzzy Membership Functions). Neste classificador é necessário estabelecer descritores para a discriminação das classes temáticas. Para isto, amostras das copas de árvores perenes e decíduas e das quatro espécies foram selecionadas e seus histogramas analisados em relação à resposta espectral nas diferentes bandas, textura e outros atributos com utilidade para diferenciar as classes e subclasses. Estes histogramas serviram de base à definição dos parâmetros para as funções de pertinência usadas na classificação por Funções Fuzzy de Pertinência.

#### 2.2.8. Análise dos Resultados

Para a avaliação da classificação, as classes geradas foram comparadas com a referência terrestre e a avaliação da exatidão da classificação digital foi realizada por meio da matriz de confusão e pelo cálculo dos seguintes índices de acurácia descritos por BRITES et al. (1996):

Exatidão Global

$$G = \frac{\left(\sum_{i=1}^{c} X_{ii}\right)}{N}$$

Kappa

$$K = \frac{\left(P_o - P_c\right)}{1 - P_c}$$

Tau

$$T = \frac{P_o - \frac{1}{M}}{1 - \frac{1}{M}}$$

Onde:

 $\sum_{i=1}^{c} X_{ii}$  = somatório dos pontos corretamente classificados dentro de cada

classe;

Po = proporção de unidades que concordam plenamente;

*Pc* = proporção de unidades que concordam por casualidade; e

M = número de categorias na classificação.

Foram calculados também, os erros de omissão e de inclusão para se conhecer que espécies apresentam melhores resultados quanto sua identificação.

A comparação entre os valores de Kappa dos tratamentos foi feita pelo teste Z, utilizando a seguinte equação proposta por Congalton e Mead (1983):

$$Z = \frac{K_2 - K_1}{\sqrt{\alpha_{k_2}^2 + \alpha_{k_1}^2}}$$

onde:

Z = valor Z calculado

 $K_1$  = coeficiente Kappa do classificador 1;

K<sub>2</sub> = coeficiente Kappa do classificador 2;

 $\alpha_{k_1}^2$  = variância de Kappa do classificador 1;

 $\alpha_{k_2}^2$  = variância de Kappa do classificador 2.

As variâncias foram calculadas baseadas na seguinte aproximação proposta por Ma e Readmond (1995):

$$\alpha^2 \cong \frac{P_o(1-P_o)}{N(1-P_c)^2}$$

Se o valor Z calculado para o teste for maior que o valor Z tabelado, diz-se que o resultado foi significativo, concluindo-se que os dois classificadores são estatisticamente diferentes. O valor 'Z tabelado' ao nível de 5% de probabilidade é igual a 1, 96.

## 2.3. Resultados

#### 2.3.1. Fusão das imagens

O método de Análise de Componentes Principais (PCA), utilizado para a fusão das imagens, se mostrou adequado para realçar as diferenças espectrais dos alvos preservando a resolução espacial da banda pancromática do satélite Quickbird (Figura 2.10 e 2.11). O resultado foi especialmente interessante para a fusão RGB-432 (Figura 2.10), pois nesta composição as copas das árvores

decíduas puderam ser bem diferenciadas das copas perenifólias. Estas copas, por estarem sem folha durante a tomada das imagens, apresentaram uma refletância no infravermelho-próximo bem inferior à das copas com folhas, e esta diferença pode ser observada na Figura 2.10 pela coloração verde-azulada destas copas.



Figura 2.10. Imagem Quickbird fundida pelo método PCA utilizando respectivamente as bandas 4, 3 e 2 no sistema RGB.



Figura 2.11. Imagem Quickbird fundida pelo método PCA utilizando respectivamente as bandas 3, 2 e 1 no sistema RGB.

# 2.3.2. Segmentação e Classificação

A Figura 2.12 representa o mapa temático gerado na classificação do dossel de acordo com o segundo nível hierárquico (árvores perenes ou decíduas). Esta classificação pode ser de grande utilidade para a fenologia (o estudo das modificações periódicas que ocorrem ao longo do tempo de vida das árvores) de formações florestais estacionais como é o caso da Floresta Semidecidua. As duas classes foram facilmente separadas apenas analisando a resposta espectral das

copas em relação às quatro bandas do Quickbird. Por estarem com suas copas sem folhas, as árvores decíduas refletiram menos no infravermelho próximo e no verde e mais no vermelho quando comparadas com as árvores perenifólias (Anexo 3).



Figura 2.12. Mapa do dossel da parcela da Estação Ecológica de Caetetus, gerado pela classificação orientada a objeto, considerando-se apenas as classes "*perenifólia*", "*decídua*" e "*sombreada*" (Datum WGS-84, Fuso 22S).
A análise da matriz de confusão mostra que não ocorreu confusão entre as classes (Tabela 2.2). Os índices de acurácia foram altos (todos maiores que 90%), indicando que a separação entre árvores decíduas e perenifólias foi altamente satisfatória para as imagens Quickbird desta época do ano (estação seca) (Tabela 2.3).

			Referência terres	tre	
Classificação	Perene	Decídua	Sombreadas	Total	Erro de inclusão (%)
Perene	32	0	0	32	0
Decídua	0	21	0	21	0
Sombreadas	0	0	34	34	0
NC	6	1	0	7	
Total	38	22	34	94	
Erro de omissão (%)	15,79	4,54	0		

Tabela 2.2. Matriz de confusão para análise da acurácia obtida na classificação digital da imagem Quickbird da Estação Ecológica de Caetetus pela técnica de Classificação Orientada a Objetos.

Tabela 2.3. Valores obtidos para a acurácia da classificação, segundo os índices Kappa, Tau e Exatidão Global.

Kappa (%)	92,55
Tau (%)	90,07
Exatidão Global (%)	92,55

Para a classificação baseada nos terceiro nível hierárquico (separação entre as espécies), inicialmente, foi testada uma classificação considerando-se as quatro espécies identificadas em campo. Por serem decíduas e estarem no período de perda de folhas (a imagem é de junho), as espécies *Balfodendron riedelianum* e *Chorisia speciosa* não puderam ser separadas espectralmente, já que a resposta espectral de uma árvore deve-se, em maior parte, à resposta espectral de suas folhas. Estas espécies foram então agrupadas em uma só classe a qual denominamos "*decíduas*". O dossel foi então classificado em três classes: árvores decíduas, *Aspidosperma polyneuron* e *Gallesia integrifolia*.

Amostras de cada uma das classes foram tomadas da imagem segmentada para a obtenção das funções de pertinência as quais foram utilizadas para a separação das classes. Estas funções de pertinência estão apresentadas no Anexo 3. Após estabelecidas as funções de pertinência, foi realizada a classificação das imagens com base nos três parâmetros escalares utilizados para a segmentação. Os mapas gerados a partir da classificação estão ilustrados nas Figuras 2.13, 2.14 e 2.15.



Figura 2.13. Mapa do dossel da parcela da Estação Ecológica de Caetetus, gerado pela classificação orientada a objeto com parâmetro escalar 10 (Datum WGS-84, Fuso 22S).



Figura 2.14. Mapa do dossel da parcela da Estação Ecológica de Caetetus, gerado pela classificação orientada a objeto com parâmetro escalar 20 (Datum WGS-84, Fuso 22S).



Figura 2.15. Mapa do dossel da parcela da Estação Ecológica de Caetetus, gerado pela classificação orientada a objeto com parâmetro escalar 40 (Datum WGS-84, Fuso 22S).

Analisando-se os resultados das Tabelas 2.4 e 2.5, pode-se concluir que as espécies *A. polyneuron* e *G. integrifolia* não foram bem separadas na classificação, com erros de omissão variando entre 21 e 82%, e erros de inclusão

variando entre 26 e 60 %. Os altos valores obtidos pelos índices Tau e Exatidão Global se devem ao alto grau de acerto das classes "*decidua*" e "*sombreadas*" (mais de 90%). O parâmetro escalar utilizado não interferiu no resultado do índice Kappa de acordo com o teste Z ao nível de significância de 5%.

	Referência terrestre					
Classificação	A. polyneuron	G. integrifolia	Decídua	Sombreadas	Total	Erro de inclusão (%)
		Parâme	tro escalar 10			
A. polyneuron	18	7	0	0	25	28
G. integrifolia	3	2	0	0	5	60
Decídua	1	1	22	0	24	8,33
Sombreadas	0	0	0	34	34	0
NC	6	1	0	0	7	
Total	28	11	22	34	95	
Erro de omissão (%)	35,71	81,82	0	0		
		Parâme	tro escalar 20			
A. polyneuron	19	7	0	0	26	26,92
G. integrifolia	3	2	0	0	5	60
Decídua	0	0	21	0	21	0
Sombreadas	0	0	0	34	34	0
NC	6	2	1	0	9	
Total	28	11	22	34	95	
Erro de omissão (%)	32,14	81.82	4,55	0		
		Parâme	tro escalar 40			
A. polyneuron	22	8	0	0	30	26,67
G. integrifolia	2	2	0	0	4	50
Decídua	0	0	20	0	20	0
Sombreadas	0	0	0	34	34	0
NC	4	1	2	0	7	
Total	28	11	22	34	95	
Erro de omissão (%)	21,43	81,82	9,09	0		

Tabela 2.4. Matriz de confusão para análise da acurácia obtida na classificação digital da imagem Quickbird da Estação Ecológica de Caetetus pela técnica de Classificação Orientada a Objetos.

		Parâmetro escalar	
Índices	10	20	40
Kappa (%)	51.11a	71.23a	66.47a
Tau (%)	75	75	77.63
Exatidão Global (%)	80	80	82.11

Tabela 2.5. Valores obtidos para a acurácia da classificação, segundo os índices Kappa, Tau e Exatidão Global.

As letras ao lado dos valores de Kappa indicam se os tratamentos são significativamente diferentes (letras diferentes) ou não (letras iguais) entre si ao nível de significância de 5% segundo o teste Z.

Considerou-se, portanto, que para esta escala de trabalho as duas espécies não podem ser separadas, já que a resolução espacial e espectral do satélite Quickbird não foi suficiente para detectar as diferenças entre elas.

#### 2.4. Discussão

Os resultados aqui apresentados indicam a impossibilidade de separação das espécies *Aspidosperma polyneuron* e *Gallesia integrifolia* bem como das espécies *Balfodendrun riedelianum* e *Chorizia speciosa*, da Floresta Estacional Semidecidual, através do método de Classificação Orientada a Objeto de imagens Quickbird. Estas últimas por serem espécies decíduas e estarem sem folhas na época da tomada da imagem. Porém, para que esta impossibilidade seja confirmada, é necessária a realização de um estudo utilizando imagens da estação chuvosa desta área. O uso destas imagens estava previsto no projeto original, mas infelizmente, não foi possível obter qualquer imagem da estação chuvosa durante o período de execução do trabalho. Em contrapartida, as imagens multiespectrais Quickbird, fundidas às imagens pancromáticas, se mostraram documentos adequados ao estudo da deciduidade de árvores em Floresta Estacional Semidecidual.

A deciduidade é uma característica funcional chave de muitas árvores tropicais, e geralmente um dos principais aspectos utilizados para a classificação da vegetação. Mudanças na área foliar do dossel exercem um forte controle sobre as taxas de troca de carbono atmosférico, e podem ser um indicador sensível de

61

mudança climática (Chambers *et al.* 2007). Asner e colaboradores (2000), por exemplo, encontraram grandes evidências de que a deciduidade das árvores da Amazônia foi afetada pelos períodos de baixa pluviosidade durante o evento *El Niño* entre os anos 1982 e 1993. A queda das folhas das árvores também tem impactos no comportamento de forrageamento, na interação entre espécies e na estrutura da comunidade (Chambers *et al.* 2007). Embora a fenologia detalhada de algumas espécies de árvores seja relativamente comum, medidas da quantidade de perda de folhas do dossel durante a estação de queda das folhas são raras.

Investigações recentes apontam o sensoriamento remoto como um instrumento adequado para o estudo das fenofases das formações vegetais e sua relação com mudanças ambientais. Usando imagens do sensor MODIS, Huete e colaboradores (2006) constataram que a floresta amazônica apresenta um aumento na capacidade fotossintética durante a estação seca, resultado oposto à maioria dos modelos de predição do ecossistema que dizem que as estações secas causam um declínio na fotossíntese do dossel florestal. Segundo os autores, este aumento na fotossíntese está relacionado ao brotamento de novas folhas após a queda das velhas e à maior irradiação solar que ocorre nesta região nos verões secos. Para eles, na floresta amazônica, a irradiação solar exerce mais influência que a chuva na fenologia e produtividade das árvores. Estudos com satélites de alta resolução demonstraram que efeitos de seca na escala do dossel podem ser observados como mudanças de pigmento nas folhas do topo do dossel, ao invés de mudanças no volume total de folhas (índice de área foliar) (Asner *et al.* 2004).

O estudo das fenofases das árvores da floresta tropical é, portanto, de grande importância para o entendimento de diversos processos ecológicos e climáticos deste tipo de formação. Este trabalho demonstrou que as imagens Quickbird têm grande potencial para serem utilizadas neste tipo de estudo. Entrentanto, em uma busca na *web-of-science* não encontrou-se nenhum estudo sobre fenologia utilizando dados do satélite Quickbird.

62

Por outro lado, este capítulo mostrou que as resoluções espacial e temporal das imagens Quickbird não foram suficientes para a identificação das espécies estudadas na EEC. Porém, este estudo foi restrito a um número pequeno de espécies e a um tipo de formação florestal. No próximo capítulo é testada a identificação de duas espécies de árvores do Cerradão utilizando também imagens Quickbird.

## **CAPÍTULO 3**

# Identificação de duas espécies arbóreas (*Mabea fistulifera* e *Sclerolobium paniculatum*) em imagens Quickbird através do método de Classificação Orientada a Objetos

## 3.1. INTRODUÇÃO

A identificação remota de espécies arbóreas tem múltiplas aplicações tanto para o estudo de ecologia das espécies de dossel como para o manejo e conservação das florestas tropicais. Estudos recentes com imagens de satélite de alta resolução indicam que a classificação das copas baseada apenas em respostas espectrais não é suficiente para se identificar as árvores da complexa floresta tropical, pelo menos não quando consideradas apenas as poucas bandas das imagens pancromáticas ou multiespectrais (Clark et al., 2005; Pinheiro et al., 2004; Venticinque et al., 2004; Read et al., 2003). Outras informações devem ser extraídas dessas imagens para compensar a baixa resolução espectral e aproveitar a sua alta resolução espacial.

Read e colaboradores (2003) acreditam que a combinação entre dados de campo e características espectrais e espaciais dos dados de satélite, pode fornecer informações de grande aplicação em pesquisa e manejo florestal, principalmente no mapeamento de espécies e no estudo da diversidade. O método de classificação orientada a objetos, disponível no programa *Definiens Professional*, surge como uma alternativa para a classificação dessas imagens. Isto ocorre porque este método considera, além do nível de cinza, a forma, a textura e as funções de um sistema de informação geográfica, contribuindo para o estreitamento do uso do geoprocessamento com imagens de sensoriamento remoto (Hoffmann e Vegt, 2001; Hájek; 2005).

O objetivo geral deste trabalho foi testar os métodos de *Segmentação Multi-Resolução* e *Classificação Orientada a Objetos* para a identificação de duas espécies de árvores (*Sclerolobium paniculatum* e *Mabea fistulifera*) de uma área

65

de Cerradão, em imagens de satélite de alta resolução espacial, associadas a dados espaciais das espécies. Para isso pretendeu-se responder às seguintes perguntas:

- 1. Qual parâmetro escalar utilizado na segmentação multi-resolução melhor delimita as copas das árvores ou os agrupamentos de copas das espécies de interesse nas imagens Quickbird?
- 2. As resoluções espacial e espectral das imagens Quickbird são suficientes para a identificação das duas espécies?
- 3. O método de classificação orientada a objetos é adequado para a identificação das espécies?
- 4. O uso de informação espacial das espécies (neste caso o modelo de distribuição potencial) melhora o resultado da classificação?

# **3.2. MATERIAL E MÉTODOS**

# 3.2.1. Área de estudo

A Estação Ecológica de Assis (EEA), com área de 1.312,28 ha, localiza-se no município de Assis, estado de São Paulo, entre as coordenadas 22º33'65" a 22º36'68"S e 50º23'00" a 50º22'29"W e entre as altitudes 520 e 590 m (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Localização da Estação Ecológica de Assis no estado de São Paulo (Datum WGS-84, Fuso 22S) e imagem Quickbird da EEA.

O relevo é suave-ondulado e o clima, segundo a classificação de Köppen, é mesotérmico, com chuvas concentradas no verão e precipitação média anual em torno de 1400 mm (Cwa) (Figura 3.2)



Figura 3.2: Gráfico ombrotérmico do município de Assis referente ao período de julho de 2002 a agosto de 2008 (Fonte: IAC)

A vegetação da EEA se enquadra no conceito de cerrado "lato sensu", sendo a forma cerradão a fisionomia predominante, correspondendo, em 2006, a aproximadamente 91% da estação (Pinheiro 2008, Figura 3.3). Apresenta árvores de até 15 m de altura, formando dossel contínuo. Em torno dos córregos ocorrem dois tipos de formação: vegetação arbórea densa, com algumas espécies higrófilas preferenciais (Floresta Ciliar) e, em terrenos permanentemente úmidos (brejos), vegetação herbácea e arbustiva exclusivamente higrófila. Sendo assim, a Unidade se caracteriza por um mosaico vegetacional, provavelmente relacionado a variáveis ambientais (topografia, tipo e fertilidade do solo, capacidade de armazenamento, disponibilidade de água no solo, etc.), microclimáticas e também, relacionadas ao histórico de perturbações antrópicas, principalmente a ocorrência



Figura 3.3. Mapa de uso e ocupação do solo da Estação Ecológica de Assis em 2006 (Fonte: Durigan *et al.* 2008)

### 3.2.2. Espécies estudadas

A espécie Sclerolobium paniculatum Vog. (Figura 3.4) pertence à família Leguminosae, sendo também conhecida como carvoeiro. É uma árvore perenifólia, comumente com 8 a 20 m de altura e 0,30 a 0,70 m de diâmetro a altura do peito (DAP); seu tronco é geralmente reto e cilíndrico, com folhas alternas e imparipinadas, compostas de quatro a sete pares de folíolos. Segundo Lorenzi (2002), é uma espécie pioneira, colonizadora de terrenos marginais e margens de estradas. Inicia frequentemente a sucessão secundária em áreas abertas, pela germinação de suas sementes dormentes no banco do solo, sendo uma espécie tolerante à deficiência hídrica (Lorenzi 2002). É comum no cerradão e na transição para a floresta estacional semidecidual no Planalto Central (Durigan et al., 2004). Na Amazônia, ocorre na vegetação secundária da floresta ombrófila densa. É uma espécie rara no estado de São Paulo. Floresce de dezembro a abril e seus frutos amadurecem de abril a maio (Durigan et al. 2004). Sua madeira é usada na construção e na produção de carvão vegetal. É uma espécie indicada para uso na recuperação de áreas degradadas. Na Estação Ecológica de Assis é uma árvore emergente, que ocorre de forma agrupada e apresenta copas grandes.



Figura 3.4. Sclerolobium paniculatum (Fonte: Lorenzi 2002)

Mabea fistulifera Mart. (Euphorbiaceae, figura 3.5) ocorre no Cerradão e em áreas de transição para a Floresta Estacional Semidecidual, sendo particularmente abundante nas zonas de transição entre os dois tipos de vegetação (Durigan *et al.*, 2004), nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo (Lorenzi 2000). Normalmente é encontrada agrupada em bordas de mata e em locais com impacto antrópico acentuado, sendo também recomendada para plantios destinados à recuperação de áreas degradadas. Sua presença é muito comum na região noroeste do estado de São Paulo. A floração desta planta ocorre de fevereiro a junho, atingindo o pico entre abril e maio (Lorenzi 2000), que corresponde ao início da estação seca na região. Por ocorrer durante o período de escassez de alimento, muitos animais utilizam seu pólen e néctar, produzidos em abundância, como fonte alternativa de alimento (Daud e Feres 2004). Na Estação Ecológica de Assis, ocorre de forma agrupada formando manchas compactas.



Figura 3.5. Mabea fistulifera (Fonte: Lorenzi 2000)

As duas espécies ocupam nichos semelhantes. Ambas são espécies que toleram a sombra (embora prefiram a luz) e ocorrem também em florestas

estacionais. São protagonistas de um processo que está ocorrendo na estação (e em diversas outras áreas), com a entrada paulatina de espécies florestais e, provavelmente, transformação do cerradão em floresta estacional (Durigan & Ratter 2006).

*M. fistulifera* é autocórica e, por isto, deve demorar mais a se disseminar e forma manchas mais compactas, ao redor de uma provável matriz única inicial. *S. paniculatum* é anemocórica e emergente, e como tal pode se disseminar por distâncias mais longas, de modo que as árvores são próximas, mas não formam manchas compactas como *M. fistulifera*.

## 3.2.3. Material utilizado

- a) Imagens QUICKBIRD com quatro bandas Multiespectrais (resolução espacial de 2,4 m) e uma banda Pancromática (resolução de 0,6 m), com os arquivos RPCs (coeficientes polinomiais que permitem que a imagem seja ortorretificada), resolução radiométrica de 16 bits, da Estação Ecológica de Assis (4 de julho de 2006)
- b) Base cartográfica 1:10.000 da Estação Ecológica de Assis cedida pelo Instituto Florestal de São Paulo.

## <u>Softwares</u>

- c) ERDAS 8.5 para processamento de imagens
- d) ENVI 4.3 para processamento de imagens
- e) Definiens Professional 5.0 (antigo eCognition) para classificação orientada a objetos
- f) Idrisi 32 para análise espacial e processamento de imagens
- g) Arcgis 9 ArcMap version 9.2 para análise espacial e processamento de imagens
- h) GeoTrans v1.0 (http://br.geocities.com/mausejas /) Transformação direta e inversa entre coordenadas Geodésicas e Coordenadas na Projeção UTM, desenvolvido por Sejas (2006).
- i) UTM v1.0 (http://br.geocities.com/mausejas/) Transformação entre sistemas geodésicos de referência, versão 1.0 Freeware. Desenvolvido por Sejas (2002)

- j) Ambiente computacional OpenModeller para modelagem de distribuição potencial de espécies (http://openmodeller.sourceforge.net/) (Sutton et al. 2007). Este ambiente é independente de plataforma, gratuito, uso livre e de código aberto.
- k) Software Maxent (http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/). (Phillips et al. 2006). Plataforma windows, gratuito, uso livre, código fechado.

# 3.2.4. Métodos

Este estudo foi realizado seguindo os procedimentos ilustrados na Figura 3.6 e descritos a seguir.



Figura 3.6: Fluxograma dos procedimentos realizados para a classificação das imagens

#### 3.2.4.1. Ortorretificação

Um modelo digital de elevação (MDE) da EEA foi gerado para auxiliar o processo de ortorretificação das imagens QUICKBIRD. Para confeccionar o MDE, foi utilizado o algoritmo TIN (Rede Irregular de Triangulação) gerada através das curvas de nível e cotas altimétricas, tendo como base uma carta topográfica 1:10.000 já digitalizada e cedida pelo Instituto Florestal de São Paulo.

O processo de ortorretificação foi realizado no software ERDAS Imagine utilizando-se para isso a ferramenta "Correção Geométrica" – "Quickbird RPC". Essa ferramenta utiliza o Modelo Função Racional (*Rational Function Model* -RFM) e seus Coeficientes Polinomiais Racionais - RPC (OpenGIS Consortium -OGC, 1999). Os RPC são calculados a partir dos dados da câmera do sensor e da órbita do satélite e já vêm disponibilizados junto às imagens QUICKBIRD.

Neste processo, além dos arquivos RPC, também foram utilizados: (1) pontos de controle, obtidos na mesma carta topográfica de onde foram extraídas as curvas de nível, através da digitalização de pontos existentes na carta que puderam ser foto-identificados nas imagens (cruzamentos de estradas, de rios, etc.), (2) o MDE descrito anteriormente.

#### 3.2.4.2. Obtenção dos pontos de ocorrência das espécies

As árvores foram identificadas no campo pela Dra. Giselda Durigan, pesquisadora da Estação Ecológica de Assis, Instituto Florestal de São Paulo. Nas imagens Quickbird, as duas espécies se destacam no dossel por apresentarem copa emergente e com formato e coloração característicos (*S. paniculatum*) ou por formarem manchas compactas também com coloração característica (*M. fistulifera*). Por ocorrerem em áreas de fácil acesso, próximo a estradas ou caminhos, e na maior parte das vezes de forma agrupada, foi possível identificar as espécies na imagem e confirmar no campo. A Figura 3.7 mostra os agrupamentos destas espécies e as características texturais, morfológicas e espectrais que auxiliaram na interpretação da imagem.

74



Figura 3.7: Detalhe dos agrupamentos de *Sclerolobium paniculatum* (A, B e C) e *Mabea fistulifera* (D, E e F) nas imagens PAN (A e D), composição colorida com as bandas 4, 3 e 2 (B e E), e composição colorida com as bandas 3, 2 e 1 (C e F).

## 3.2.4.3. Segmentação e classificação

O processamento de imagens no *Definiens Professional* se desenvolveu, basicamente, seguindo três etapas:

- (1) segmentação;
- (2) construção de uma hierarquia de classes;
- (3) classificação.

A segmentação da imagem foi realizada pelo método de Segmentação Multi-Resolução. As seguintes camadas foram importadas para o programa *Definiens* para a realização do procedimento de segmentação e classificação:

(1) imagem Quickbird no modo pancromático (PAN);

(2) quatro bandas multiespectrais das imagens Quickbird (MS);

(3) mapa da distribuição potencial de *M. fistulifera* (modelo, Figura 3.8A);

(4) mapa da distribuição potencial de *S. paniculatum* (modelo, Figura 3.8B).
A metodologia para a elaboração dos mapas de distribuição potencial dessas espécies está descrita no capítulo 4 desta tese.

Todas segmentações foram realizadas as apenas na imagem pancromática, atribuindo-se peso zero para as outras camadas. Desta forma, os objetos criados foram baseados apenas nesta imagem e as outras camadas foram usadas apenas como informação adicional na classificação. Os parâmetros utilizados na segmentação foram: no primeiro nível de segmentação um parâmetro escalar 20; na segmentação do segundo nível, parâmetro escalar 40; e no terceiro nível o parâmetro escalar 80. Ao final deste processo foram criadas três imagens segmentadas que apresentam distintos tamanhos de objetos. Para todos os níveis de segmentação foi utilizado um critério que privilegiou a homogeneidade da cor dos objetos (0,7) em relação à forma (0,3).

Após a segmentação, foram testadas várias hierarquias de classe. A que apresentou o melhor resultado, por isso utilizada em todos os testes, foi aquela que estabeleceu as super-classes "*vegetação*" e "*não-vegetação*" e as sub-classes "*Mabea fistulifera*", "*Sclerolobium paniculatum*" e "*outras espécies*", como herdeiras da classe "*vegetação*" (Figura 3.9).



Figura 3.8. Mapa de distribuição potencial de *Mabea fistulifera* (A) e *Sclerolobium paniculatum* (B) na Estação Ecológica de Assis.



Figura 3.9. Hierarquia de classe usada na classificação.

Na classificação digital das imagens Quickbird aplicou-se a metodologia de classificação orientada a objetos, realizada no software *Definiens Professional* através do classificador por Funções Fuzzy de Pertinência. Neste classificador é necessário estabelecer descritores para a discriminação das classes temáticas. Sobre a imagem segmentada no nível 1 (parâmetro escalar 80) foram amostrados

alguns objetos que representam as classes "vegetação" e "não-vegetação". Os histogramas gerados por estas amostras foram analisados e serviram de base para a definição dos parâmetros para as funções de pertinência usadas na separação destas classes.

Sobre a imagem segmentada no nível 3 (parâmetro escalar 20) foram amostrados alguns objetos que representam cada uma das três classes do segundo nível hierárquico ("*Mabea fistulifera*", "*Sclerolobium paniculatum*" e "*outras espécies*"). Algumas copas identificadas visualmente nas imagens Quickbird foram utilizadas para a extração de amostras de treinamento e seus histogramas analisados em relação à resposta espectral nas diferentes bandas, e outros atributos que pudessem diferenciar as classes. Baseado nos histogramas, foram definidas as funções de pertinência para as três classes.

Foram testados cinco tratamentos nos quais se utilizou informações de diferentes camadas para o estabelecimento das funções de pertinência e testados diferentes parâmetros escalares, como segue:

- Tratamento 1: só a média do valor dos pixels dos objetos nas quatro bandas multiespectrais foram usadas para separar as três classes do segundo nível hierárquico, e o parâmetro escalar utilizado foi o 20.
- **Tratamento 2** as camadas utilizadas foram as mesmas do tratamento 1 (bandas MS), e o parâmetro escalar utilizado foi o 40.
- **Tratamento 3:** as camadas utilizadas foram as mesmas do tratamento 1 (bandas MS), e o parâmetro escalar utilizado foi o 80.
- Tratamento 4: além das bandas multiespectrais, os mapas de distribuição potencial das espécies (Figuras 3.8a e 3.8b) serviram para excluir, na classificação destas espécies, os objetos que caem nas áreas em que potencialmente as espécies não ocorrem, e o parâmetro escalar utilizado foi o 20.
- Tratamento 5: as camadas utilizadas foram as mesmas do tratamento 4 (bandas MS e modelos), mas o parâmetro escalar utilizado foi 40.

78

#### 3.2.4.4. Análise dos Resultados

Para a avaliação do resultado da classificação foram digitalizados no ArcGis pontos centralizados nas copas de *S. paniculatum* e distribuídos nas manchas de *M. fistulifera* (as copas desta espécie não são individualmente bem distinguíveis na imagem, como as de *S. paniculatum*, mas apenas o agrupamento compacto das suas árvores), após a checagem no campo destas espécies. Como dados de campo para a classe 'outras copas' foram usados:

(1) dados já existentes do projeto Parcelas Permanentes (metodologia utilizada encontra-se no anexo 1), com área amostral de 10,24 ha onde não foi encontrado qualquer indivíduo de *S. paniculatum* e apenas um, ainda jovem, de *M. fistulifera* 

(2) dados provenientes de 31 parcelas de 20 x 50 m oriundas do trabalho do Dr. Eduardo Pinheiro da Universidade Federal do Amazonas (Pinheiro 2008; metodologia utilizada encontra-se no Anexo 2), onde não foi encontrado nenhum indivíduo de nenhuma das duas espécies.

Esses pontos, representados na figura 3.10, foram utilizados na elaboração da matriz de confusão.





Para a avaliação da classificação orientada a objeto, as classes geradas foram comparadas com a referência terrestre e a avaliação da exatidão da classificação digital realizada por meio da matriz de confusão e pelo cálculo dos seguintes índices de acurácia descritos por BRITES et al. (1996):

Exatidão Global

$$G = \frac{\left(\sum_{i=1}^{c} X_{ii}\right)}{N}$$

Kappa

$$K = \frac{\left(P_o - P_c\right)}{1 - P_c}$$

$$T = \frac{P_o - \frac{1}{M}}{1 - \frac{1}{M}}$$

onde:

 $\sum_{i=1}^{c} X_{ii}$  = somatório dos pontos corretamente classificados dentro de cada

classe;

N = número total de pontos contemplados na matriz;

*P*<sub>o</sub> = proporção de unidades que concordam plenamente;

 $P_c$  = proporção de unidades que concordam por casualidade; e

M = número de categorias na classificação.

Para se conhecer que espécies apresentam melhores resultados quanto sua identificação foram calculados também, os erros de omissão e de inclusão. A comparação entre os valores de Kappa dos tratamentos foi feita pelo teste Z, utilizando a seguinte equação proposta por Congalton e Mead (1983):

$$Z = \frac{K_2 - K_1}{\sqrt{\alpha_{k_2}^2 + \alpha_{k_1}^2}}$$

onde:

Z = valor Z calculado

 $K_1$  = coeficiente Kappa do classificador 1;

 $K_2$  = coeficiente Kappa do classificador 2;

 $\alpha_{k_1}^2$  = variância de Kappa do classificador 1;

 $\alpha_{k_2}^2$  = variância de Kappa do classificador 2.

As variâncias foram calculadas baseadas na seguinte aproximação proposta por Ma e Readmond (1995):

$$\alpha^2 \cong \frac{P_o(1-P_o)}{N(1-P_c)^2}$$

Se o valor Z calculado para o teste for maior que o valor Z tabelado, diz-se que o resultado foi significativo, concluindo-se que os dois classificadores são estatisticamente diferentes. O valor 'Z tabelado' ao nível de 5% de probabilidade é igual a 1, 96.

#### **3.3. RESULTADOS**

Para a separação entre as classes "Sclerolobium paniculatum", "Mabea fistulifera" e "outras copas" utilizando apenas as médias das bandas multiespectrais foram aplicadas as funções de pertinência apresentadas no Anexo 4. As copas dos indivíduos de *M. fistulifera* apresentaram altos valores de nível de cinza na faixa do infravermelho próximo, o que permitiu uma fácil separação entre esta espécie e a classe "outras copas". Porém, para a separação entre esta espécie e *S. paniculatum* as bandas mais adequadas foram aquelas pertencentes à faixa do visível (azul, verde e vermelho) e estas mesmas bandas foram as que melhor separaram *S. paniculatum* das "outras copas". Isto porque esta espécie apresenta valores de cinza na faixa do visível mais altos, em média, do que as outras espécies (Anexo 4).

Os mapas de distribuição espacial das espécies S. paniculatum e *M.fistulifera* no dossel da Estação Ecológica de Assis, gerados pela classificação da imagem, são apresentados nas figuras 3.11 a 3.15. As figuras 3.11, 3.12 e 3.13, ilustram a diferença entre os objetos gerados segundo os diferentes parâmetros escalares utilizados (20, 40 e 80, respectivamente) e como estes parâmetros podem influenciar o resultado da classificação. A matriz de confusão e o cálculo dos coeficientes de acurácia ilustram bem essa diferença na classificação (Tabelas 3.1 a 3.4). Avaliando-se, por exemplo, o resultado do coeficiente Kappa, tem-se que o tratamento 3 (parâmetro escalar 80) apresentou uma classificação considerada de concordância moderada com a verdade de campo (segundo a interpretação de Landis e Koch 1977 para os valores de Kappa), enquanto os outros dois tratamentos (parâmetros escalares 20 e 40) apresentaram valores de Kappa considerados de substancial concordância segundo estes autores (ver tabela 3.5). Esta diferença foi comprovada pelo teste Z mostrando que o tratamento 3 foi significativamente diferente dos tratamentos 1 e 2 que não diferiram entre si (tabela 3.4). Por este motivo considerou-se que o parâmetro escalar 80 não é o ideal para a segmentação das copas e este parâmetro não foi utilizado nos tratamentos posteriores.



Figura 3.11. Mapa de distribuição espacial das espécies *Sclerolobium paniculatum* e *Mabea fistulifera* gerados pela classificação da imagem da Estação Ecológica de Assis utilizando-se o Tratamento 1 (Imagens MS e parâmetros escalar 20)



Figura 3.12. Mapa de distribuição espacial das espécies *Sclerolobium paniculatum* e *Mabea fistulifera* gerados pela classificação da imagem da Estação Ecológica de Assis utilizando-se o Tratamento 2 (Imagens MS e parâmetros escalar 40)



Figura 3.13. Mapa de distribuição espacial das espécies *Sclerolobium paniculatum* e *Mabea fistulifera* gerados pela classificação da imagem da Estação Ecológica de Assis utilizando-se o Tratamento 3 (Imagens MS e parâmetros escalar 80)

Tabela 3.1.	Matriz de o	confusão p	ara avaliaç	ão da qu	alidade d	a classificaç	ão da image	em Quickbird
da Estação	Ecológica	de Assis p	ela técnica	de Clas	sificação	Orientada a	a Objetos uti	ilizando-se o
tratamento	1(Imagens	MS e parâr	netros esca	alar 20)	-		-	

	Referência terrestre						
Classificação	Mabea fistulifera	Sclerolobium paniculatum	outras espécies	total	erro de inclusão (%)		
Mabea fistulifera	124	15	14	153	18,95		
Sclerolobium paniculatum	10	253	175	438	42,24		
Outras espécies	20	12	306	338	9,47		
Total	154	280	495	929			
erro de omissão (%)	19,48	9,64	38,18				

Tabela 3.2. Matriz de confusão para avaliação da qualidade da classificação da imagem Quickbird da Estação Ecológica de Assis pela técnica de Classificação Orientada a Objetos utilizando-se o tratamento 2 (Imagens MS e parâmetros escalar 40)

		Referência terrestre						
Classificação	Mabea fistulifera	Sclerolobium paniculatum	outras espécies	total	erro de inclusão (%)			
Mabea fistulifera	135	14	12	161	16,15			
Sclerolobium paniculatum	4	241	161	406	40,64			
Outras espécies	15	25	322	362	11,05			
Total	154	280	495	929				
erro de omissão (%)	18,83	13,93	34,95					

Tabela 3.3. Matriz de confusão para avaliação da qualidade da classificação da imagem Quickbird da Estação Ecológica de Assis pela técnica de Classificação Orientada a Objetos utilizando-se o tratamento 3 (Imagens MS e parâmetros escalar 80)

· · · · ·		Referência terrestre							
Classificação	Mabea fistulifera	Sclerolobium paniculatum	outras espécies	total	erro de inclusão (%)				
Mabea fistulifera	117	10	2	129	9,3				
Sclerolobium paniculatum	1	140	167	308	54,55				
Outras espécies	36	130	326	492	33,74				
Total	154	280	495	929					
erro de omissão (%)	24,03	50	34,14						

Tabela 3.4. Valores obtidos para a acurácia da classificação, segundo os índices Kappa, Tau e Exatidão Global para os tratamentos 1 (Imagens MS e parâmetros escalar 20), 2 (Imagens MS e parâmetros escalar 40) e 3 (Imagens MS e parâmetros escalar 80).

	Tratamento					
Índice	1	2	3			
Kappa (%)	71.29a	72.76a	47.17b			
Tau (%)	60.28	62.70	44.13			
Exatidão global (%)	73.52	75.13	62.76			

As letras ao lado dos valores de Kappa indicam se os tratamentos são significativamente diferentes (letras diferentes) ou não (letras iguais) entre si ao nível de significância de 5% segundo o teste Z.

Apesar dos valores de Kappa indicarem que as classificações realizadas com os tratamentos 1 e 2 apresentaram concordância substancial com a referência de campo (segundo Landis e Koch 1977, Tabela 3.5), analisando visualmente os mapas gerados por estes tratamentos, pode-se observar que a área de ocorrência de *Sclerolobium paniculatum* e *Mabea fistulifera*, foi superestimada nestes casos em que só se considerou a resposta espectral das copas. Algumas áreas de agricultura, silvicultura ou próximas a rios, onde sabidamente as espécies não ocorrem, foram classificadas como sendo alguma das duas espécies. Este erro foi muito mais evidente para *Sclerolobium paniculatum* que para *Mabea fistulifera*, como pode-se observar nos valores do erro de inclusão desta espécie (de 40,64 a 54,55%, Tabelas 3.1 a 3.3). O uso dos mapas de distribuição potencial das duas espécies diminuiu significativamente este problema, como pode-se observar nas figuras 3.14 e 3.15.

Valores de Kappa (%)	Interpretação
<0	Nenhuma concordância
0 a 19	Concordância pobre
20 a 39	Concordância pequena
40 a 59	Concordância moderada
60 a 79	Concordância substancial
80 a 100	Concordância quase perfeita

Tabela 3.5. Interpretação dos valores de Kappa segundo Landis e Koch (1977)



Figura 3.14. Mapa de distribuição espacial das espécies *Sclerolobium paniculatum* e *Mabea fistulifera* gerados pela classificação da imagem da Estação Ecológica de Assis utilizando-se o Tratamento 4 (Imagens MS mais modelos e parâmetros escalar 20)



Figura 3.15. Mapa de distribuição espacial das espécies *Sclerolobium paniculatum* e *Mabea fistulifera* gerados pela classificação da imagem da Estação Ecológica de Assis utilizando-se o Tratamento 5 (Imagens MS mais modelos e parâmetros escalar 40)

Ao restringir-se a classificação às áreas onde potencialmente as espécies ocorrem segundo os modelos de distribuição potencial das espécies utilizados (para maior detalhe sobre os modelos ver capítulo 4), o ganho no resultado da classificação foi substancial. O erro de inclusão de Sclerolobium paniculatum que estava entre 40,64 e 42,24% (Tabelas 3.1 e 3.2) nos tratamentos sem o modelo, não passou de 13,18% nos tratamentos com o uso dos modelos (Tabelas 3.6 e 3.7). Os valores dos índices de acurácia foram extremamente altos com o uso do modelo (todos maiores que 80%, Tabela 3.8). O índice Kappa indicou que a classificação teve uma concordância guase perfeita com a referência de campo, segundo a interpretação de Landis e Koch (1977), e foi significativamente maior que os tratamentos em que os modelos não foram utilizados (tratamentos 1 e 2, Tabela 3.8). Porém, analisando visualmente os mapas gerados (Figuras 3.14 e 3.15) ainda nota-se que algumas áreas de plantio de *Pinus* e *Eucalyptus* e outras de invasão pela pteridófita do gênero *Pteridium* (Figura 3.3) foram classificadas erroneamente como sendo Sclerolobium paniculatum. Nas Figura 3.16 e 3.17 pode-se observar que, nas áreas próximas às amostras de treinamento (onde sabe-se que as espécies ocorrem) o acerto foi grande tanto no tratamento que não utilizou os modelos como naquele que utilizou.

	-	Referência terrestre							
Classificação	Mabea fistulifera	Sclerolobium paniculatum	outras espécies	total	erro de inclusão (%)				
Mabea fistulifera	124	14	3	141	12,06				
Sclerolobium paniculatum	9	251	36	296	13,18				
Outras espécies	21	15	456	492	7,32				
Total	154	280	495	929					
erro de omissão (%)	19,48	10,36	7,88						

Tabela 3.6.	Matriz de c	onfusão p	oara avaliaçã	ão da qu	ualidade	da classifica	ação da im	agem C	)uickbird
da Estação	Ecológica	de Assis	pela técnica	de Cla	ssificação	o Orientada	a Objetos	utilizar	ido-se o
tratamento	4 (Imagens	MS mais	modelos e p	arâmetr	os escala	ar 20)	-		

ua Lsiação Loo	iugica de Assis p	Jeia lecifica de Ola	assincação On	entaua a Obj			
tratamento 5 (Im	agens MS mais i	modelos e parâmet	ros escalar 40)				
	Referência terrestre						
Classificação	Mabea fistulifera	Sclerolobium paniculatum	outras espécies	total	erro de inclusão (%)		
Mabea fistulifera	134	13	2	149	10,06		
Sclerolobium paniculatum	4	240	31	275	12,73		
Outras espécies	16	27	462	505	8,51		

495

6,67

929

280

14,29

Total

erro de

omissão (%)

154

12,99

Tabela 3.7. Matriz de confusão para avaliação da qualidade da classificação da imagem Quickbird da Estação Ecológica de Assis pela técnica de Classificação Orientada a Objetos utilizando-se o tratamento 5 (Imagens MS mais modelos e parâmetros escalar 40)

Tabela 3.8. Valores obtidos para a acurácia da classificação, segundo os índices Kappa, Tau e Exatidão Global para os tratamentos 1 (Imagens MS e parâmetros escalar 20), 2 (Imagens MS e parâmetros escalar 40), 4 (Imagens MS mais modelos e parâmetros escalar 20) e 5 (Imagens MS mais modelos e parâmetros escalar 20).

	tratamento				
índices	1	2	4	5	
Kappa (%)	71.29a	72.76a	89.04b	89.67b	
Tau (%)	60.28	62.70	84.18	84.98	
Exatidão global (%)	73.52	75.13	89.45	89.99	

As letras ao lado dos valores de Kappa indicam se os tratamentos são significativamente diferentes (letras diferentes) ou não (letras iguais) entre si ao nível de significância de 5% segundo o teste Z.


Figura 3.16. Detalhe das manchas de *Mabea fistulifera* classificadas pelo Tratamento 2 (A) e Tratamento 5 (B), na coloração vermelha, e as mesmas manchas visualizadas na imagem pancromática (C) e composição colorida (D, vermelho mais brilhante) do satélite Quickbird.



Figura 3.17. Detalhe de uma mancha de *Sclerolobium paniculatum* classificadas pelo Tratamento 2 (A) e Tratamento 5 (B), na coloração verde, e a mesma mancha visualizada na imagem pancromática (C, cor mais esbranquiçada) e composição colorida (D, vermelho mais claro) do satélite Quickbird.

### 3.4. DISCUSSÃO

As espécies *S. paniculatum* e *M. fistulifera* foram identificadas com altos índices de acerto nas imagens Quickbird pelo método de classificação orientada a objeto. Os mapas de distribuição potencial das espécies foram úteis para a classificação ao excluir áreas onde as espécies não ocorrem e a classificação digital registrou sua ocorrência. Ambas são espécies de interesse para estudos ecológicos e biogeográficos, práticas de conservação e de interesse comercial. A identificação destas espécies através de técnicas de sensoriamento remoto tem, por essa razão, inúmeras aplicações.

Esta pesquisa representa uma contribuição à análise de dados de sensoriamento remoto de alta resolução, no estudo de florestas tropicais e, mais especificamente, no estudo de espécies arbóreas. O delineamento e a identificação automáticos de copas de árvores têm sido feitos em formações homogêneas de árvores (Gougeon, 1995; Pouilot et al., 2002), mas raramente na heterogênea floresta tropical. Os poucos trabalhos neste sentido na floresta tropical que apresentaram bons resultados foram realizados apenas com fotografias aéreas de alta resolução (Erickson, 2004; Trichon e Julien, 2006).

Trichon e Julien (2006) afirmaram que a nova geração de satélites de alta resolução espacial, como é o caso do IKONOS e do Quickbird, não tem resolução espacial suficiente para a identificação de espécies. Porém, nossos resultados mostraram que para as duas espécies do Cerradão a identificação foi realizada com sucesso. Este resultado indica que, dependendo da formação florestal estudada e da espécie de interesse, a resolução espacial do satélite Quickbird pode ser suficiente para a identificação de árvores.

A identificação remota de espécies arbóreas tem múltiplas aplicações tanto para o estudo da ecologia das espécies de dossel como para o manejo e conservação das florestas tropicais. Tais técnicas podem ser utilizadas para avaliação do valor comercial e de conservação de uma floresta, baseado no reconhecimento de espécies endêmicas ou com interesse comercial. Podem também ser úteis para embasar decisões relacionadas ao manejo florestal, como

por exemplo, o traçado de trilhas de acesso, de forma a evitar a derrubada de espécies importantes. A identificação de árvores de menor interesse comercial ou de conservação, que podem ser suprimidas para favorecer o crescimento de espécies de maior interesse, também pode ser facilitada pelo estudo do dossel florestal em imagens de sensoriamento remoto. É importante, portanto, continuar o desenvolvimento desta área de pesquisa, que apresenta inúmeras aplicações na área florestal. Seria muito interessante a realização de estudos similares em outros tipos de formações vegetais brasileiras, como é o caso da Floresta Ombrófila Densa e do Cerrado *stricto sensu*.

Neste capítulo a abordagem seguida privilegiou o mapeamento da *distribuição real* das espécies arbóreas, refletindo a organização natural dos indivíduos em função da resposta espectral das copas. No capítulo seguinte, é apresentada uma aplicação baseada na modelagem da *distribuição potencial* das mesmas espécies em função dos elementos da paisagem, onde são evidenciadas, além das áreas de ocorrência real, também aquelas onde, embora inexistam indivíduos, estes têm grande probabilidade de ali se instalarem.

## **CAPÍTULO 4**

## Modelagem de distribuição potencial das espécies arbóreas *Mabea fistulifera* e *Sclerolobium paniculatum* na Estação Ecológica de Assis baseada em dados de alta resolução

## 4.1. Introdução

A modelagem de distribuição potencial de espécies (MDPE) é um instrumento que permite uma análise da influência do ambiente sobre as espécies, expresso em um contexto geográfico, ou seja, o resultado da modelagem mostra uma previsão da distribuição de espécies no ambiente analisado. Desde o fim dos anos 1980 o interesse pela MDPE de plantas e animais tem crescido muito. Avanços recentes neste campo de pesquisa têm permitido prever, potencialmente, os efeitos antropogênicos sobre padrões de biodiversidade em diferentes escalas (Guisan & Thuiller 2005). Modelos preditivos de distribuição de espécies têm se tornado uma ferramenta cada vez mais importante para vários temas em ecologia, biogeografia, evolução e, mais recentemente, em biologia da conservação e pesquisas em mudanças climáticas (Guisan & Thuiller 2005).

A MDPE é fundamental tanto para a pesquisa básica como para a pesquisa aplicada à biogeografia. Estes modelos exploram as relações entre a ocorrência de espécies e uma série de variáveis ambientais que produzem dois tipos de informações úteis. A primeira é a estimativa da probabilidade de ocorrência de uma espécie em uma dada localidade em que ela não foi registrada. A segunda é estimar a adequação de uma área para a ocorrência da espécie (Segurado & Araújo 2004).

Os fatores ambientais podem exercer direta ou indiretamente efeitos sobre as espécies e são escolhidos por refletirem um dos três tipos de influência sobre elas:

(1) fatores limitantes (ou reguladores), definido como fatores regulando a eco-fisiologia das espécies (por exemplo: temperatura, água, composição do solo);

(2) distúrbios, definidos como todos os tipos de perturbações afetando os

sistemas ambientais (induzidos naturalmente ou pelo homem), e

(3) recursos, definido como todos os componentes que podem ser assimilados pelo organismo (por exemplo: energia e água) (Guisan & Thuiller 2005).

Estas relações entre a espécie e seu ambiente podem causar diferentes padrões espaciais a serem observados em diferentes escalas (Guisan & Thuiller 2005, Pearson *et al.* 2004). Assim, a distribuição gradual das espécies em uma área ampla e com baixa resolução está condicionada principalmente a fatores climáticos, enquanto a distribuição em manchas observada sobre pequenas áreas com resolução fina é mais freqüentemente resultado da distribuição em blocos dos recursos, gerada por variações micro-topográficas ou fragmentação de habitats (Guisan & Thuiller 2005).

Para realizar MDPE, são usadas coordenadas dos registros de ocorrência das espécies e mapas que resumem a informação ambiental sobre a distribuição dessas espécies. Os dados de ocorrência das espécies podem ser simples dados de presença ou de presença-ausência baseados em amostragens de campo aleatórias ou estratificadas, ou observações obtidas de outras formas, como através de coleções de museus ou dados da literatura (Guisan & Thuiller 2005).

Os mapas tradicionalmente usados em modelagem são os climáticos, topográficos e, mais recentemente, de uso e ocupação do solo (Guisan *et al.* 1999, Hirzel *et al.* 2002, Zaniewsk *et al.* i 2002). Nos últimos anos, os dados de sensoriamento remoto surgiram como uma fonte alternativa de informação para países com problemas de coleta e de grandes dimensões como é o caso do Brasil. Vários trabalhos foram publicados utilizando dados oriundos dos satélites NOOA e Modis, como os índices NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*), para a geração de modelos de distribuição potencial de espécies (Verhoef *et al.* 1996, Peterson *et al* 2005, Peterson *et al* 2008)

Para escalas menores (mais generalizadas espacialmente), a MDPE já é realizada com grande freqüência e a disponibilidade de planos de informação, como topografia, clima e índices de vegetação, é relativamente alta. Quando se

deseja trabalhar em escala de grande detalhe, dentro de uma unidade de conservação, por exemplo, a obtenção de planos de informação de alta resolução é bem mais difícil. Também é difícil a obtenção de dados de ocorrência de espécies, já que neste caso o georreferenciamento deve ser feito baseado em cada indivíduo. Entretanto, a informação gerada em modelagem em alta resolução pode ser de grande aplicação para a conservação e manejo de espécies em unidades de conservação. Neste trabalho avaliamos diferentes técnicas de modelagem de distribuição potencial de duas espécies arbóreas de uma estação ecológica, utilizando dados de alta resolução espacial. Pretendemos com isto contribuir para o manejo destas espécies na unidade de conservação e testar uma metodologia que poderá ser aplicada a outras espécies.

### 4.2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi a elaboração de modelos de distribuição potencial das espécies arbóreas (*Mabea Fistulifera* e *Sclerolobium paniculatum*) na Estação Ecológica de Assis (EEA), baseado em dados de alta resolução espacial. Como objetivos específicos, preteu-se:

1. Determinar se os dados abióticos ou índices obtidos por imagens de satélite de alta resolução, utilizados na modelagem, podem explicar a distribuição potencial das espécies. Se sim, avaliar qual deles contribuiu mais.

2. Investigar qual algoritmo gera modelos de distribuição mais acurados (mais fiéis à realidade) para uma análise em escala de grande detalhe.

3. Indicar quais as áreas de maior adequabilidade ambiental para as espécies (*M. Fistulifera* e *S. paniculatum*) na EEA. Esta informação poderá subsidiar medidas de manejo das espécies na Estação Ecológica.

4. Indicar as áreas de maior probabilidade de se encontrar as espécies na EEA como forma de direcionar as buscas no campo para estudo das espécies

### 4.3. Material e Métodos

### 4.3.1. Área de estudo

A Estação Ecológica de Assis (EEA), com área de 1.312,28 ha, localiza-se no município de Assis, estado de São Paulo, entre as coordenadas 22º33'65" a 22º36'68"S e 50º23'00" a 50º22'29"W e entre as altitudes 520 e 590 m (Capítulo 2, Figura 3.1).

O relevo é suave-ondulado e o clima, segundo a classificação de Köppen, é mesotérmico (Capítulo 3, Figura 3.2), com chuvas concentradas no verão e precipitação média anual em torno de 1400 mm (Cwa). Ocorrem geadas esporádicas, tendo sido a temperatura mínima absoluta registrada de 2ºC num período de 20 anos.

A vegetação da Unidade se enquadra no conceito de cerrado "lato sensu", sendo a forma cerradão a fisionomia predominante. Apresenta árvores de até 15 m de altura, formando dossel contínuo. Em torno dos córregos ocorrem dois tipos de formação: vegetação arbórea densa, com algumas espécies higrófilas preferenciais (Floresta Ciliar) e, em terrenos permanentemente úmidos (brejos), vegetação herbácea e arbustiva exclusivamente higrófila. Sendo assim, a Unidade se caracteriza por um mosaico vegetacional, provavelmente correlacionada a variáveis ambientais (topografia, tipo e fertilidade do solo, capacidade de armazenamento, disponibilidade de água no solo, etc.), microclimáticas e também, relacionadas ao histórico de perturbações antrópicas, principalmente a ocorrência

## 4.3.2. Espécies estudadas

Sclerolobium paniculatum Vog. (Caesalpinaceae) (Capítulo 3, Figura 3.4) é uma espécie que ocorre em Cerradão e na transição para a Floresta Estacional Semidecidual (Durigan et al., 2004). Sua madeira é usada na construção e na produção de carvão vegetal. Recentemente a folha da árvore tem sido pesquisada para uso na produção de cosmético. É uma espécie indicada para uso na recuperação de áreas degradadas. Floresce de dezembro a abril e os frutos

amadurecem de abril a maio (Lorenzi, 2002a). Na Estação Ecológica de Assis é uma árvore emergente, que ocorre de forma agrupada e apresenta copas grandes e, por estes motivos, pode ser facilmente foto-identificada e mapeada nas imagens Quickbird (Capítulo 3, Figura 3.7).

Mabea fistulifera Mart. (Euphorbiaceae) (Capítulo 3, Figura 3.5) ocorre no Cerradão e em áreas de transição para a Floresta Estacional Semidecidual, sendo particularmente abundante nas zonas de transição entre os dois tipos de vegetação (Durigan et al., 2004), nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo. Normalmente é encontrada agregada em bordas de mata e em locais com impacto antrópico acentuado, sendo também recomendada para plantios destinados à recuperação de áreas degradadas. A floração desta planta ocorre de fevereiro a junho, atingindo o pico entre abril e maio (Lorenzi, 2002b), período de escassez de alimentos, o que a torna essencial como fonte alternativa de alimento para muitos animais. Na Estação Ecológica de Assis, forma manchas compactas facilmente foto-identificadas nas imagens Quickbird (Capítulo 3, Figura 3.7).

### 4.3.3. Dados de ocorrência

Os dados de presença das espécies *S. paniculatum* e *M. fistulifera* foram obtidos por interpretação das imagens Quickbird, uma vez que estas espécies são facilmente foto-identificadas nesta resolução (Capítulo 3, Figura 3.7). Alguns agrupamentos reconhecidos na imagem como sendo das espécies, por comparação com manchas já conhecidas no campo, foram checados em visitas de campo, para confirmar a identificação das copas na imagem. Após estas confirmações, foram digitalizadas na imagem as copas que eram seguramente da espécie *S. paniculatum* e pontos distribuídos nas manchas de *M. fistulifera*.

Como pontos de ausência das espécies foram utilizados dados oriundos de trabalhos de campo já realizados na estação, que foram os dados do projeto Parcelas Permanentes (descrição da metodologia no anexo 1) e os dados coletados pelo Dr. Eduardo Pinheiro da Universidade Federal do Amazonas (descrição da metodologia no anexo 2). A distribuição dos pontos de presença e ausência está representada na figura 4.1.



## Presença

Sclerolobium paniculatum

Mabea fistulifera

Ausência

Sclerolobium paniculatum

🔵 Mabea fistulifera

Figura 4.1. Distribuição dos pontos de presença e ausência das espécies *Mabea fistulifera* e *Sclerolobium paniculatum* na Estação Ecológica de Assis.

## 4.3.4. Planos de informação

Foram usadas na modelagem seis planos de informação. Os cinco primeiros foram relativos a índices extraídos de imagens de satélite de alta e média resolução espacial (Quickbird e Aster). O sexto foi o modelo digital de elevação da área. Estes planos de informação foram obtidos das seguintes formas:

 Utilizando as bandas multiespectrais das imagens Quickbird (imagem de julho de 2006 com 2,4 m de resolução) foram extraídos os seguintes índices de vegetação:  NDVI (índice de vegetação da diferença normalizada), que expressa a razão entre as bandas do infravermelho próximo e do vermelho normalizada pela soma destas bandas.

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(\rho_{NIR} + \rho_R)}$$

onde:

 $ho_{NIR}$  = valor de refletância no infravermelho próximo  $ho_{R}$  = valor de refletância no vermelho

 EVI (índice de vegetação realçado), foi desenvolvido para otimizar a resposta da vegetação reduzindo as influências atmosféricas e do solo

$$EVI = G. \frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(\rho_{NIR} + C1.\rho_R - C2.\rho_B + L)}$$

onde:

 $\rho_{NIR}$  = valor de refletância no infravermelho próximo

 $\rho_R$  = valor de refletância no vermelho

 $\rho_B$  = valor de refletância no azul

C1 e C2= coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera para a banda do vermelho e azul

L = fator de ajuste para o solo

G = fator de ganho

Os valores adotados para estes coeficientes são: L=1; C1=6; C2=7,5 e G=2,5 (Huete 1996).

 ARI (Índice de Refletância da Antocianina), valores altos do ARI indicam altas concentrações de antocianina na vegetação como reflexo do crescimento de folhas novas ou morte de folhas.

$$ARI = \rho_{NIR} \left( \frac{1}{\rho_{550}} - \frac{1}{\rho_{700}} \right)$$

onde:

 $\rho_{NIR}$  = valor de refletância no infravermelho próximo

 $\rho_{550}$  = valor de refletância na faixa dos 550 nm

- $\rho_{700}$  = valor de refletância na faixa dos 700 nm
- PVI (índice de vegetação perpendicular), que usa a distância de cada pixel à linha do solo, nas bandas do infravermelho próximo e do vermelho.

 $PVI = a.\rho_{NIR} - b.\rho_R$ 

onde:

 $\rho_{NIR}$  = valor de refletância no infravermelho próximo

 $\rho_R$  = valor de refletância no vermelho

a e b são os coeficientes ajustados para a linha do solo.

Para a descrição mais detalhada destes índices ver Capítulo 1 desta tese.

- 2. Um índice gerado com as bandas 3 (760 a 860 nm) e 5 (2145 a 2185 nm) do sensor ASTER. A banda 5 é um indicativo do teor de umidade da vegetação. Este índice foi calculado baseado na mesma equação do NDVI, apenas substituindo a banda do infravermelho próximo pela banda 5 do Aster. Como a imagem Aster tem uma resolução espacial de 30 m, portanto menor que as imagens Quickbird, foi realizada uma reamostragem na imagem transformando o tamanho do píxel para 2,4 m.
- 3. Modelo digital de elevação (MDE) da área.

Para confeccionar o MDE, foi utilizado o algoritmo TIN (Rede Irregular de Triangulação) gerada através das curvas de nível e cotas altimétricas, tendo como base uma carta topográfica 1:10.000 já digitalizada e cedida pelo Instituto Florestal de São Paulo. O arquivo gerado foi transformado em raster.

Todos os arquivos foram convertidos para coordenadas decimais, recortados para o mesmo tamanho (mesmo número de linhas e colunas) e transformados em arquivos ascii.

### 4.3.5. Método de Modelagem

Foram usados 280 pontos de presença e 280 de ausência para cada espécie. Estes pontos foram divididos em dados de treino e de teste baseado seguinte na equação proposta por Fielding & Bell (1997):

$$t = \frac{1}{1 + \sqrt{p - 1}}$$

onde

t = proporção de pontos de teste

p = número de camadas ambientais usadas na modelagem

Nesta validação, denominada de *data splitting* (Araújo *et al.* 2005), a divisão dos dados foi realizada em cinco partições de teste e treino separadas aleatoriamente para se calcular a variabilidade de cada método e poder comparar estatisticamente cada um deles (Phillips et al. 2006). Foram, portanto, 70% de pontos de treino e 30% de teste. As partições tiveram 39 pontos de treino e 17 de teste cada uma.

Os modelos foram comparados baseados na AUC (area under ROC – receiver operating characteristic - curve). A AUC tem sido muito utilizada na literatura de MDPE, e mede a habilidade de um modelo em discriminar entre lugares em que a espécie está presente e aqueles em que ela está ausente. Varia entre 0 e 1, sendo que o valor 1 indica discriminação perfeita, um valor 0,5 implica que a discriminação preditiva não foi melhor que o acaso, e valores menores que 0,5 indicam que a performance foi pior que o acaso (Elith *et al* 2006). Os modelos gerados foram encaminhados para a botânica Dra. Giselda Durigan, especialista

nas espécies, para a avaliação de sua qualidade.

Os modelos foram gerados de duas formas:

(1) Foram usadas as cinco partições de treino e teste com o intuito de calcularmos a média da AUC de cada experimento e comparar, através da Análise de Variância (ANOVA) o resultado dos diferentes algoritmos.

(2) O modelo foi gerado com todos os pontos de presença (e para alguns algoritmos, também os de ausência) das duas espécies, com intuito de avaliar qualitativamente os modelos.

A modelagem foi realizada nos ambiente computacional *OpenModeller* (algoritmos *Bioclim*, *Environmetal Distance*, *GARP*) e no software Maxent (algoritmo *Maxent*). Estes algoritmos estão descritos na Introdução Geral (Capítulo 1) desta tese.

Para os algoritmos *Bioclim* e *Environmental Distance*, que só usam dados de presença, os dados de ausência foram utilizados apenas para a validação do modelo (teste externo) e cálculo do erro de sobre-previsão. Para o GARP, os dados de ausência foram usados para treino (geração do modelo) e teste (validação do modelo). Como o Maxent não aceita a entrada de dados de ausência, este algoritmo gera aleatoriamente pontos de amostra (background points) sobre a área de estudo. É baseado nestes pontos gerados aleatoriamente e nos pontos de presença (de treino e teste) fornecidos que o resultado do modelo é validado.

O Maxent avalia também a contribuição das camadas ambientais para a geração do modelo. Ele faz isto através da avaliação do aumento do ganho do modelo ao se acrescentar uma variável ambiental. A saída do resultado deste teste é apresentada na forma de uma tabela com a porcentagem de contribuição de cada variável ambiental ao modelo. Este percentual de contribuição é definido heuristicamente, uma vez que o algoritmo pode tomar vários caminhos. Por este motivo, deve ser interpretado com cautela nos casos em que as variáveis ambientais são altamente correlacionadas. Uma alternativa para se avaliar as variáveis mais importantes para o modelo é o teste *jacknife*. Neste teste são criados vários modelos em que a cada momento uma variável é excluída. Em

seguida, um modelo é criado para cada variável isoladamente. Por fim o modelo é gerado com todas as variáveis. O resultado é apresentado na forma de gráfico de barras, comparando os resultados destes modelos. Os gráficos são apresentados com os ganhos dos dados de treino ou de teste e com os resultados de AUC.

# 4.4. Resultados

Dentre os algoritmos testados, apenas o Bioclim teve um desempenho inferior aos demais em termos de valor de AUC, tanto para a geração do modelo de distribuição potencial de *Mabea fistulifera* como de *Sclerolobium paniculatum* (Tabela 4.1). Os outros três algoritmos tiveram um desempenho excelente para a geração dos modelos das duas espécies, com valores de AUC maiores que 0,95.

Tabela 4.1. Resultado dos valores médios de AUC mais ou menos o desvio padrão para obtidos na geração dos modelos de distribuição potencial das espécies *M. fistulifera* e *S. paniculatum* através dos guatro algoritmos estudados.

dee qualle algemanee eeladadeel		
	Mabea fistulifera	Sclerolobium paniculatum
Maxent	$0.962 \pm 0.032a$	0.965 ± 0.011a
Bioclim	$0.868\pm0.064\text{b}$	$0.842\pm0.073b$
Environmental Distance	$0.966 \pm 0.015a$	$0.986 \pm 0.015a$
GARP	$0.956 \pm 0.025a$	$0.988 \pm 0.013a$

Letras diferentes diferem entre si pelo teste *t* de student ao nível de significância de 0.01.

Quando avaliados qualitativamente, todos os modelos se mostraram adequados para representar a distribuição potencial das espécies *Mabea fistulifera* e *Sclerolobium paniculatum* na Estação Ecológica de Assis segundo a especialista Dra. Giselda Durigan do Instituto Florestal de São Paulo e responsável por esta unidade de conservação. Todos eles indicaram um possível caminho para a ocupação das espécies na EEA, e mostraram ser bastante consensuais (Figura 4.2). *Mabea fistulifera* 



Sclerolobium paniculatum





Figura 4.2. Modelos de distribuição potencial das espécies *M. fistulifera* e *S. paniculatum* gerados pelos algoritmos Bioclim, *Environmental Distance*, GARP e Maxent.

Como os modelos gerados foram relativamente consensuais, todos

aprovados pela análise do especialista, optou-se por fazer uma composição final do modelo utilizando as informações geradas por todos eles. Para isso, gerou-se um mapa final (Figura 4.3 e 4.4.) em que consideramos como áreas potenciais de ocorrência das duas espécies as localidades em que os quatro algoritmos indicaram um valor de presença mínima das espécies (valores de adequabilidade do local maior que zero). Este mapa poderá ser utilizado como subsídio para manejo e conservação das espécies *Mabea fistulifera* e *Sclerolobium paniculatum* na Estação Ecológica de Assis, indicando os locais adequados para plantio das espécies, além de indicarem locais de alta probabilidade de encontrá-las como forma de direcionar buscas no campo.

Quanto às camadas ambientais (índices obtidos das imagens e modelo digital de elevação) utilizadas na modelagem, as que mais contribuíram para a geração dos modelos gerados no Maxent foram: índice de umidade da vegetação e MDE (para ambas as espécies), NDVI (para *Mabea fistulifera*) e PVI (para *Sclerolobium paniculatum*) (Tabela 4.2). Porém, como algumas destas camadas são correlacionadas, avaliou-se também o resultado do método Jacknife que mostra que, para *Mabea fistulifera*, as três camadas que mais contribuíram para a geração do modelo no Maxent foram mesmo índice de umidade da vegetação, MDE e NDVI, e para *Sclerolobium paniculatum* foram umidade da vegetação, MDE e ARI.



Figura 4.3. Mapa de distribuição potencial de *Mabea fistulifera* na Estação Ecológica de Assis.



Figura 4.4. Mapa de distribuição potencial de *Sclerolobium paniculatum* na Estação Ecológica de Assis.

Variável	Porcentagem de contribuição	
	Mabea fistulifera	Sclerolobium paniculatum
Umidade da vegetação	50,1	34,9
NDVI	24,0	2,3
MDE	22,0	27,6
PVI	1,0	20,5
ARI	1,8	14,7
EVI	1,2	0,0

Tabela 4.2. Resultado da análise da contribuição de cada variável ambiental para a geração do modelo pelo Maxent.



Figura 4.5. Resultado do teste Jacknife para AUC dos dados de teste de Mabea fistulifera.



Figura 4.6. Resultado do teste Jacknife para AUC dos dados de teste de *Sclerolobium panicultatum*.

#### 4.5. Discussão

Quando analisados visualmente os modelos gerados, pode-se notar que a área de maior adequabilidade para a ocorrência das espécies está bastante relacionada à topografia do terreno. Pelos modelos pode-se inferir que as espécies ocorrem nas áreas mais altas da Estação Ecológica de Assis. Esta inferência é confirmada com observação de campo, já que não são encontrados indivíduos adultos de *Mabea fistulifera* e *Sclerolobium paniculatum* nas áreas mais baixas do terreno da EEA. Uma possível explicação para isso é que as espécies são adaptadas a climas quentes e, como a EEA é uma área frequentemente sujeita a geada, o estabelecimento destas espécies é prejudicado nas áreas de fundo de vale, onde o a frequência de geada é maior.

A alta contribuição do índice que indica o teor de umidade da vegetação (gerado pelas bandas 3 e 5 do sensor Aster) também deve estar relacionada à não ocorrência das espécies nas baixadas próximas a rios. Isto porque se espera que plantas que ocorrem próximas a cursos de água tenham uma disponibilidade de água maior e, portanto, apresentem maior teor de umidade nas suas folhas. Este índice se mostrou bastante indicado para ser usado como mais uma fonte de informação ambiental para a geração de modelos de distribuição potencial de espécies em escala de grande detalhe. A maior contribuição destas duas camadas (MDE e teor de umidade da vegetação) confirma a afirmação de Guisan & Thuiller (2005), de que a distribuição das espécies em uma escala de grande detalhe está bastante associada a variações topográficas do terreno.

Os índices de vegetação contribuíram na geração do modelo para a exclusão das áreas sem cobertura vegetal. Além disso, estes índices conferiram uma maior granulosidade dentro da faixa de ocorrência das duas espécies, provavelmente relacionadas às diferenças de atividade fotossintética e de tipos/quantidade de pigmentos entre as espécies do dossel e ao grau de cobertura do solo nas diferentes porções da área estudada.

Posto isto, pode-se concluir que o modelo digital de elevação forneceu informação sobre quais as áreas que apresentam condições ambientais adequadas para a ocorrência das espécies dentro da reserva (ou seja, seu nicho

fundamental). Por outro lado, os índices de vegetação forneceram informações sobre quais as áreas onde provavelmente as espécies estão no momento (ou seja, algo mais próximo do seu nicho realizado). A utilização de todas essas variáveis aproxima ainda mais o modelo do nicho realizado da espécie.

Dentre os algoritmos utilizados, observou-se que todos são adequados à modelagem nesta escala espacial, levando-se em consideração o grande número de pontos de presença disponível, apesar do desempenho do Bioclim ter sido inferior aos demais. Além dos valores de AUC terem sido elevados, a análise qualitativa dos modelos realizada pelo especialista mostrou que eles representaram bem a distribuição das espécies na EEA. Os modelos finais gerados (figuras 4.3 e 4.4) podem servir de informação para: (1) subsidiar medidas de manejo das espécies na Estação Ecológica de Assis; (2) indicar os caminhos de maior probabilidade para se encontrar as espécies, como forma de direcionar as buscas no campo para estudo das espécies.

#### Considerações Finais

O objetivo original desta pesquisa era investigar o potencial das imagens Quickbird para identificação de indivíduos arbóreos em quatro formações florestais diferentes no Estado de São Paulo (Florestas de Restinga, Ombrófila Densa, Estacional Semidecidual e Cerradão), utilizando-se para isto, os dados de campo do projeto Parcelas Permanentes, conforme foi realizado no Capítulo 2. O projeto previa também, a utilização de imagens referentes à estação seca e à estação chuvosa, para cada uma das áreas. Entretanto, não foi obtida nenhuma imagem da estação chuvosa sem cobertura de nuvens (até 20%) para as áreas estudadas durante o período de imageamento. Além disso, para a Floresta Ombrófila Densa, a única imagem Quickbird obtida continha nuvens na área referente à parcela.

Além da dificuldade de obtenção das imagens, foram encontradas várias inconsistências no georreferenciamento dos dados de campo do projeto temático. Infelizmente, estas inconsistências não puderam ser previstas, pois a descrição da metodologia de coleta de dados do Projeto Parcelas Permanentes pareceu adequada ao objetivo propostp. Creditamos os erros de georreferenciamento encontrados ao fato de que, ao serem coletados os dados no início da execução do projeto temático, a equipe não havia previsto na ocasião, que tais dados poderiam ser utilizados em pesquisas futuras que exigiriam grande precisão e acurácia, como é o caso da pesquisa que balizou este doutorado. Com isso, a execução do trabalho no campo foi realizada com base no grau de precisão dos dados das espécies coletados pelo projeto Parcela Permanentes, mas não compatíveis totalmente com os dados orbitais QuickBird.

Em razão destes problemas, o enfoque do trabalho foi alterado, e por isto, julgamos importante expor aqui as dificuldades encontradas, para que possamos discutir, nesta oportunidade, duas questões pertinentes. A primeira questão, diz respeito à resolução temporal das imagens Quickbird. A experiência que tivemos com esta pesquisa é que, a freqüência em que o satélite passou pelas nossas áreas de interesse foi insuficiente para a obtenção de imagens de boa qualidade para a estação chuvosa. Isso dificulta, sobretudo, a utilização desta imagem para

estudos em áreas tropicais, principalmente em áreas onde a cobertura de nuvens é freqüente durante o ano todo - como é o caso da Floresta Ombrófila Densa.

A segunda questão diz respeito à coleta de dados de campo em projetos de grande porte como é o caso do Projeto Parcelas Permanentes. Não é de se questionar a importância do referido projeto para a geração de conhecimento nas áreas de estudo relacionadas a florestas, durante estes 10 anos de sua execução. Os dados do projeto serviram para diferentes fins e geraram inúmeras teses e publicações de grande qualidade. Porém, quando se executa um projeto deste porte, é necessário que todas as fases de coleta de dados sejam realizadas com extremo rigor, para que os dados possam ser bem aproveitados. Contudo, é lamentável que os dados georreferenciados das árvores não tenham sido coletados com o rigor necessário, dados estes, tão raros de serem obtidos no Brasil e que poderiam servir para diferentes pesquisas.

Estas duas questões nos levam, também, a refletir sobre a visão comum de que a geotecnologia pode ser uma solução simples para todos os problemas de ordem geográfica e ambiental. Quando falamos em imagens de radar, laser, ou em imagens com 0,6 m de resolução espacial, ou com 200 bandas de resolução espectral, corremos o risco de pensar que qualquer informação relativa à superfície terrestre corresponderá a uma interpretação adequada dos objetos terrestres nestas imagens. Porém, de forma isolada, estas imagens não respondem a tudo. São, certamente, ferramentas importantes se associadas adequadamente a dados de campo ou a dados obtidos de outras fontes.

O Capítulo 2 mostrou que as imagens Quickbird são úteis ao estudo do fenômeno de queda de folhas das árvores da Floresta Estacional Semidecidual. Estas imagens podem servir tanto para estudos fenológicos deste tipo de formação florestal quanto para a caracterização de formações florestais, baseada na queda das folhas na estação seca. Na primeira aplicação (fenologia), um estudo bastante interessante seria a utilização das imagens Quickbird obtidas em diferentes períodos, para avaliação da correlação entre a queda das folhas e as mudanças climáticas causadas por fenômenos naturais (como os fenômenos *El Niño* e *La Niña*) ou pelo aquecimento global. Na segunda aplicação, as imagens

Quickbird referentes à estação seca poderiam ser utilizadas para a distinção entre floresta semidecidual e outros tipos de formação florestal. Outro estudo também motivante seria testar, por meio de análise temporal, se a previsão levantada por Durigan e Ratter (2006) de que as áreas de cerradão do estado de São Paulo estão paulatinamente se transformando em Floresta Estacional Semidecidual, vai se confirmar. Para isto, poderiam ser comparadas, no decorrer do tempo, imagens Quickbird da estação seca da Estação Ecológica de Assis (EEA) com as da Estação Ecológica de Caetetus (EEC), esperando-se que, se a previsão se confirmar, cada vez mais copas de árvores decíduas surgiriam na imagem da EEA.

O Capítulo 2 desta tese mostrou também que a identificação de espécies da Floresta Estacional Semidecidual baseada em imagens Quickbird é muito limitada - pelo menos para as espécies testadas e para a situação quando se tem apenas imagens de uma estação no ano. Já no Capítulo 3, observou-se que dependendo das características da espécie de interesse, a identificação de árvores em imagens Quickbird pode ser realizada com uma boa precisão. Acreditamos que as características dos dosséis da Floresta Estacional Semidecidual e do Cerradão tenham influenciado na diferença de resultados obtidos nas duas áreas. Na Floresta Estacional, o dossel é heterogêneo, com grande número de espécies emergentes. Já no Cerradão, o dossel é freqüentemente mais homogêneo e a presença de espécies emergentes é mais rara. Desta forma, as poucas árvores emergentes do Cerradão têm um destaque muito maior nas imagens que as várias árvores emergentes da Floresta Estacional.

O Capítulo 3 mostrou também que o uso de dados espaciais das espécies pode melhorar o resultado da identificação, principalmente quando se usa o método de classificação orientada a objetos. Neste sentido, os métodos de Segmentação Multi-resolução e Classificação Orientada a Objetos se mostraram adequados para o alcance dos objetivos propostos.

A partir dos resultados obtidos nos Capítulos 2 e 3, concluímos que a resolução espectral do sensor Quickbird permite a identificação de uma

quantidade limitada de espécies da floresta tropical. Por meio destas imagens só foi possível identificar as árvores que mais se destacam no dossel. Por isto, pretendemos dar continuidade a esta pesquisa testando a identificação de espécies através da associação entre a resolução espacial do Quickbird e a resolução espectral do sensor Hyperion (200 bandas). Para isso, já firmamos uma parceria com pesquisadores da Universidade de Kansas, nos Estados Unidos que estão realizando estudo semelhante na Amazônia Peruana.

No Capítulo 4, pudemos avaliar outra aplicação do sensoriamento remoto para estudos florestais: a modelagem de distribuição potencial de espécies. O uso desta técnica em sensoriamento remoto é relativamente novo e tem grande potencial de aplicação nas áreas de ecologia, biogeografia, conservação e manejo da biodiversidade e estudo de mudanças climáticas. Os índices obtidos através de imagens de satélite se mostraram úteis na coleta de informações ambientais para caracterização do nicho das espécies em escalas de grande detalhe.

Esta tese discutiu ainda algumas aplicações das imagens de satélite para estudo biogeográfico e florestal, mostrando que o potencial destas é grande e deve continuar a ser investigado. Espera-se que as perguntas que este trabalho possa ter gerado sirvam de inspiração a novas pesquisas e também, que a metodologia aqui empregada possa ser utilizada para outras áreas e espécies. É também nosso desejo, que os mapas de distribuição real e potencial das espécies *Mabea fistulifera* e *Sclerolobium paniculatum,* produzidos nesta tese, possam ser aproveitados para fins de pesquisa, manejo e conservação destas espécies no território brasileiro.

### Bibliografia

- Achard, F. & Blasco, F., 1990. Analysis of vegetation seasonal evolution and mapping of forest cover in West Africa with the use of NOAA AVHRR HRPT data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 10: 1359-1365.
- Anderson, R.P.; Lew, D. & Peterson, A.T. 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling* 162:211-232.
- Antongiovanni, M., Venticinque, E.M., Moreira, M.P., Ferreira, F.G., Pinheiro, T.f., Carneiro, J.S., Andrade, A.S., D'Angelo, S. & Laurance, W.F. 2004. O uso de imagens de alta resolução na construção de bibliotecas espectrais de árvores. *III Conferência Científica do LBA Brasília.* 27 a 29 de julho de 2004.
- Antunes, A.F.B. 2003 Classificação de ambiente ciliar baseada em orientação a objeto em imagens de alta resolução espacial. Curitiba, 147 p. Tese (Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná.
- Araujo, M.B. & Guisan, A. 2006. Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of Biogeography* 33:1677-1688.
- Araujo, M.B; Thuiller, W.; Williams, P.H. & Reginster, I. 2005. Downscaling European species atlas distributions to a finer resolution: implications for conservation planning. *Global Ecology and Biogeography* 14:17-30.
- Asner, G. P.; Palace, M.; Keller, M.; Pereira Jr., R.; Silva, J. N. M.; Zweede, J.C.
  2002. Estimating canopy struture in an Amazon Forest form Laser Range
  Finser and Ikonos satellite observation. *Biotropica* 34(4):483-492.
- Asner, G. P.; Nepstad, D.; Cardinot, G. & Ray, D. 2004. Drought stress and carbon uptake in an Amazon forest measured with spaceborne imaging spectroscopy. *Proceddings of the National Academy of Science of the United States of America* 101:6039-6044.

- Asner G. P.; Towsend, A.R. & Braswell, B.H. 2000. Satellite observation of El Niño effects on Amazon forest phenology and productivity. *Geophysical Research Letters* 27:981-984.
- Baatz, M. & Schäpe, A. 1999. Mutiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. München. Disponível em <www.definiens.com< Acesso em Março/2007.
- Barguil, S.R. 1998. Geoprocessamento aplicado ao monitoramento de cerrado: um estudo de caso na porção noroeste da APA Corumbataí (SP). *Tese de Mestrado*. USP São Carlos.
- Bernacci, F.C. & Leitão-Filho, H.F. 1996. Flora fanerogâmica da floresta da fazenda São Vicente, Campinas, SP. *Revista Brasileira de Botânica* 19:149-164.
- Blaschke T. & Hay G. 200. Object-oriented image analysis and scale-space: theory and methods for modeling and evaluating multiscale landscape structure. Disponível em:<www.defeniens.com/publication.pdf> Acesso em Mar/2007.
- Bongers, F. 2001. Methods to assess tropical rain Forest canopy structure: an overview. *Plant Ecology* 153:263-277.
- Box, E.O, Holben, B.N. & Kalb,V. 1989. Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO2 flux. *Vegetatio* 80: 71-89.
- Brites, R.S., Soares, V.P. & Ribeiro, C.A.A.S. 1996. Verificação da exatidão em classificação de uma imagem orbital mediante a utilização de três índices. *Revista Árvore* 20(3):415-424.
- Brown, J.H. & Lomolino, M.V. 2006. *Biogeografia*. Segunda edição, FNPEC Editora, Ribeirão Preto, 692 p.

- Busby, J.R. 1986. A biogeoclimatic analysis of *Nothofagus cunninghamii* (Hook.) Oerst. In southeastern Australia. *Australian Journal of Ecology* 11:1-7.
- Carleer, A. & Wolff, E. 2004, Exploitation of very high resolution satellite data for tree species identification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 70(1):135-140.
- Carpenter. G., Gillison, A.N. & Winter, J. 1993. DOMAIN: a flexible modeling procedure for mapping potencial distribution of plants and animals. *Biodiversity and Conservation* 2:664-680.
- Carvalho, P.E.R. 1994. *Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira*. Embrapa-CNPF/SPI, Colombo, PR.
- Chambers, J.Q.; Asner, G.P.; Morton, D.C.; Anderson, L.O.; Saatchi, S.S.; Espírito-Santo, F.D.B.; Palace, M. & Souza Jr., C. 2007. Regional ecosystem structure and function: ecological insights from remote sensing of tropical forests. *Trends in Ecology and Evolution* 22(8):414-423.
- Clark, M.L., Roberts, D.A. & Clark, D.B. 2005. Hyperspectral discrimination of tropical forest tree species at leaf to crown scales. *Remote Sensing of Environment* 96:375-398.
- Cowell, C.W. & Parker, A.J. 2003. Biogeography in the Annals. *Annals of the Association of American Geographers* 94(2):256-268.
- Colwell, J.E. 1974. Vegetation canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* 3:175-183.
- Congalton, R.G. & Mead, R.A. 1983. A quantitative method to test for consistency and correctness in photointerpretation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 49(1):69-74

- Cristianini, N. & Shawe-Taylor, J. 2000. *Support Vector Machines and other kernelbased learning methods*. Cambridge University Press.
- Daud, R.D. & Feres, R.J.F. 2004. O valor de Mabea fistulifera Mart. (Euphorbiaceae), planta nativa do Brasil, como reservatório para o predador Euseius citrifolius Denmark & Muma (Acari, Phytoseiidae). Revista Brasileira de Zoologia 21(3):453-458
- Dias, L.E., Brienza Jr. S., Pereria, C.A. 1995. Taxi-branco (Sclerolobium paniculatum Vogel): uma leguminosa arbórea nativa da Amazônia com potencial para recuperação de áreas degradadas. In: KANASHIRO, M.; PARROTA, J. A., ed. Manejo e reabilitação de áreas degradadas e florestas secundárias na Amazônia. Paris: UNESCO.
- Durigan, G., Baitello, J.B., Franco, G.A.D.C. & Siqueira, M.F. 2004. Plantas do Cerrado Paulista: Imagens de uma paisagem ameaçada. São Paulo: Páginas & Letras, São Paulo, SP. 475 p.
- Durigan, G. *et al.* 2008. Plano de Manejo da Estação Ecológica de Assis. Instituto Florestal do Estado de São Paulo.
- Durigan, G. & Ratter, J.A. 2006. Successional changes in cerrado and cerrado/forest ecotonal vegetation in western São Paulo State, Brazil, 1962-2000. Edinburgh Journal of Botany 63(1):119-130.
- Elith, J.; Graham, C.H.; Anderson, R.P.; Dudík, M.; Ferrier, S.; Guisan, A.;
  Hijmans, R.J.; Huettmann, F.; Leathwick, J.R.; Lehmann, A.; Li, J.; Lohmann,
  L.G.; Loiselle, B.A.; Manion, G.; Moritz, C.; Nakamura, M.; Nakazawa, Y.;
  Overton, J.M.; Peterson, A.T.; Phillips, S.J.; Richardson, K.S.; ScachettiPereira, R.; Schapire, R.E.; Soberon, J.; Williams, S.; Wisz, M.S. &
  Zimmermann N.E. 2006. Novel methods improve prediction of species'
  distributions from occurrence data. *Ecography* 29:129-151.

Elton, C. 1927. Animal Ecology. Sedgwick and Jackson, London.

- Erikson, M. 2003. Segmentation of individual tree crowns in colour aerial photographs using region growing supported by fuzzy rules. *Canadian Journal of Forest Research-revue Canadienne de Recherche Forestiere* 33(8):283-289.
- Erikson, M. 2004. Segmantation and Classification of Individual Tree Crowns. *Doctoral Thesis*, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Fan, G. & Xia, X. 2001. A joint multicontext and multiscale approach to Beyesian image segmentation. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* 39(2): 2680-2688.
- Fearnside, P.M. 1996. Amazonian deforestation and warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon Forest. *Forest Ecology and Management.* 80:21-34.
- Foddy, G.M.; Boyd, D.S. & Cluster, M.E.J. 2003. Predective relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment* 85:463-474.
- Fu, K.S & Mui, J.K. 1981. A Survey on image segmentation. *Pattern Recognition* 13:3-16.
- Galina, M.H. 2006. A biogeografia no núcleo de Rio Claro (SP): análise e avaliação das contribuições científicas no período de 1969-2004. Tese de Doutorado, UNESP, Rio Claro (SP).
- Gillespie, T.W.; Foody, G.M.; Rocchini, D.; Giorgi, A.P. & Saatchi, S. 2008. Measuring and modeling biodiversity from space. *Progress in Physical Geography* 32(2):203-221.
- Gitelson, A.A., M.N. Merzlyak, & O.B. Chivkunova, 2001. Optical Properties and Nondestructive Estimation of Anthocyanin Content in Plant Leaves. *Photochemistry and Photobiology* 74:38-45.

- Goel, N.S. 1988. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews* 4:1-21.
- Goel, N.S. & Strebel, D.E. 1984. Simple beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies. *Agronomy Journal* 76:800-803.
- Gonçalves, L. Fonseca, A.M. & Caetano, M. 2001. Exploração de imagens de alta resolução do satélite Ikonos. In: Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica (ESIG 2001), 6., Lisboa, 2001. Anais. Lisboa, 22p. Série Comunicação.
- Gougeon, F.A. 1995. A crow-following approach to the automatic delineation of individual tree crows in high spatial resolution aerial images. *Canadian Journal of Remote Sensing* 21:274-284.
- Grinnell, J. 1917. The niche-relationships of the California Trasher. *Auk* 34:427-433.
- Guisan, A., Edwars, T.C. & Hastie, T. 2002. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological Modelling* 157:89-100.
- Guisan, A. & Thuiller, W. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8:996.1009.
- Guisan, A., Weiss, S.B. & Weiss, A.D. 1999. GLM versus CCA spatial modelling of plant species distribution. *Plant Ecology* 143:107-122.
- Hájek, F. 2005. Object-oriented classification of remote sensing data for the identification of tree species composition. Proceedings of ForestSat 2005 conference, May 31 June 3, 2005, Boras, Sweden.

- Hirzel, A.H.; Hausser, J.; Chessel, D. & Perrin. N. 2002. Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data? *Ecology* 83:2027-2036.
- Hoffmann, A; Vegt, J.W.V. 2001. New sensor systems and new classification methods: laser-and digital camera-data meet object-oriented strategies. *Journal for Spatial Information and Decision Making* 6(1):18-23.
- Holmström, H. 2002. Estimation of single-tree characteristics using kNN method and plotwise aerial photograph interpretations. *Forest Ecology and Management* 167:303-314.
- Huete, A.R.; Didan, K.; Shimabukuro, Y.E.; Saçeska, S.R.; Hutyra, L.R.; Yang, W.;
   Nemani, R.R. & Myneni, R. 2006. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters* 33:L06405
- Hutchinson, G.E. 1957. Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 22:415-427.
- Innes, J.L. & Koch, B. 1998. Forest biodiversity and its assessment by remote sensing. *Global Ecology and Biogeography* 7:397-419.
- Jackson, R.D. & Huete, A.R. 1991. Interpreting vegetation indices. *Journal of Preventive Veterinary Medicine*, 11:185-200.
- Jordan, C.F. 1969. Derivation of leaf area indices from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50:663-666.
- Key, T.W.; Warner, T.A.; McGraw, J.B. & Fajvan, M.A. 2001. A comparison of multispectral and multitemporal information in high spatial resolution imagery for classification of individual tree species in a temperate hardwood forest. *Remote Sensing and Environment* 75(1):100-112.

Köppen, W. 1948. *Climatologia*. Fondo de Cultura Económica. México.

- Kronka, F.J.N.; Nalon, M.A. & Matsukuma, C.K. 2005. Inventário florestal da vegetação natural do estado de São Paulo. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente/Insituto Florestal. Imprensa Oficial.
- Landis, J.R. & Koch, G.G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33(1):159-174
- Lillesand, T.M & Kiefer, R.W. 1995. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Lillesand, T.M & Kiefer, R.W. 2000. Remote *sensing and image interpretation*. 4 ed. John Wiley & Sons, New York.
- Lorenzi, H. 2002. Árvores Brasileiras v.1. Plantarum. Nova Odessa, SP.

Lorenzi, H. 2000. Árvores Brasileiras v.2. Plantarum. Nova Odessa, SP.

- Lu, D., Batistella, M. & Moran, E. 2005. Satellite estimation of aboveground biomass and impacts of forest stand structure. *Photogrammatric Engineering* & Remote Sensing. 71(8):967-974.
- Ma, Z. & Redmond, R.L. 1995. Tau coefficients for accuracy assessment of classification of remote sensing data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 61(4):435-439.
- Monge-Nájera, J. 1999. Historical biogeography: Status and goals for the 21<sup>st</sup>. century. *Gayana*. 63(2):165-170.
- Monge-Nájera, J. 2008. Ecological biogeography: a review with emphasis on conservation and neutral model. *Gayana*. 72(1):102-112.
- Nix, H.A. 1986. A biogeographic analysis of Australian elapid snakes. Pages 4-15 *in* R. Longmore, editor. Atlas of Australian Elapid Snakes. Australian Government Publishing Service, Canberra.

- Nunes, G.M. 2008. Sensoriamento remoto aplicado na analise da cobertura vegetal das reserves de desenvolvimento sustentável Amaná e Mamiraua. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas.
- Olson, C.E., Jr. & Weber, F.P. 2000. Foresters' roles in remote sensing. *Journal of Forestry* 98(6):11-12.
- Palmer, M.W. 1988. Fractal geometry: a tool for describing spatial patterns of plant communities. *Vegetatio* (75):91-102.
- Parmesan, C., Gaines, S., Gonzales, L., Kaufman, D.M., Kingsolver, J., Peterson,
   A.T. & Sagarin, R. 2005. Empirical perspectives on species borders: from
   traditional biogeography to global change. *Oikos* 108:58-75.
- Pearson, R.G.; Dawson, T.D. & Liu, C. 2004. Modelling species distributions in Britain: a hierarchical integration of climate and land-cover data. 27:285-298.
- Perry, C.Jr. & Lautenschlager, L.F. 1984. Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote sensing and the Environment* 14:169-182.
- Peterson, A.T.; Martínez-Campos, C.; Nakazawa, Y. & Martínez-Meyer, E. 2005. Time-specific ecological niche modeling predicts spatial dynamics of vector insects and human dengue cases. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 99:647-655.
- Peterson, A.T.; Papes, M. & Soberón, J. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling* 213:63-72.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. & Schapire, R.E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling* 190:231-259.

- Phillips, S.J.; Dud<sub>i</sub>k, M. & Schapire, R.E. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. Pages 655-662 *in* Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning
- Pinheiro, E.S. 2003. Avaliação de imagens *QUICKBIRD* na análise geográfica de um setor da Mata Atlântica do Rio Grande do Sul. Tese de Mestrado. INPE - São José dos Campos.
- Pinheiro, E.S. 2008. Análise ecológica e sensoriamento remoto aplicados à estimativa de fitomassa de cerrado na Estação Ecológica de Assis, SP. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos USP.
- Pinheiro, T.F., Fonseca, M.A., Venticinque, E.M., Moreira, M.P., Sobrinho, F.A., Andrade, A.S., Laurence, W.F. & D'Angelo, S.A. 2004<sup>a</sup>. Problemas no uso de imagens de alta resolução para quantificação de indivíduos arbóreos. *III Conferência Ciêntífica do LBA Brasília.* 27 a 29 de julho de 2004.
- Pinheiro, T.F., Fonseca, M.A., Venticinque, E.M., Moreira, M.P., Sobrinho, F.A., Andrade, A.S., Laurence, W.F. & D'Angelo, S.A. 2004<sup>b</sup>. Uso de imagens de alta resolução para a quantificação de indivíduos arbóreos em florestas tropicais. *III Conferência Ciêntífica do LBA Brasília.* 27 a 29 de julho de 2004.
- Ponzoni , F.J. 2001. Comportamento espectral da vegetação. Em: Sensoriamento remoto: Reflectância de alvos naturais. Meneses, P.R. & Netto, J.S.M. (Org.). Editora UNB, Brasília, DF.
- Pouliot, D.A., King, D.J., Bell, F.W. & Pitt, D.G. 2002. Automated tree crow detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. *Remote Sensing of Environment* 82:322-334.
- Qi, J., Chehbouni A., Huete, A.R., Kerr, Y.H. & Sorooshian, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index, *Remote sensing and the Environment* 48:119-126.
- Read, J.M., Clark, D.B., Venticinque, E.M. & Moreira, M.P. 2003. Application of merged 1-m and 4-m resolution satellite data to research and management in tropical forests. *Journal of Applied Ecology* 40:592-600.
- Richardson, A.J. & Wiegand, C.L. 1977 Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 43:1541-1552.
- Ricklefs, R.E. 2004. A comprehensive framework for global patterns in biodiversity. *Ecology Letters* 7:1-15.
- Root, T. 1988. Energy constraints on avian distributions and abundances. *Ecology* 69:330-339.
- Rouse, J.W.Jr., Haas, R., Deering, D.W., Schell, J.A. & Harlan, J.C. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green Wave Effect) of natural vegetation. *Nasa/GSFC Type III Final Report*. Greenbelt, MD.
- Schiewe, J., Tufte, G. & Ehlers, M. 2001. Potencial and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing. Disponivel em:<www.definiens.com/decumentation>. Acesso em Mar/2007.
- Schneider, W. & Steinwendner, J. 1999. Landcover Mapping By InterrelatedSegmentation And Classification Of Satellite Images. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, Part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, 3-4 June, 1999
- Segurado, P. & Araújo, M.B. 2004. An evaluation of methods for modelling species distributions. *Journal of Biogeography* 31:1555-1568.
- Sejas, M. I. 2002. UTM v 1.0. Software aplicativo de uso específico. Versão freeware. Curitiba, PR.
- Sejas, M. I. 2002. GeoTrans v1.0. Software aplicativo de uso específico. Versão

freeware. Curitiba, PR.

- Silva, C.T., Reis, G.G. & Reis, M.G.F. 2004. Avaliação temporal da florística arbórea de uma floresta secundária no município de Viçosa, Minas Gerais. *Revista Árvore* 28(3):429-441.
- Solberg, A. 1996. A Markovv Random Field model for classification of multisource Satellite Imagery. *IEEE Transations on Geosciences and Remote Sensing, Vol 34, January*.
- Stockwell, D. & Peters, D. 1999. The GARP modeling systems: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographic Information Science* 13:143-158.
- Stockwell, D.R.B. & Peterson, A.T. 2002. Effects of sample size on accuracy of species distribution models. *Ecological Modelling* 148:1-13.
- Sutton, T., Giovanni, R. & Siqueira, M.S. 2007. Introducing openModeller a fundamental niche modelling framework. *OSGeo Journal* 1:1-6.
- Tabanez *et al.* 2005. Plano de Manejo da Estação Ecológica de Caetetus. Instituto Florestal do Estado de São Paulo
- Tanaka, S & Sugimura, T. 2001. A new frontier of remote sensing from IKONOS images. *International Journal of Remote Sensing* 22(1):1 5.
- Tao, V. & Hu, Y. 2001. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67(12):1347 – 1357..
- Torres, R.B., Martins, F.R. & Kinoshita, L.S. 1997. Climate, soil, relief, and tree flora relationships in forests in the state of São Paulo, southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Botânica* 20:41-50.

- Toutin, Th. & Cheng, P. 2002. QUICKBIRD a milestone for high resolution mapping. *Earth Observation Magazine* 11(4):14–18.
- Trichon, V. & Julien, M.P. 2006. Tree species identification on large scale aerial photographs in a tropical rain forest, French Guiana application for management and conservation. *Forest Ecology and Management* 225:51-61.
- Troppmair, H. 1987. Biogeografia e Meio Ambiente. UNESP, Rio Claro (SP).
- Turner, W.; Spector, S.; Gardiner, N.; Fladeland, M.; Sterlin, E. & Steininger, M. 2003. Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology and Evolution* 18:306-314.
- Vapnik, V.N. 1995. The Nature of Statistical learning Theory. Springer.
- Venticinque, E.M., Fonseca, M.A., Moreira, M.P., Farias, T.P., Ferreira, F.G., Carneiro, J.S., Sobrinho, F.A., Andrade, A.s. & William, F.L. 2004. Arranjo espacial do dossel e alguns problemas relacionados ao uso de imagens de alta resolução no estudo de florestas tropicais. *III Conferência Ciêntífica do LBA Brasília*. 27 a 29 de julho de 2004.
- Verhoef, W.; Menenti, M. & Azzali, S. 1996. A colour composite of NOAA-AVHRR-NDVI based on time series analysis (1981-1992). *International Journal of Remote Sensing* 17:231-235.
- Viadana, A.G. 2004. Biogeografia: Natureza, Propósitos e Tendências. In: Vitte, A. C., Guerra, A.J.T. (Org.). *Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. p. 111-127.
- Wittaker, R.J., Araújo, M.B., Jepson, P., Ladle, R.J.; Watson, J.E.M. & Willis, K.J. 2005. Conservation Biogeography: assessment and prospect. *Diversity and Distributions* 11:3-23.

Woodwell, G.M., Houghton, R.A., Stone, T.A., Nelson, R.F. & Kovalick, W. 1987.
Deforestation in the tropics: new measurement in the Amazon basin usinf
Landsat and NOAA AVHRR imagery. *Journal of Geophysic Researches* 92(D2):2157-2163

# Método do trabalho de campo realizado pela equipe do projeto "Diversidade, Dinâmica e Conservação em Florestas do Estado de São Paulo: 40 ha de Parcelas Permanentes"

#### Demarcação das parcelas e levantamento topográfico

O local para a alocação da parcela foi escolhido por pesquisadores de diferentes áreas do conhecimento envolvidos no projeto temático. A equipe de topografia auxiliou na definição da direção da grande parcela (320x320m) para adequar ao terreno escolhido. A delimitação no terreno foi realizada com o auxílio de um equipamento de topografia (estação total de alta precisão) descrevendo uma poligonal fechada com aresta de 320,0 m exatos, definida a partir de polígono amostral.

Nos quatro vértices deste polígono amostral foram implantados marcos de concreto revestidos por um tubo de PVC branco com 100 mm de diâmetro, para monumentação das coordenadas geográficas.

Partindo-se geralmente do marco denominado **A0**, foi executado um caminhamento topográfico com teodolito e trena para demarcação da grade de 20,0m x 20,0m, com estacas de madeira de cerne de eucalipto tratada com dimensões de 0,06 x 0,06 x 1,20m seguindo a direção de **A16**.

Como estratégia de redução de impacto dessa atividade de demarcação da parcela maior e das sub-parcelas em cada área, definiu-se fazer as caminhadas de visada do teodolito a cada 03 linhas da grade amostral, e não em todas das linhas ou trilhas da grade, objetivando reduzir o pisoteio da área da equipe de topografia nesta etapa de trabalho.

Isso foi feito utilizando-se a seguinte metodologia: a cada linha demarcada pelo aparelho, carregava-se mais duas outras paralelas à esquerda e à direita, girando-se um ângulo horizontal de 90°, o que já permitia marcar as duas linhas intermediárias não trilhadas pela equipe. Ainda nesta operação foram levantados pontos auxiliares de altimetria para detalhamento do centro das sub-parcelas de

133

20,0m x 20,0m, quando se fez necessário.

#### Georreferenciamento da parcela

Para a Estação Ecológica de Caetetus, o ponto utilizado como referência para o georreferenciamento da parcela de 320,0m x 320,0m foi o marco municipal denominado CONCHA monumentado pela Santiago & Cintra, localizado no passeio esquerdo da rua Luiz Antônio, na proximidades do número 400, na cidade de Gália, cujas coordenadas foram UTM SAD 69 Zona 23 E =639369,904 N =75442993,151 Z =644.000m. Os marcos foram rastreados por 8 min cada, nos vértices A0 e A16. As coordenadas geográficas das sub-parcelas de 20,0m x 20,0m foram extraídas a partir das coordenadas da parcela maior, considerando a posição da sub-parcela na grade amostral. O equipamento utilizado foi o receptor Trimble modelo Pro XR, de Banda receptora de código C/A + Portadora L1 com precisão de 0,50m.

### Delimitação da área a ser plaqueada

No início dessa atividade, todo o processo de plaqueamento e mapeamento dos indivíduos ocorrentes dentro das sub-parcelas, realizado pela equipe do projeto temático, tinha início com a delimitação da área a ser plaqueada através de uma fita, corda fina ou trena para fechar o quadrado da sub-parcela.

a) neste primeiro procedimento de campo, as fitas foram amarradas às quatro estacas que demarcavam cada sub-parcela de 20,0m x 20,0m, delimitandoa.

b) neste procedimento, uma das trenas era esticada e presa a duas estacas que correspondiam ao eixo x da sub-parcela e a outra trena era esticada e presa nas duas estacas que correspondiam ao eixo y. Os outros dois lados da subparcela eram delimitados com fitas marcadoras.

c) nesse procedimento de campo a trena utilizada tinha 50m, e esta trena era presa e esticada passando por três estacas do eixo x, ou seja seguindo até a sub-parcela adjacente àquela que estava sendo medida. As laterais que

134

correspondem ao eixo y, o fundo e as estacas que dividiam essas duas subparcelas adjacentes eram isoladas com as fitas marcadoras.

Entre estas duas sub-parcelas eram esticadas trenas de 20m, ou seja, a trena de 20m era colocada no sentido do eixo y, numa distância de 10m do eixo x, sub- dividindo a sub-parcela em duas, para facilitar a marcação, o plaqueamento e o mapeamento (coordenadas x e y) dos indivíduos.

## Atividade de plaqueamento e mapeamento dos indivíduos ocorrentes nas subparcelas

a) Os indivíduos foram plaqueados com chapa de alumínio, numerada no momento em que era efetuada a medição das coordenadas X e Y.

b) O número da placa era anotado em formulário específico, também no momento da medição de X e Y.

c) Ao término de cada sub-parcela e de cada linha amostral, a área era rechecada para verificar algum esquecimento de indivíduo no campo e os formulários conferidos e agrupados verificando qualquer omissão de dados ou problemas de anotação dos dados e fazendo a limpeza da sub-parcela em termos de possíveis resíduos gerados na marcação, fitas, trenas etc, deixando apenas as estacas delimitadoras e as plaquetas de alumínio fixadas com pregos nos indivíduos.

d) Concomitantemente, trabalhavam no campo três ou quatro equipes de plaqueamento e mapeamento dos indivíduos nas sub-parcelas, sendo que cada equipe era responsável por uma linha amostral na grade, ficando independente das demais equipes no rendimento de suas atividades.

Ao final de cada expedição de campo, todas as equipes organizavam os formulários em pastas, seguindo a sequência das linhas, que permitisse identificar a equipe responsável por cada sub-parcela. Todo esse material era transportado para o escritório, onde era devidamente sistematizado.

#### Etapa de Escritório

1. A folha de campo foi digitada, usando para isso um processador de

planilhas eletrônicas (Excel). Cada sub-parcela correspondia a uma planilha própria, identificada pelo seu número e suas coordenadas x e y em metros.

2. Na etapa seguinte foram identificadas para cada sub-parcela as coordenadas de origem (ex. coordenadas E,N da sub parcela A2) e o azimute necessário ao georreferenciamento obtido através do levantamento topográfico de campo e processamento no aplicativo TOPOESALQ. Estes dados foram capturados do mapa já georreferenciado.

3. Com estes dados, a planilha processou a transformação do sistema local de coordenadas de cada sub-parcela (coordenadas x e y), para o sistema UTM-SAD69 (posteriormente transformado para WGS84, para este trabalho, através do programa GeoTrans v1.0 (*http://br.geocities.com/mausejas/*)).

4. Como procedimento de "controle de qualidade", para cada parcela e subparcela processada, foi plotado em mapa para checagem e verificação visual, o posicionamento dos indivíduos usando diversas cores, bem como a verificação dos limites entre as sub-parcelas.

5. Apos a verificação dos dados de cada sub-parcela, todos os dados das sub-parcelas foram compilados em um único arquivo (TXT), conforme o padrão que nos foi definido pelo pesquisador responsável pelo banco de dados do projeto e pelo sistema de informações geográficas (Prof. Dr. Gerd Sparovek).

6. Os arquivos de mapeamento foram confeccionados usando o aplicativo AUTOCAD R14 e disponibilizados em dois formatos (DWG e DXF), além de uma versão em papel. Todas as planilhas de campo foram devidamente organizadas e arquivadas para possíveis conferências futuras.

## Método de amostragem realizada pelo Dr. Eduardo Pinheiro na Estação Ecológica de Assis.

A amostragem foi efetuada utilizando o método de parcelas. Foram distribuídas 30 parcelas, sendo 10 para cada uma das três fitofisionomias de cerrado existentes na unidade de conservação, a saber: cerrado típico, que ocupa 0,84% da EEA, cerrado denso – 2,56% e cerradão – 91,43%.

Foram utilizadas parcelas retangulares de 1.000 m<sup>2</sup>, com dimensões de 20 x 50 m. Cada parcela foi subdividida em 10 subparcelas de 10 x 10 m (100 m<sup>2</sup>). Todas as parcelas foram georreferenciadas com o Sistema de Posicionamento Global (GPS) modelo *Trimble Pro-XR*, empregando-se o método DGPS, com coordenadas pós-processadas para obter maior precisão no posicionamento.

Todos os indivíduos arbóreos vivos e com diâmetro à altura do peito (DAP) igual ou superior a 5 cm foram amostrados e numerados com etiqueta metálica. Os dados adquiridos em campo foram: DAP, altura total e identificação da espécie. No caso de algumas espécies que não puderam ser identificadas em campo, foi coletado material botânico para comparação com exsicatas depositadas em Coleção Botânica da Floresta Estadual de Assis, do Instituto Florestal do Estado de São Paulo.

Funções de pertinência usadas na classificação da imagem Quickbird de Caetetus utilizando a seguinte hierarquia de classes: (1) "*copa*" x "*sombreadas*"; (2) "*perene*" x "*decíduas*" (herdando as características de "*copa*"), e "*Aspidosperma*" x "*Gallesia*" (herdando as características de *perene*).

Sample Editor		<b>×</b>
Active class	are class	
copa 💌 sombr	readas	•
	Brightness [128.0 - 280.3] StdDev.: 33.83	
101 0 128 8 156 5 184 3 212 0 239 8 267 5 295 3 32	[108.8 - 124.5] StdDev.: 4.77	
101.0120.0 100.0 104.0 212.0 200.0 201.0 200.0 02.	5.0 Overap : 0.00	
Sample Editor		•×
Active class Compa	are class	
perene decidu	la	
	Mean 54 (NN) [465.6 - 816.4] StdDex : 95.03	
Land I and the last the	[228.3 - 668.5] StdDev.: 105.47	
77.0 186.6 296.3 405.9 515.5 625.1 734.8 844.4 95	4.0 Overlap : 0.15	
	Mean D3 (NN) [75.7 - 106.3] StdDev.: 7.33	
42.0 56.1 70.3 84.4 98.5 112.6 126.8 140.9 15	[75.2 - 150.1] StdDev.: 15.31 5.0 Overlap : 0.19	
	Ovenap : 0:10	
	Mean b2 (NN) [198.9 - 258.2] StdDev.: 15.52	
	[161.6 - 235.0] StdDev.: 18.06	
131.0100.0 110.0 109.0 209.0 226.0 246.0 207.5 287	Mean h1 (NN)	
	[158.9 - 182.3] StdDev.: 5.79	
128.0135.6 143.3 150.9 158.5 166.1 173.8 181.4 189	[144.3 - 178.2] StdDev.: 6.52 9.0 Overlap : 0.21	

Sample Editor		x
CActive class	Compare class	7
Aspidosperma	Gallesia	
	Brightness	_
	[209.0 - 289.9] StdDev.: 23.27	
	المانية (175.9 - 257.7] StdDev.: 20.39	
101.0128.8 156.5 184.3 212.0 239.8	267.5 295.3 323.0 Overlap : 0.20	
	Mean b2 (NN)	
L. maile	14.95 [206.2 - 261.3] StdDev.: 14.95	
	[186.7 - 241.1] StdDev.: 14.10	
131.0150.5 170.0 189.5 209.0 228.5 3	248.0 267.5 287.0 Overlap : 0.15	

Funções de pertinência usadas na classificação da imagem Quickbird de Assis utilizando as imagens multiespectrais.

Sample Editor	×.
sclerolobium mabea	•
Mean [51.0 0.0 31.9 63.8 95.6 127.5 159.4 191.3 223.1 255.0 Overl.	b1 (NN) - 133.0] StdDev.: 21.05 - 90.0] StdDev.: 10.54 ap : 0.09
Mean [61.0 [63.0 0.0 31.9 63.8 95.6 127.5 159.4 191.3 223.1 255.0 Overl.	b2 (NN) - 158.0] StdDev.: 28.63 - 100.0] StdDev.: 11.10 ap : 0.11
Mean [33.0 [34.0 0.0 31.9 63.8 95.6 127.5 159.4 191.3 223.1 255.0 Overl.	b3 (NN) - 80.0] StdDev.: 12.78 - 55.0] StdDev.: 5.44 ap : 0.20
Mean [118.0 0.0 31.9 63.8 95.6 127.5 159.4 191.3 223.1 255.0 Overl.	b4 (NN) ) - 253.0] StdDev.: 43.14 ) - 255.0] StdDev.: 20.11 ap : 0.27
Sample Editor	××
Sample Editor Active class Compare cla sclerolobium	155 5 5
Sample Editor         Compare class           Active class         coutras copa           sclerolobium         outras copa           0.0         31.9         63.8         95.6         127.5         159.4         191.3         223.1         255.0         Ove	ISS S In b1 (NN) 0- 133.0] StdDev.: 21.05 0- 80.0] StdDev.: 8.52 rlap : 0.08 In b2 (NN)
Sample Editor         Compare cla           Active class         Compare cla           sclerolobium         outras copa           0.0         31.9         63.8         95.6         127.5         159.4         191.3         223.1         255.0         Ovel           Mea         [61.0]	ISS ISS S In b1 (NN) 0 - 133.0] StdDev.: 21.05 0 - 80.0] StdDev.: 8.52 rlap : 0.08 In b2 (NN) 0 - 158.0] StdDev.: 28.63 0 - 88.0] StdDev.: 11.70 rlap : 0.03
Sample Editor       Compare class         Active class       compare cla         sclerolobium       outras copa         0.0       31.9       63.8       95.6       127.5       159.4       191.3       223.1       255.0       Over         Mea       [61.0] </td <td>INSS INSS</td>	INSS INSS

Sample Editor	-×
Active class	Compare class
0.0 31.9 63.8 95.6 127.5 159.4 191.3 223	Mean b1 (NN) [54.0 - 90.0] StdDev.: 10.54 [50.0 - 80.0] StdDev.: 8.52 3.1 - 255.0 Overlap : 0.50
0.0 31.9 63.8 95.6 127.5 159.4 191.3 223	Mean b2 (NN) [63.0 - 100.0] StdDev.: 11.10 [40.0 - 88.0] StdDev.: 11.70 3.1 255.0 Overlap : 0.39
0.0 31.9 63.8 95.6 127.5 159.4 191.3 22	Mean b3 (NN) [34.0 - 55.0] StdDev.: 5.44 [21.0 - 52.0] StdDev.: 7.00 3.1 - 255.0 Overlap : 0.43
0.0 31.9 63.8 95.6 127.5 159.4 191.3 22	Mean b4 (NN) [194.0 - 255.0] StdDev.: 20.11 [105.0 - 197.0] StdDev.: 26.09 3.1 255.0 Overlap : 0.03