

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ESTIMATIVA DE PARÂMETROS ESTRUTURAIS DE ÁREAS DE
PRODUÇÃO DE EUCALIPTO ATRAVÉS DE IMAGENS DE
SATÉLITE NA REGIÃO DE BOTUCATU/SP**

BRUNA SOARES XAVIER DE BARROS

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp - Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia (Energia na Agricultura)

BOTUCATU – SP

Outubro/2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ESTIMATIVA DE PARÂMETROS ESTRUTURAIS DE ÁREAS DE
PRODUÇÃO DE EUCALIPTO ATRAVÉS DE IMAGENS DE
SATÉLITE NA REGIÃO DE BOTUCATU/SP**

BRUNA SOARES XAVIER DE BARROS

Orientador: Prof. Dr. Saulo Philipe Sebastião Guerra

Co-Orientadora: Prof^a. Dr^a. Cristina Maria Sousa Catita

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp - Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia (Energia na Agricultura)

BOTUCATU – SP

Outubro/2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Barros, Bruna Soares Xavier de, 1986-
B277e Estimativa de parâmetros estruturais de áreas de produção de eucalipto através de imagens de satélite na região de Botucatu/SP / Bruna Soares Xavier de Barros. - Botucatu : [s.n.], 2013
ix, 90 f. : ils. color., grafs., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2013
Orientador: Saulo Philipe Sebastião Guerra
Coorientador: Cristina Maria Sousa Catita
Inclui bibliografia

1. Eucalipto. 2. Inventário florestal. 3. Satélites artificiais. 4. Análise de imagens. 5. Sensoriamento remoto. I. Guerra, Saulo Philipe Sebastião. II. Catita, Cristina Maria Sousa. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “ESTIMATIVA DE PARÂMETROS ESTRUTURAIS DE ÁREAS DE
PRODUÇÃO DE EUCALIPTO ATRAVÉS DE IMAGENS DE SATÉLITE
NA REGIÃO DE BOTUCATU/SP”

ALUNA: BRUNA SOARES XAVIER DE BARROS

ORIENTADOR: PROF. DR. SAULO PHILIPÉ SEBASTIÃO GUERRA

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. SAULO PHILIPÉ SEBASTIÃO GUERRA



PROF. DR. OTAVIO YASSUO ITAME



PROF. DR. MAURO ISSAMU ISHIKAWA



PROFA. DRA. ELEN FITTIPALDI BRASILIO CARREGA



PROFA. DRA. FERNANDA LEITE RIBEIRO

Data da Realização: 10 de outubro de 2013

"Se temos de esperar, que seja para colher a semente boa que lançamos hoje no solo da vida. Se for para semear, então que seja para produzir milhões de sorrisos, de solidariedade e amizade." (Cora Coralina)

“Combati o bom combate, acabei a corrida, guardei a Fé”. (II Timóteo 4:7)

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde e oportunidade de concluir mais esta etapa;

A minha maravilhosa e abençoada família, meus pais, Sueli e Zacarias, minhas irmãs, Natália e Bárbara, pelo amor e respeito, e Cooky. Em especial ao meu pai e Professor Titular Zacarias Xavier de Barros que sempre acreditou em meu potencial e me auxiliou nesta tese através de importantes sugestões e apoio.

Ao meu orientador Professor Doutor Saulo Philipe Sebastião Guerra que me orientou desde o curso de mestrado.

Agradecimento a Professora Doutora Cristina Maria Sousa Catita da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa por aceitar a tarefa de me co-orientar, pela confiança, compartilhando seus conhecimentos sempre com boa vontade e paciência.

Ao Professor Doutor João Carlos Costa Catalão Fernandes, também professor da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, minha gratidão pela atenção, dedicação e auxílio na realização do trabalho.

A Vasco Conde pela inestimável colaboração no desenvolvimento deste projeto.

Ao Mestre em Agronomia Victor Augusto Soares Bertin e a empresa Duratex-S.A. pelos dados das fazendas de eucalipto usados na tese.

A minha colega de pós-graduação Monica Mashiki pela ajuda no início da pesquisa.

A Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Campus de Botucatu, pela infraestrutura oferecida através do Curso de Pós- Graduação Energia na Agricultura.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo auxílio financeiro dos meus estudos no Brasil e em Portugal, sem o qual não seria possível realizar este trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	IX
1 RESUMO	1
2 SUMMARY	3
3 INTRODUÇÃO	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
4.1 Uso da terra	8
4.2 Breve histórico do eucalipto	10
4.2.1 Eucalipto no centro-oeste paulista	11
4.3 Inventário florestal	12
4.4 Sensoriamento remoto e geoprocessamento	13
4.5 Utilização do sensoriamento remoto em áreas florestais	14
4.6 Radiação eletromagnética	15
4.7 Espectro eletromagnético	17
4.8 Interação da radiação eletromagnética com a matéria	17
4.9 Imagens de satélite	19
4.9.1 Landsat	19
4.9.2 Imagens digitais	21
4.10 Sistemas de Informação Geográfica	21
4.11 Processamento digital de imagens	22
4.11.1 Extração de características das imagens	24
4.11.2 Comportamento espectral da vegetação	26
4.12 Índices de vegetação e índice de vegetação por diferença normalizada	27
4.13 Classificação digital	29
4.14 Dendrometria	31
4.14.1 Volume	32
4.14.2 Área basal	34
4.14.3 Biomassa	34
4.14.4 Diâmetro	35
4.14.5 Altura	37

4.15	Análise estatística	37
4.15.1	Procedimento estatístico “Stepwise”	38
4.15.2	Modelos e análise de regressão	39
4.15.3	Análise de regressão linear múltipla	40
4.15.4	Análise de correlação entre variáveis	42
4.16	Mapeamento da vegetação	43
4.17	Manejo de plantios de eucalipto	44
5	MATERIAL E MÉTODOS	46
5.1	Descrição geral da área de estudo	46
5.2	Aquisição dos dados	47
5.3	Equipamento e programas computacionais	50
5.4	Métodos e tratamento dos dados	53
5.4.1	Escolha das imagens de satélite	54
5.4.2	Processamento e medição de características das imagens	55
5.4.3	Cálculo das variáveis biométricas da floresta	57
5.4.4	Regressão época a época	58
5.4.5	Primeira fase de verificação do método	58
5.4.6	Segunda fase de verificação do método	59
5.4.7	Regressão série temporal	60
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
6.1	Análise de regressão época a época	61
6.2	Análise de regressão série temporal	64
6.3	Análise de resultados	70
7	CONCLUSÕES	71
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 - Flutuações dos campos elétricos e magnéticos de uma onda	16
2 - Espectro visível	17
3 - Interações básicas entre a energia eletromagnética e elementos da superfície terrestre	18
4 - Representação gráfica dos possíveis ângulos de incidência sobre um alvo.....	18
5- Representação esquemática da classificação de imagens de satélite.....	25
6 - Exemplo de imagem classificada de acordo com o uso do solo	30
7 - Medição do DAP em árvores de diferentes formatos	36
8 - Exemplo da reta de regressão	41
9 - Ilustração da localização aproximada das áreas de estudo na região do município de Botucatu/SP.....	47
10 - Parcelas de reflorestamento da Fazenda Pinheiros situada entre as coordenadas 757252m-757798m/7459827m-7461880m, UTM-22S	48
11 - Parcelas de reflorestamento da Fazenda Cascata situada entre as coordenadas 756051m-758915m/7440966m-7437244m, UTM-22S	48
12 - PCI Geomatics (versão 9.1)	51
13 - Microsoft Office Excel 2007	51
14 - Idrisi Kilimanjaro	52
15 - ArcGis 10 Desktop	52
16 - R (versão 3.0.0)	53
17 - Parcelas da Fazenda Cascata sobrepostas à imagem de satélite no ArcGis	60
18 - Plano ajustado e representação dos resíduos da área na Fazenda Pinheiro à época 2008 em duas perspectivas	64
19 - Plano ajustado e representação dos resíduos da área basal na Fazenda Pinheiro em duas perspectivas	66
20 - Plano ajustado e representação dos resíduos da área basal na Fazenda Cascata em duas perspectivas	67
21 - Plano ajustado e representação dos resíduos do volume na Fazenda Pinheiro em duas perspectivas	67

22 - Plano ajustado e representação dos resíduos do volume na Fazenda Cascata em duas perspectivas	68
23 - Plano ajustado e representação dos resíduos da biomassa na Fazenda Pinheiro em duas perspectivas	68
24 - Plano ajustado e representação dos resíduos da biomassa na Fazenda Cascata em duas perspectivas	69

LISTA DE TABELAS

	Página
1 - Dados das quadras da Fazenda Pinheiro em 2010	49
2 - Dados das quadras da Fazenda Cascata em 2010	49
3 - Características das imagens selecionadas para o estudo	54
4 - Equações de volume do período estudado e valores de R^2 ajustado (Fazenda Pinheiro)	61
5 - Equações de área basal do período estudado e valores de R^2 ajustado (Fazenda Pinheiro)	62
6 - Equações de biomassa do período estudado e valores de R^2 ajustado (Fazenda Pinheiro)	62
7 - Variáveis independentes para cálculo dos parâmetros biométricos	63
8 - Valores de R^2 da Fazenda Pinheiro	63
9 - Valores de R^2 da Fazenda Cascata	63
10 - Média e desvio padrão para cada uma das variáveis (Fazenda Pinheiro)	65
11 - Média e desvio padrão para cada variável - série temporal (Fazenda Pinheiro)	65
12 - Valores de R^2 da Fazenda Pinheiro e Cascata	65

1 RESUMO

Neste estudo se utilizou imagens de satélites multiespectrais como fonte de dados para determinação de parâmetros estruturais de uma floresta de eucalipto. Baseando-se em procedimentos utilizados em outras áreas de florestas de monocultura, através de uma metodologia que otimiza a monitoração e controle de um povoamento. A utilização dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), já é realidade presente em vários setores das atividades e necessidades humanas, devido principalmente a capacidade de armazenamento de dados e a velocidade na apresentação deste nas tomadas de decisões. Neste contexto, a avaliação de áreas de cultura de eucalipto, por meio de imagens aéreas, pode tornar muito rápida e acertada as tomadas de decisões pelas áreas técnicas ligadas ao cultivo e também pela área econômica. Este trabalho teve como objetivo verificar a possibilidade de determinar parâmetros estruturais através da avaliação de uma área de povoamento de eucalipto na região do município de Botucatu/SP Brasil, utilizando-se imagens satélite LANDSAT, ferramenta SIG e técnicas de análise estatística. Para avaliações da área plantada e os cálculos necessários foram utilizados imagens digitais Landsat 5/TM adquiridas junto ao U.S. Geological Survey /Earth Resources Observation &

Science Center (EROS) e inventário florestal para análise de dados em campo. A verificação do método desenvolvido procedeu-se através da caracterização das estruturas da cultura; a partir da integração da imagem Landsat 5/TM e dos dados de campo, foram feitos procedimentos estatísticos correlacionando o grau de dependência linear entre as variáveis biométricas e digitais, obtidas pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e reflectância para a determinação da área basal, do volume e da biomassa, por regressão linear múltipla. Fez-se uso dos programas computacionais: PCI Geomatics (versão 9.1); Microsoft Office Excel 2007; Idrisi Kilimanjaro; ArcGis 10 Desktop e R (versão 3.0.0). Os efeitos atmosféricos e a pouca variabilidade radiométrica da área se apresentaram como as principais limitações do estudo. Após a análise dos modelos com melhor ajuste estatístico obtidos através da regressão série temporal, concluiu-se que, para o mesmo tipo de cultura, a estimativa de alguns parâmetros biométricos com emprego de dados orbitais associados aos de campo foi eficiente.

Palavras-chave: Imagens de Satélite, Inventário Florestal, Parâmetros Biofísicos, Análise Estatística.

INVENTORY OF EUCALYPTUS PRODUCTION AREAS THROUGH AERIAL IMAGES, LANDSAT AND GOOGLE, IN BOTUCATU / SP.

Botucatu, 2013. 101 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: BRUNA SOARES XAVIER DE BARROS

Adviser: PROF. DR. SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA

Co-Adviser: PROF.^a DR.^a CRISTINA MARIA SOUSA CATITA

2 SUMMARY

This work utilized multispectral satellite images as source of data for determination of structural parameters of an eucalyptus forest, based on procedures used in other areas of monoculture forests, through a methodology that optimizes the monitoring and control of a stand. The use of Geographic Information Systems (GIS) is already a reality in many sectors of human activities and needs, mainly due to storage capacity and data speed in delivering this in decision making. This work aimed at verifying the possibility to determine structural parameters by evaluating an area of eucalyptus plantation in Botucatu / SP Brazil, using Landsat satellite images, GIS tool, and statistical analysis techniques. For reviews of the planted area and the necessary calculations Landsat 5/TM digital images acquired from the U.S. Geological Survey / Earth Resources Observation & Science Center (EROS) were used, as well as forest inventory data for analysis in the field. The verification of the developed method proceeded through the characterization of the structures of culture, from the integration Landsat 5/TM image and field data, statistical procedures were done correlating the degree of linear dependence among variables and biometric digital, obtained by Index Normalized Difference Vegetation and reflectance for determination of the basal area, volume and biomass, by multiple linear regression. Using softwares: PCI Geomatics (version 9.1), Microsoft Office Excel 2007; Idrisi Kilimanjaro; ArcGis 10 Desktop and R (version 3.0.0). Atmospheric effects and little radiometric variability of the area are presented as the main limitations of the study. After analyzing the statistical model with the best fit regression obtained from

the time series, it was concluded that for the same type of crop, estimation of some biometric parameters using satellite data associated to field data was efficient.

Keywords: Satellite Images, Forest Inventory, Biophysical Parameters, Statistical Analysis

3 INTRODUÇÃO

O setor madeireiro no Brasil, voltado para a produção de papel e chapas de celulose tornou-se um dos mais importantes no mundo, competindo com o Canadá, a Suécia, o Chile, a Rússia, os Estados Unidos, entre outros países produtores destes derivados da madeira. Fato este que teve como consequência a expansão do reflorestamento no nosso país principalmente pelo eucalipto, que em 1904 quando aportou no nosso solo tinha como finalidade primária a produção de dormentes, postes e energia na forma de lenha.

Nas décadas de 60 e 70 esta espécie exótica teve grande avanço em áreas cultivadas devido principalmente aos incentivos fiscais fato que permaneceu ativo até a década de 1980. Foi um tempo de grande expansão e como consequência a substituição de vastas áreas antes ocupadas por coberturas vegetais nativas importantes do tipo cerrado.

No Estado de São Paulo este incentivo fiscal teve forte reflexo nas mudanças de cultivo de vastas regiões principalmente nos municípios de Botucatu, Lençóis Paulista, Agudos e boa parte do município de Bauru, entre outros pequenos municípios desta grande região antes ocupadas por vegetação de cerrado. Esta ocupação apresentou-se

tão forte que no início de 2008 foi aprovada a Lei Estadual 12.807, segundo esta lei, toda vegetação de cerrado deve ser poupada de qualquer tipo de desmatamento, podendo seus infratores sofrer as penalidades inerentes.

As terras do município de Botucatu apresentam grande aptidão para o bom desenvolvimento desta cultura, uma vez que, grande área do município apresenta solo tipo arenoso, de grande profundidade, propiciando assim um ótimo desenvolvimento para o sistema radicular desta cultura.

Cultura muito importante do ponto de vista econômico e social para esta região e também para o Brasil, uma vez que o mercado interno e externo consome com grande intensidade os produtos derivados desta madeira aqui produzida, gerando com isso muitos empregos diretos e indiretos.

A avaliação do reflorestamento, com base em inventários de áreas e também de volume de madeira de uma região de interesse, torna-se importante ferramenta para o planejamento de novos investimentos na expansão ou mesmo na melhoria dos tratos culturais de uma área pré-existente devido a detecção de baixa produtividade em relação às áreas próximas ou de outros setores da propriedade como um todo.

O município de Botucatu desde a década de 60 vem sendo submetido a uma forte ocupação de seu território, não só pelo cultivo do eucalipto como também pela expansão da cultura canvieira, na década de 80, e mais recentemente, década de 90, pelo aumento significativo das áreas plantadas com *citrus* notadamente a laranja para exportação de suco.

A utilização dos Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), já é realidade presente em vários setores das atividades e necessidades humanas, devido principalmente a capacidade de armazenamento de dados e a velocidade na apresentação deste nas tomadas de decisões. O emprego dos SIG para o estudo da ocupação do solo nos dias de hoje tornou-se evidente, principalmente pelo rápido fornecimento de resultados, tornando-se assim um instrumento necessário para o estudo que será levado à efeito neste projeto.

Neste contexto, a avaliação de áreas e volumes de florestas implantadas com eucalipto, por meio de imagens aéreas, orbitais e não orbitais, pode tornar muito rápida e acertada as tomadas de decisões pelas áreas técnicas ligadas ao cultivo e também pela área econômica da empresa para definir novos investimentos em determinados setores ou até mesmo determinados talhões dentro de uma grande área.

Este trabalho tem como objetivo verificar a possibilidade de determinar volume de madeira, área basal e biomassa através da avaliação de uma área de plantação de eucalipto, utilizando-se imagens satélite LANDSAT e ferramenta SIG, na região de Botucatu/SP.

O texto está dividido em: Introdução, Revisão bibliográfica, Material e métodos, Resultados e discussão, e Conclusões. Após esta Introdução, o seguinte tópico é composto por uma revisão de literatura dos assuntos abrangidos pelo trabalho, assim como aborda trabalhos que fizeram uso de técnicas semelhantes. O Material e métodos trata dos equipamentos, dados, programas de computador e procedimentos utilizados para desenvolvimento do método. O item Resultados e discussão aborda a aplicação do mesmo com seus resultados e comentários. Por fim, no tópico Conclusões, a conclusão e contribuições do estudo.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Uso da terra

É sabido que na busca de extrair da natureza os meios para seu sustento e desenvolvimento, o homem tem provocado intensa degradação ambiental (REIS, 1999). As pressões antrópicas sobre os ecossistemas têm causado intenso processo de substituição de paisagens naturais por outros tipos de usos da terra, convertendo extensas áreas de florestas contínuas em fragmentos florestais (OLIVEIRA et al., 1997; VIANA e PINHEIRO, 1998; VALENTE e VETTORAZZI, 2002). Essa degradação tem seus efeitos em diversas esferas da sociedade, constituindo verdadeiro desafio para governo, sociedade civil e setor privado gerenciar o uso dos recursos naturais de forma a conciliar desenvolvimento e produção com conservação ambiental (BECKER et al., 2007).

No caso específico das empresas florestais, que mantêm atividades de reflorestamento de *pinus* e eucalipto para abastecimento de madeira de seus diversos processos produtivos, a busca pela melhoria ambiental de suas práticas de manejo florestal é um processo contínuo, crescente e progressivo decorrente, em parte, das pressões dos

vários setores da sociedade civil, no que tange aos prejuízos ambientais causados por tal atividade, e em parte dos processos de certificação florestal (NARDELLI et al., 2003; JACOVINE et al., 2006).

No contexto florestal há diferentes parâmetros estruturais que podem ser medidos de maneira quantitativa. Dentre os principais parâmetros estão: diâmetro na altura do peito (DAP), altura, diâmetro e área da copa, os quais podem fornecer informações importantes sobre biomassa, ciclagem de carbono, equilíbrio de energia, processos hidrológicos e detecção de mudanças climáticas no ecossistema. (XIMENES e AMARAL, 2010).

O setor florestal brasileiro encontra-se em franco crescimento, evidenciado pelo aumento do potencial fabril, com instalações de novas capacidades produtivas em diferentes regiões brasileiras, bem como pelo aumento da base florestal. Segundo dados da Sociedade Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2008), somente os investimentos do setor de celulose e papel, nos últimos 10 anos, foram da ordem de US\$ 12 bilhões.

Diante dessa rápida mudança se faz necessário o estudo da capacidade de uso da terra é a sua adaptabilidade para fins diversos, sem que sofra depauperamento pelos fatores de desgaste e empobrecimento, sendo considerada por Lepsch (1991) como uma poderosa ferramenta utilizável no seu planejamento e uso. Pela classificação da capacidade de uso, a terra tem definida a sua possibilidade de ser utilizada para culturas anuais, culturas perenes, pastagens, reflorestamento ou vida silvestre, sem sofrer danos consideráveis. Essa capacidade de uso da terra é classificada por meio de um sistema que leva em conta o clima, a intensidade do uso, os fatores limitantes, as características e propriedades físicas do solo, os impedimentos à motomecanização e as condições de infra-estrutura (LEPSCH, 1991). A capacidade de uso da terra tem por finalidade fornecer importante subsídio para o planejamento, funcionando como uma ferramenta que imprime um caráter seletivo, racionalizador e de orientação ao uso das terras.

O conhecimento dos padrões de uso e cobertura da terra de uma região é muito importante para apontar a tipologia de manejo aplicado e identificar problemas ambientais que se configuram em decorrência desse uso. Entende-se por uso e cobertura da terra toda tipologia de atividade produtiva, não produtiva e a cobertura da terra de uma determinada área, que refletem diretamente a forma pela qual os recursos do

espaço geográfico estão sendo apropriados por diferentes interesses econômicos, sociais, políticos e ecológicos (GUERRA et al., 2008).

A caracterização do uso e cobertura da terra trás uma infinidade de informações sobre o espaço em questão, as quais devem ser avaliadas, integradas e armazenadas. O geoprocessamento é uma tecnologia utilizada para integrar várias ferramentas, dados e programas (ROCHA, 2000). O levantamento do uso atual da terra, necessário para fins de planejamento, pode ser obtido a partir da utilização de dados multiespectrais, fornecidos por satélites de Sensoriamento Remoto, associados às técnicas de interpretação (PEREIRA et al., 1989).

4.2 Breve histórico do eucalipto

O eucalipto foi introduzido no Brasil, em 1904 com o objetivo de suprir necessidades de lenha, postes e dormentes das estradas de ferro, na região Sudeste. Na década de cinquenta, passou a ser usado como matéria prima no abastecimento das fábricas de papel e celulose. Apresentam-se como uma espécie vegetal de rápido crescimento e adaptada as situações edafo-bio-climáticas brasileira (DOSSA, 2002).

Durante o período dos incentivos fiscais, na década de 60, sua expansão foi acentuada. Esses incentivos perduraram até meados dos anos 80, período este considerado um marco na silvicultura brasileira devido aos efeitos positivos que gerou no setor (EMBRAPA, 2003).

Preocupadas em atender a demanda por sementes melhoradas e conhecer melhor as espécies/procedências, em 1968 algumas empresas florestais privadas criaram o IPEF (Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais), sediado na ESALQ/USP. No final da década de 1960, a silvicultura do eucalipto expandiu-se para outras regiões. Esse fato impulsionou os estudos de propagação vegetativa e em 1979 foi instalada a primeira plantação comercial via propagação vegetativa, de cerca de 1.000 ha, em Aracruz, ES. O período de 1980 a 1995 caracterizou-se por grande ênfase à propagação clonal, onde os híbridos interespecíficos *E. grandis* x *E. urophylla* passaram a receber atenção especial. Neste período, em que todos os esforços foram dedicados à estaquia, as empresas buscaram adaptar seus genótipos às novas regiões geográficas (CARVALHO e GERALDI, 2012).

Segundo o mesmo autor, atualmente no Brasil milhões de empregos diretos e indiretos são gerados devido à cultura do eucalipto. Sua importância é tamanha que o Ministério de Ciência e Tecnologia, junto com doze empresas privadas, sete universidades e a Embrapa, iniciaram o Genoma do Eucalipto, ou Genolyptus. Além desse projeto, merece destaque o ForESTs, que é um consórcio entre a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e as empresas de papel e celulose, Fibria, Suzano e Duratex, para o sequenciamento do genoma e posterior análise funcional dos genes.

4.2.1 Eucalipto no centro-oeste paulista

As espécies de *Eucalyptus* mais plantadas são o *E. grandis*, *E. saligna*, *E. urophylla* e *E. citriodora*. Consideradas como *E. spp* as áreas em que espécies não foram identificadas e como outras espécies, aquelas devidamente identificadas, porém não significativas (*E. maculata*, *E. robusta*, *E. tereticornis* e *E. pilularis*). As maiores áreas com plantio de *Eucalyptus* encontram-se nas regiões de Sorocaba com *E. saligna* e *E. grandis*; Campinas com *E. grandis* e *E. citriodora*; Bauru com *E. grandis* e *E. urophylla*; Ribeirão Preto com *E. urophylla* e *E. citriodora*; Litoral com *E. urophylla* e, Vale do Paraíba com *E. grandis*, (ABRAF, 2008).

A produtividade do eucalipto, dado o seu rápido crescimento, pode ser considerada como um dos principais fatores que determinaram sua expansão no mercado de papel e celulose e, também, para serraria. Embora a produtividade média anual, considerada em torno de quarenta e cinco metros cúbicos por hectare, seja relativamente baixa, existe plantios com uso de eucaliptos melhor adaptados, com uso de boa tecnologia que atingem rendimentos próximos a sessenta metros cúbicos por hectare ao ano (DOSSA, 2002).

Uma discussão sobre custos de produção e fluxo de caixa para a cultura do eucalipto pode ser encontrada em trabalhos desenvolvidos pelos pesquisadores da Embrapa Florestas como Oliveira (1995), Rodigheri (1996) e Dossa (1998). Esses pesquisadores mostram os benefícios econômicos e financeiros de algumas espécies florestais. Para isso efetuaram levantamentos de sistemas de produção envolvendo eucaliptos, realizando estimativas para mostrar ao setor que os produtores podem aumentar a renda familiar através do plantio de eucaliptos.

4.3 Inventário florestal

O inventário florestal é a base para o planejamento do uso dos recursos florestais, através dele é possível a caracterização de uma determinada área e o conhecimento quantitativo e qualitativo das espécies que a compõe. Os objetivos do inventário são estabelecidos de acordo com a utilização da área, que pode ser área de reserva florestal, área de manutenção da vida silvestre, áreas de reflorestamento comercial, entre outros (CONFLOR, 2012).

No caso das florestas com fins madeireiros, por exemplo, o inventário florestal visa principalmente à determinação ou a estimativa de variáveis como peso, área basal, volume, qualidade do fuste, estado fitossanitário, classe de copa e potencial de crescimento da espécie florestal. Segundo o mesmo autor, o inventário pode ser classificado quanto à abrangência: nacional, regional ou de áreas restritas.

Com a evolução tecnológica e a crescente necessidade de melhorar a qualidade das informações a serem incorporados aos projetos de manejo florestal, os inventários florestais diversificaram as suas estratégias de coletas de dados que já não se limitam a simples quantificação de volume de madeira total ou por espécie de determinada área. Os inventários florestais reúnem técnicas de coleta de dados dos recursos florestais de determinada área, visando fornecer informações qualitativas e quantitativas, ou seja, o que tem e quanto tem, e outros aspectos e são importantes ferramentas utilizadas no diagnóstico do potencial produtivo ou protetivo de florestas. É através dos resultados dos inventários florestais que se apóiam decisões importantes acerca da viabilidade de empreendimentos florestais (CUNHA, 2004).

Os inventários florestais devem ser executados periodicamente para permitir ao proprietário ou ao gerente florestal a planificação das atividades em função das mudanças ocorridas em determinados períodos de tempo considerado. Avaliar o crescimento, as mudanças ocorridas após a exploração florestal, planejar a produção e os tratamentos silviculturais visando o equilíbrio e a recuperação das florestas, exigem trabalhos de campo com inventários florestais (CUNHA, 2004).

No caso do eucalipto, o inventário florestal deve ser iniciado quando o plantio estiver entre 1,5 a 2 anos de idade e depois ser realizado anualmente. O resultado dessas medições será expresso como Incremento Médio Anual (IMA),

apresentando o resultado em m³/ha /ano, ou seja, o crescimento em volume de madeira por área por ano.

4.4 Sensoriamento remoto e geoprocessamento

Num país de dimensão continental como o Brasil, com uma grande carência de informações adequadas para a tomada de decisões sobre os problemas urbanos, rurais e ambientais, o geoprocessamento apresenta um enorme potencial, principalmente se baseado em tecnologias de custo relativamente baixo, em que o conhecimento seja adquirido localmente (CÂMARA et al., 2004).

O uso de geoprocessamento tem-se tornado cada vez mais frequente para os estudos de impacto ambiental e planejamento regional. O termo geoprocessamento refere-se a um conjunto de procedimentos, geralmente de natureza computacional, utilizados para a coleta e tratamento de informações espaciais. Dados digitais de diversas fontes podem ser organizados em planos de informação, segundo representações vetoriais, poligonais ou matriciais, que ao serem integrados com auxílio de procedimentos lógicos e matemáticos, produzem novas informações, de utilidade para a tomada de decisões (MEGIATO, 2007).

O sensoriamento remoto e o geoprocessamento constituem-se em técnicas fundamentais para a manutenção de registros do uso da terra ao longo do tempo. As imagens de satélite, em forma digital ou papel, são muito importantes e úteis, pois permite avaliar as mudanças ocorridas na paisagem de uma região e num dado período, registrando a cobertura vegetal em cada momento (CAMPOS et al., 2004).

Segundo Assad e Sano (1998) o geoprocessamento é uma área do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o manuseio de informações geográficas. Seu campo de aplicação é amplo, sendo utilizado na cartografia, na análise espacial de recursos naturais, no planejamento urbano - regional e também nos estudos de bacias hidrográficas (BONHAM-CARTER, 1994; ROCHA, 2000). Os instrumentos computacionais, ou seja, o conjunto de softwares e hardwares relacionados ao geoprocessamento são conhecidos como Sistemas de Informação Geográfica – SIGs.

As vantagens de utilizar dados de sensoriamento remoto nos levantamentos do uso atual das terras são atingir grandes áreas de difícil acesso, fazer o imageamento de grande altitude, possibilitando uma visão sinóptica da superfície terrestre,

com repetitividade, viabilizando o monitoramento de grandes áreas (FREITAS FILHO & MEDEIROS, 1993).

4.5 Utilização do sensoriamento remoto em áreas florestais

O uso de técnicas de sensoriamento remoto em áreas florestais é cada vez mais frequente. Vários são os trabalhos realizados, com destaque para uma das técnicas utilizadas com assiduidade no monitoramento da cobertura florestal, que é a análise multitemporal de observações sensoriadas (FOODY et al., 1996; LUCAS et al., 2002)

No Brasil, vários autores já empregaram análise multitemporal de observações sensoriadas, como por exemplo, (SKOLE, 1993), em um estudo da evolução temporal do desmatamento ocorrido na Floresta Amazônica. Também para essa mesma floresta, (MAUSEL, 1993), estudou as diferentes fases ocorridas durante o processo de desmatamento. O uso de técnicas de sensoriamento remoto por radar é empregado por Thiel et al., (2006), que avaliou o potencial do Japanese Earth Resource Satellite (JERS)-1 no mapeamento da cobertura florestal. Saatchi et al., (2001), examinou a fragmentação florestal por meio de técnicas de interferometria ocorrida na vegetação de Mata Atlântica na porção Sudeste do Estado da Bahia, Brasil.

As imagens obtidas por sensores a bordo de satélites orbitais têm demonstrado um grande potencial para monitorar ou detectar mudanças na cobertura florestal sobre grandes áreas geográficas (SOUZA, 2007). Algoritmos de detecção de mudanças têm sido desenvolvidos, sendo que a técnica da razão de bandas tem se destacado devido à sua simplicidade de implementação e eficiência (MUCHONEY & HAACK, 1994). Soares et al. (1998) utilizaram seis bandas do sensor TM/Landsat-5, obtidas em 1989 e 1992, para avaliar mudanças em plantações de eucaliptos e outras coberturas terrestres localizadas no Vale do Rio Doce, Estado de Minas Gerais. A técnica da razão entre bandas foi utilizada, e os resultados, avaliados qualitativa e quantitativamente, indicaram que todas as seis imagens transformadas pela razão entre bandas foram efetivas na avaliação de mudanças das coberturas terrestres estudadas.

Bolfe et al. (2003) levantaram os povoamentos florestais a partir de técnicas de classificação digital supervisionada, pelo método de máxima verossimilhança, no qual o algoritmo de classificação consiste num princípio estatístico paramétrico,

considerando as classes envolvidas numa função densidade de probabilidade gaussiana. Tais classes temáticas foram estabelecidas em função dos temas de interesse: florestas implantadas de *Pinus sp.*, *Eucalyptus sp.* e florestas nativas (florestas primárias, florestas secundárias, matas de galeria e capoeiras).

Em Ducati et al. (1999), foi mostrado como as espécies de árvores *Araucaria angustifolia*, *Eucalyptus sp.* e *Pinus elliottii* apresentam reflectâncias diferentes, nas bandas Landsat. Para tanto, foi usada a sensibilidade diferencial do sensor que opera o Thematic Mapper a bordo do satélite Landsat-5, com respeito às reflectâncias de várias espécies vegetais que compõem as cenas imageadas. A partir disto, foi possível separar estas espécies e quantificar as áreas ocupadas por cada uma.

Santiago (1988) aplicou uma metodologia de sensoriamento remoto na caracterização espectral da seca de ponteiros do eucalipto do Vale do Rio Doce, no Estado de Minas Gerais. Nesse trabalho, dados espectro-radiométricos, fotografias aéreas 35mm colorido normal e infravermelho colorido e dados orbitais TM/Landsat foram utilizados para tal caracterização. Diferenças espectrais significantes entre as amostras afetadas e não-afetadas foram verificadas através desta análise espectro-radiométrica. Segundo o autor, a metodologia foi eficiente na identificação da seca de ponteiros em áreas planas; porém, a aplicação desta metodologia em áreas de relevo acidentado não obteve resultados satisfatórios.

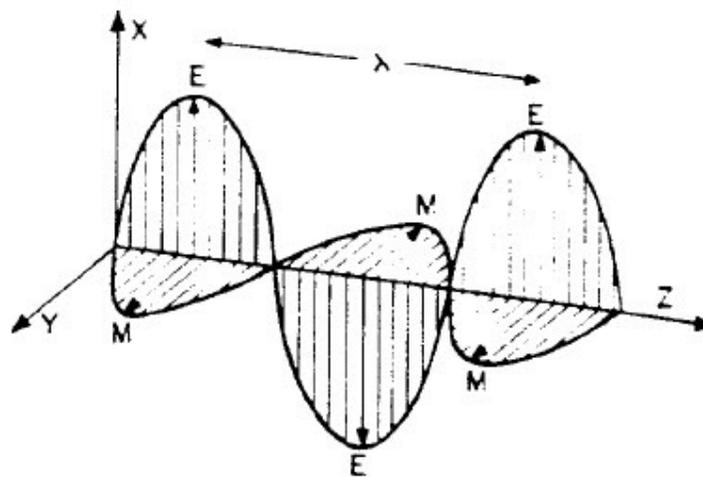
Soares e Hoffer (1996) utilizaram imagens TM/Landsat para monitorar mudanças em plantações de *Eucalyptus*, através da diferença entre bandas, de imagens obtidas em épocas diferentes. Skidmore (1989) desenvolveu um sistema especialista para classificar tipos de florestas de *Eucalyptus*. Além dos dados do mapeador temático do Landsat, o sistema incorporou informações derivadas do modelo digital de elevação, declividade e orientação, e o conhecimento de campo do responsável pela área para estabelecer as regras norteadoras do processo de classificação.

4.6 Radiação eletromagnética

O sensoriamento remoto é a aquisição de informação sobre um determinado objeto sem haver contato direto, utilizando a radiação eletromagnética para esse fim. A radiação eletromagnética usada no sensoriamento remoto, em particular a radiação visível, infravermelho e rádio, pode ser descrita por ondas (SCHANDA, 1986).

A radiação eletromagnética é uma oscilação, em fase, dos campos elétricos e magnéticos que são perpendiculares entre si e podem ser entendidos como a propagação de uma onda transversal (MOURA, 2011). No âmbito deste conceito ondulatório em aplicações de sensoriamento remoto, ocorrem os mais importantes fenômenos de interação com o meio. Porém, segundo a teoria quântica, a radiação eletromagnética pode também ser caracterizada como uma propagação de partículas, quantum. Segundo esta teoria a energia transportada é proporcional à frequência.

As ondas eletromagnéticas (Figura 1) são ondas formadas pela combinação dos campos magnético e elétrico que se propagam no espaço perpendicularmente um em relação ao outro e na direção de propagação da energia (NOVO, 1989).



E = campo elétrico;

M = campo magnético;

XZ = plano de excitação do campo elétrico;

YZ = plano de excitação do campo magnético;

Z = direção de propagação da onda eletromagnética;

λ = comprimento de onda.

Figura 1 - Flutuações dos campos elétricos e magnéticos de uma onda

Fonte: Novo (1989)

Maxwell desenvolveu uma formulação matemática do processo elétrico e magnético que explica diversas teorias, fornecendo também uma base lógica de

predição da possível existência da forma dinâmica do fenômeno elétrico e magnético, a radiação eletromagnética na forma de movimento de onda no espaço. Considerando a radiação eletromagnética na escala macro, a interação da matéria depende das propriedades elétricas e magnéticas da matéria. Este conceito foi expresso matematicamente como um conjunto de equações diferenciais que exprimem e quantificam as interrelações dos campos elétricos e magnéticos. Os campos eletromagnéticos: o campo elétrico, o campo de deslocamento, o campo magnético e a indução magnética, são regidos pelas equações de Maxwell (MÄTZLER, 2008).

4.7 Espectro eletromagnético

Espectro eletromagnético é o intervalo completo da radiação eletromagnética, que contém desde as ondas de rádio, as microondas, o infravermelho, a luz visível, os raios ultravioleta, os raios X, até a radiação gama (JARDIM, 2007). O espectro eletromagnético apresenta diferentes unidades devido à sua extensão.

No caso da região do visível as cores estão distribuídas segundo a figura 2. As faixas mais comumente exploradas para fins de sensoriamento remoto dos recursos naturais são: visível, infravermelho próximo, infravermelho médio e microondas (KUNTSCHIK, 2004).



Figura 2 - Espectro visível

Fonte: Jardim (2007)

4.8 Interação da radiação eletromagnética com a matéria

Um determinado fluxo radiante atinge uma superfície reagindo em três fenômenos (Figura 3): reflexão (reenvio para o espaço de parte da radiação incidente), transmissão (a radiação atravessa o objeto sem interagir com as suas partículas) e absorção

(trocas de energia entre quantum e os átomos que constituem o objeto) (FONSECA e FERNANDES, 2004).

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda)$$

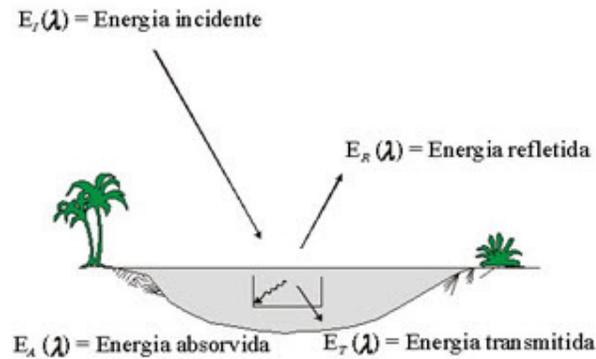


Figura 3 - Interações básicas entre a energia eletromagnética e elementos da superfície terrestre

Fonte: Fonseca e Fernandes (2004)

Estes fenômenos são dependentes das características físico-químicas do próprio objeto, que definem as intensidades de reflexão, transmissão e absorção da radiação eletromagnética em cada comprimento de onda incidente no objeto (Figura 4).

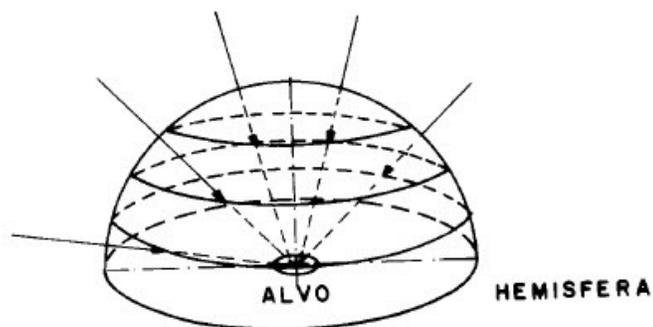


Figura 4 - Representação gráfica dos possíveis ângulos de incidência sobre um alvo

Fonte: Ponzoni e Disperati (1995)

Define-se como reflectância a razão entre a energia radiante refletida e a energia radiante incidente. É através da reflectância que são estudadas as

características intrínsecas dos objetos em refletir a radiação eletromagnética incidente pois a mesma depende das suas propriedades físico-químicas.

O estudo do sensoriamento remoto faz-se mais eficiente através da interpretação das características espectrais dos elementos e dos fatores que influenciam estas características. A escolha das bandas do espectro eletromagnético para um estudo específico é referente à configuração das curvas de reflectância espectral. Segundo o mesmo autor, com base nas características espectrais, diversos elementos de interesse na superfície terrestre podem ser identificados, mapeados e analisados. Vale salientar que a atmosfera é um dos elementos que mais influencia a reflectância espectral recebida pelo sensor espacial.

4.9 Imagens de satélite

Imagem de satélite é um arquivo de imagem obtido por sensoriamento remoto a partir de um satélite artificial. Esse processo poderia ser explicado de maneira simplista como a obtenção de uma fotografia da Terra de uma máquina localizada no espaço dentro de um satélite. Atualmente satélites imagiadores usam máquinas digitais, assim é possível receber os arquivos na Terra por meio de sinais eletromagnéticos que são tratados em estações receptoras (REICHHARDT, 2006).

Santos et al. (1993) comentam que o uso de imagens de satélite como base cartográfica é muito promissor, devido ao seu relativo baixo custo, fácil aquisição, periodicidade de aquisição e fornecimento de importantes informações sobre mudanças no uso da terra.

Uma única imagem de satélite possui dados de uma grande extensão da superfície terrestre, têm um período de revisita curto e a aquisição para uma mesma localização é feita à mesma hora solar, garantindo as mesmas condições de iluminação, razão pela qual faz-se da utilização de imagens um facilitador.

O artigo de Maciel et al. (2009), publicado na Revista de Ciências Agrárias, Belém, intitulado: o uso de imagens orbitais na estimativa de parâmetros estruturais de uma floresta primária no município de Paragominas, estado do Pará, mostra como é possível utilizar, a partir de modelos de regressão, imagens de satélite para a estimação de parâmetros estruturais de uma floresta primária.

4.9.1 Landsat

O nome inicial da série foi Earth Resources Technology Satellite - ERST sendo mais tarde rebatizada LANDSAT, combinação da palavra Land, que significa Terra em inglês e a abreviação Sat de Satellite. O Landsat foi construído a partir da plataforma de um satélite meteorológico pretérito, o NIMBUS. Os primeiros satélites foram utilizados durante a década de setenta e apresentavam uma resolução espacial de 79 metros para as 4 bandas no visível - infravermelho próximo e de 240 metros para a banda no infravermelho térmico. Carregava dois tipos de sensores, o Multispectral Scanner Subsystem - MSS e um sistema de varredura constituído por três câmeras de televisão, o Return Beam Vidicom – RBV. Nos satélites Landsat 4 e 5 houve mudanças, sendo adicionado um novo sensor, o Thematic Mapper - TM e retirado o sistema RVB. Houve um aprimoramento na resolução espacial, alcançando 30 metros para as bandas do visível – infravermelho e 120 metros para o infravermelho térmico. Quanto ao tamanho das cenas, não houve nenhuma alteração em relação ao MSS, continuaram a serem áreas quadradas de 185 quilômetros de lado (JENSEN, 1996).

O satélite Landsat-5 continua em operação há mais de vinte anos, superando as expectativas de seus construtores. Após ele, já foram lançados dois novos satélites do programa, o Landsat 6, em 1993, que não entrou em operação por problemas técnicos e o Landsat 7, lançado em 1999, com modificações técnicas e desativado em 2003. Foi incorporado o sensor Enhanced Thematic Mapper Plus – ETM+ que, comparando com o sensor TM, adicionou uma banda pancromática com 15 metros de resolução e uma réplica da banda do infravermelho termal com ganância diferenciada e resolução de 60 metros (NASA, 2007).

Lançado em 01 março de 1984, o quinto satélite do programa Landsat, possui como objetivo principal fornecer um repositório global de fotos por satélite. O Programa Landsat é gerenciado pelo USGS (U.S. Geological Survey), e os dados do Landsat-5 são recolhidos e distribuídos a partir do USGS Center for Earth Resources Observation e Ciência. Com uma largura de banda máxima de transmissão de 85 Mbit/s. Foi implantado em uma altitude de 705,3 km (438,3 mi). Demora cerca de 16 dias para digitalizar toda a Terra . O satélite é uma cópia idêntica do Landsat 4 e foi originalmente concebido como uma cópia de segurança (NASA, 2007).

Sensores TM/TM+ do satélite Landsat (WU et al., 2004; VILELA et al., 2005) são utilizados em muitos trabalhos que têm florestas como alvo (XAVIER, 1998; KUOKAL, 2004; SOUSA, 1997).

4.9.2 Imagens digitais

Nas imagens obtidas por câmeras instaladas em satélites ficam registradas as intensidades de radiação eletromagnética refletida e emitida pelos objetos imageados em diferentes intervalos de comprimento de onda, ou bandas. Uma imagem em tons de cinza é adquirida para cada banda. O conjunto de imagens adquiridas em várias bandas forma uma imagem multiespectral, que amostra as assinaturas espectrais de cada elemento ou região da área estudada, possibilitando que estes sejam identificados (FLORENZANO, 2002).

As imagens de sensores remotos, por sua natureza digital, são constituídas por um arranjo de elementos conhecidos como *pixels*, distribuídos na forma de uma malha ou grade, cada um com a sua localização definida por um sistema de coordenadas cartesianas, e cujo conteúdo é um atributo numérico também chamado de número digital, que indica o nível de cinza dessa célula. O número digital representa a intensidade da energia eletromagnética refletida ou emitida pelos objetos e medida pelo sensor na região da superfície terrestre mapeada pelo *pixel* (CRÓSTA, 1992).

Os números digitais são registrados como uma sequência de dígitos binários conhecidos como *bits*. O número de *bits* determina o número de valores de brilho em uma imagem digital, ou seja, sua resolução radiométrica. Quanto maior é a resolução radiométrica, maior é o poder de contraste e de discriminação das imagens (CAMPBELL, 1996).

4.10 Sistemas de Informação Geográfica

O uso e controle dos recursos naturais devem depender efetivamente de instrumentos fundamentais de gestão. Neste contexto, torna-se fundamental nos dias atuais a aplicação de geotecnologias em estudos ambientais. (SOARES et al., 2007).

Segundo Freitas Filho (2004) a constante evolução dos Sistemas de Informação Geográfica - SIG, com funções cada vez mais avançadas, tem disponibilizado aos estudos ambientais técnicas cada vez mais ágeis e precisas. O homem passou então a ter a sua disposição tecnologias as quais vêm oferecendo um grande avanço nas ciências cartográficas. Tarefas antes executadas manualmente, hoje são elaboradas de forma digital. Com isto passou-se a ter mapas com mais detalhes, precisão cartográfica e qualidade, elaborados em um espaço de tempo muito inferior em relação às técnicas tradicionais de mapeamento.

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) utilizam banco de dados geográficos, os quais além de ter a capacidade de armazenar inúmeras informações a respeito do atributo que está sendo utilizadas, como informações alfanuméricas, permitem também a armazenagem de dados referentes à localização do objeto (ASSAD; SANO, 1998).

Para Fatorgis (2007), um SIG é composto por cinco componentes principais: *hardware*, *software*, dados, recursos humanos e metodologia, onde o mais importante é o profissional, pois ele será o responsável pela implementação e uso do SIG. De acordo com Câmara et al. (2002), interface com usuário; entrada e integração de dados; funções de processamento gráfico e de imagens; visualização de plotagem; armazenamento e recuperação de dados (organizados sob a forma de um banco de dados geográficos) são os componentes de um SIG.

Um Sistema de Informação Geográfica é constituído por um conjunto de módulos computacionais destinados à aquisição, armazenamento, recuperação, transformação e saída de dados espacialmente distribuídos. Estes dados geográficos descrevem objetos do mundo real sob três aspectos: (a) seu posicionamento com relação a um sistema de coordenadas; (b) seus atributos, e (c) as relações topológicas existentes. Deste modo, é possível trabalhar com dados dos quais se conhecem a posição geográfica, o valor da característica naquele ponto e a sua estrutura de relacionamento espacial, tais como: vizinhança, proximidade e pertinência entre objetos geográficos. Por isso, um SIG pode ser utilizado em estudos relativos ao meio ambiente, na pesquisa da previsão de determinados fenômenos ou no apoio a decisões de planejamento, considerando a concepção de que os dados armazenados representam um modelo real (BURROUGH, 1986). Alguns exemplos de utilização de SIG (FORMAGGIO et al., 1992; ASSAD, 1995) demonstram sua viabilidade para estudos de problemas ambientais.

4.11 Processamento digital de imagens

Por processamento digital de imagens (PDI) entende-se a manipulação de uma imagem por computador de modo que a entrada e a saída do processo sejam imagens. O objetivo de se usar processamento digital de imagens é melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais para o analista humano e fornecer outros subsídios para a sua interpretação, inclusive gerando produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos (CAMARA et al., 1996).

As imagens geradas pelos sensores remotos são constituídas por um conjunto de elementos de cena (*pixels*) dispostos na forma de matriz. Cada elemento poder ser localizado dentro de um sistema de referenciamento do tipo linha e coluna. Cada *pixel* possui um valor associado (nível de cinza) que representa a intensidade de energia eletromagnética proveniente de um elemento de resolução do terreno (MATHER, 1999).

Segundo Coura (2006), entende-se por processamento digital de imagens a manipulação de uma imagem por um programa de computador, de modo que na entrada e saída do processo se tenha imagens diferenciadas em algum aspecto em questão, onde o objetivo principal é melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais para o analista humano e fornecer outros subsídios para a sua interpretação, gerando, inclusive, produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos.

O processamento digital de imagens, essencial na maioria das operações de sensoriamento remoto, compreende um conjunto de metodologias e de técnicas que podem, segundo Lillesand e Kiefer (1994), dividir-se em cinco fases: restauração e retificação da imagem, que visa à correção de imagens distorcidas ou degradadas de forma a criar uma representação fiel da cena original e envolve o pré-processamento; realce da imagem, que visa a criação de novas imagens a partir da original, de forma a aumentar a quantidade de informação que pode ser visualmente interpretada a partir dos dados e podem ser usados vários métodos como a aplicação de filtros espaciais, alargamento do contraste, avivar de fronteiras, divisão de bandas e análise em componentes principais; classificação da imagem, que visa transformar uma imagem numérica multiespectral ou multitemporal numa carta temática; associação de dados e integração em Sistema de Informação Geográfica, que visa a combinação dos dados de imagem de uma determinada área geográfica com outro conjunto de dados geograficamente referenciados para a mesma área; modelação biofísica, que tem como

objetivo relacionar quantitativamente os dados digitais obtidos por um sistema de detecção remota com características biofísicas e fenômenos medidos no campo.

Silva (2001) explica que a função primordial do processamento digital de imagens de sensoriamento remoto é a de fornecer ferramentas para facilitar a identificação e a extração da informação contida nas imagens, para posterior interpretação. Nesse sentido, sistemas dedicados de computação são utilizados para atividades interativas de análise e manipulação das imagens brutas. O resultado desse processo é a produção de outras imagens, estas já contendo informações específicas, extraídas e realçadas a partir das imagens brutas.

Uma imagem multiespectral pode ser definida como o registro, em várias bandas espectrais, da radiância desse objeto. Em cada elemento da área do terreno, a informação registrada por banda espectral é um número inteiro proporcional à radiância desse elemento de área pelo que a imagem numérica que o utilizador recebe para processamento consiste num conjunto de matrizes inteiras, tantas quantas as bandas espectrais em que a imagem foi registrada (RIBEIRO, 2007).

A classificação automática visa estabelecer classes ou grupos em que os constituintes apresentem características comuns utilizando algoritmos de reconhecimento de padrões espectrais e/ou espaciais da imagem (CAETANO, 2002).

Para as imagens de satélite de muito grande resolução espacial os métodos de análise de dados ainda não estão totalmente desenvolvidos. As investigações sobre as técnicas de interpretação focalizam-se na exploração da textura, na classificação contextual, na classificação por parcela ou por objeto e na detecção e isolamento dos cimos das árvores com estimativa dos diferentes parâmetros da estrutura dos povoamentos (KAYITAKIRE, 2006).

4.11.1 Extração de características das imagens

Extração de características é todo o conjunto de operações de processamento e análise de imagens realizadas com a finalidade de obter valores numéricos que caracterizam as imagens ou partes delas (BAUERMANN, 2008).

A extração de informação a partir das imagens de satélite atribui a cada pixel, com base no conhecimento do seu número digital, um valor da variável que se quer conhecer, para situações como do tipo de ocupação ou uso do solo, tipo de substrato

num ecossistema marinho, índice de área foliar, concentração de clorofila na água, entre outras. Há duas formas principais de fazer isto, através de interpretação visual, baseada na interação da visão humana com as imagens, ou através de métodos automáticos, com recurso a algoritmos matemáticos que operam através de computadores, ilustrado pela Figura 5. Nos métodos visuais o intérprete usa simplesmente a capacidade da visão e cérebro humanos de ver, para estabelecer associações e agrupar elementos de forma inteligente. Em suma, de interpretar uma imagem. Estes métodos utilizam uma série de propriedades das imagens que vão para além do simples alinhamento dos *píxeis* em linhas e colunas, tais como a forma, o tamanho, o padrão, o tom ou a textura. Frequentemente, os métodos automáticos não são suficientes para se obter a informação ou o grau de qualidade pretendida e são complementados com métodos visuais (IGEO, 2013).

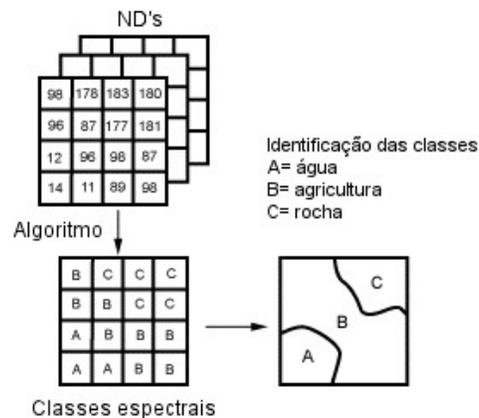


Figura 5 - Representação esquemática da classificação de imagens de satélite

Fonte: Adaptado de Natural Resources Canada (2013)

Ainda segundo o autor, existem muitos algoritmos possíveis para extrair, de forma automática, informação a partir das imagens de satélite. Estes naturalmente têm de ser escolhido consoante o tipo de imagem, área de estudo e tipo de informação que se pretende extrair, quantitativa ou qualitativa, entre outros fatores. Se a informação que se pretende obter é qualitativa, por exemplo, no uso e ocupação do solo, os algoritmos aplicados são necessariamente de classificação pois as variáveis representadas nos mapas resultantes são classes.

Rodenacker e Bengtsson (2003) publicou um estudo sobre técnicas de extração de características que, embora tenha sido motivado pela pesquisa em citologia, serve como referência para outras aplicações. Nele os autores apresentam um sistema de

taxonomia para as características que podem ser extraídas das imagens digitais que usa padrões claros de nomenclatura e definição de características. As características são agrupadas em quatro grandes categorias: características morfológicas que são as medidas da forma dos objetos que compõem a imagem, não levando em conta a intensidade dos pixels e podem ser calculadas sobre imagens binárias que resultam do processamento das imagens multiespectrais; características cromáticas que são as que descrevem a cor, ou composição espectral da radiação emitida ou refletida dos objetos, quantificada pela intensidade dos pixels em diferentes bandas espectrais; características texturais que são medidas que caracterizam a variabilidade local das intensidades dos pixels; e características estruturais ou contextuais que descrevem a relação entre um ou mais objetos que compõem a imagem. As características que aparecem com mais frequência em sensoriamento remoto são as cromáticas.

4.11.2 Comportamento espectral da vegetação

A principal motivação dos estudos em vegetação envolvendo a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto fundamenta-se na compreensão da “aparência” que uma dada cobertura vegetal assume em um determinado produto de sensoriamento remoto, a qual é fruto de um processo complexo que envolve muitos parâmetros e fatores ambientais (INPE, 2001).

Segundo Moreira (2005) cada alvo (asfalto, vegetação, água, entre outros) tem comportamento espectral diferente na mesma condição ambiental. A água apresenta a mais baixa reflectância e absorve toda a radiação acima de 750nm. Segundo Tucker, (1979), citado por Moreira (2005), a vegetação é caracterizada por uma intensa absorção devido à clorofila na região do vermelho (0,58 a 0,68 μ m) e por uma intensa reflexão na faixa do infravermelho próximo (0,76 a 1,35 μ m) causada pela estrutura celular das folhas. A diferença entre as bandas do vermelho e infravermelho é proporcional à reflectância da imagem, sendo a medida do grau de vegetação na imagem.

Há de se considerar que um dossel é constituído por muitos elementos da própria vegetação (folhas, galhos, frutos, flores). Um fluxo de radiação incidente sobre qualquer um destes elementos estará sujeito a dois processos: espalhamento e absorção. O processo de espalhamento, por sua vez, pode ser dividido em dois sub-processos: reflexão e transmissão através do elemento. O destino do fluxo

radiante incidente sobre um destes elementos é então dependente das características do fluxo (comprimentos de onda, ângulo de incidência e polarização) e das características físicoquímicas destes mesmos elementos (PONZONI, 2002).

Ainda segundo o mesmo autor, de todos os elementos constituintes da vegetação, a folha constitui o principal deles quando se considera o processo de interação descrito. Para uma melhor compreensão das características de reflectância da radiação eletromagnética (REM) incidente sobre uma folha é necessário o conhecimento de sua composição química, principalmente tipo e quantidade de pigmentos fotossintetizantes, e de sua morfologia interna (distribuição e quantidade de tecidos, espaços intercelulares).

Levando em consideração o conceito da reflectância interna numa folha e os conhecimentos do espectro de absorção da clorofila, Willstatter e Stoll (1918), desenvolveram uma teoria sobre a trajetória da REM dentro de uma folha, a qual é válida até hoje. Os autores basearam sua teoria na estrutura interna das folhas e na reflectância potencial das superfícies. Segundo eles, a trajetória da REM se daria ao longo de vários meios, sendo estes compostos pela água, ar, membranas celulares.

Aplicação das técnicas de sensoriamento remoto no estudo da vegetação inclui a necessidade de compreender o processo de interação entre a REM e os diversos tipos fisionômicos de dosséis (florestas, culturas agrícolas, formações de porte herbáceo). É comum o intérprete de imagens orbitais interessado em extrair informações sobre a cobertura vegetal, procurar associar os padrões apresentados por esta diretamente com suas características estruturais (parâmetros biofísicos). Cabe ao intérprete estar preparado para conviver com limitações e extrair dos produtos de sensoriamento remoto o máximo de informação confiável (INPE, 2001).

4.12 Índices de vegetação e índice de vegetação por diferença normalizada

Entre os vários procedimentos de análise de imagens de satélite destacam-se os índices de vegetação, SR (Simple Ratio), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e TVI (Transformed Vegetation Index), que vêm sendo amplamente empregados para destacar determinados padrões de vegetação e também para avaliar quantitativamente e qualitativamente o estado de vigor da vegetação, tal como fornecer estimativas do índice de área foliar da vegetação (IAF) (ROCHA, 2010).

Os índices de vegetação foram desenvolvidos a fim de reduzir o número de parâmetros presentes nas medidas multiespectrais. Esses índices gerados a partir de dados de sensoriamento remoto constituem uma importante estratégia para o monitoramento das alterações naturais, ou produzidas pelo homem, nos ecossistemas (SILVA et al., 2009).

Segundo Oliveira et al. (2007), os índices mais comumente empregados utilizam informações contidas nas reflectâncias de dosséis referentes às faixas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo. A vegetação tem reflectância normalmente baixa na faixa espectral do visível (banda 3), e elevada na faixa do infravermelho próximo (banda 4). Isso ocorre porque na faixa do visível a clorofila absorve grande parte da radiação solar no processo fotossintético, enquanto que na faixa do infravermelho próximo o tecido foliar reflete essa radiação (LIRA et al., 2009).

Segundo Silva et al. (2009), índices têm sido usados na estimativa de vários parâmetros da vegetação como, por exemplo, o índice de área foliar (HOLBEN et al., 1980; BARET e GUYOT, 1991) e a quantidade de biomassa verde (TUCKER, 1979; ELVIDGE e LYON, 1985).

Ainda segundo Silva et al. (2009), embora muitos índices vegetativos existam, o mais usado e conhecido é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), que permite o monitoramento da densidade e do estado da vegetação verde sobre a superfície terrestre. E que é gerado pela combinação de bandas em sensoriamento remoto que podem estar relacionadas com a quantidade e o tipo de vegetação existente no terreno.

Moreira (2005) afirma que os dados de reflectância dos alvos podem ser transformados em índices de vegetação, os quais foram criados com o intuito de ressaltar o comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e a outros alvos da superfície terrestre, sendo o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) um dos índices mais utilizados.

Nogueira e Lima (2011) defende que é um índice usado para estimar a quantidade, qualidade e desenvolvimento de vegetação com base em medição, a intensidade da radiação de certas faixas do espectro eletromagnético, que emite ou reflete a vegetação. As plantas absorvem a radiação solar na região espectral de radiação fotossinteticamente ativa, que é usado como uma fonte de energia no processo de fotossíntese.

Há um conjunto de índices que realçam as áreas de vegetação. O índice mais básico limita-se à diferenças entre estas duas bandas (Equação 1):

$$IV = \frac{\text{infravermelho próximo}}{\text{vermelho}} \quad (1)$$

O NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) é calculado a partir destas medidas individuais (Equação 2):

$$NDVI = \frac{\text{infravermelho próximo} - \text{vermelho}}{\text{vermelho} + \text{infravermelho próximo}} \quad (2)$$

Os valores do NDVI oscilam entre -1 e $+1$. Valores negativos correspondem à presença de água (lagos, rios...) e $+1$ representa uma vegetação exuberante, grande quantidade de biomassa. Esse índice permite identificar a presença de vegetação verde na superfície e caracterizar sua distribuição espacial, como também sua evolução no decorrer do tempo (SILVA et al., 2009). Os valores de vegetação serão os valores compreendidos entre 0 e 1, portanto, o NDVI está diretamente relacionado com a capacidade fotossintética e a absorção de energia pela cobertura da árvore.

4.13 Classificação digital

Antunes (2005) definiu classificação digital como o processo de se associar *pixels* a feições distintas o qual pode ser realizado por diferentes métodos, denominados classificação supervisionada e não supervisionada. O método de classificação supervisionada consiste na classificação controlada pelo analista. Baseado na chave da fotointerpretação o analista seleciona *pixels* na imagem de feições conhecidas previamente. Estas amostras devem representar o melhor possível as feições a serem classificadas. Este tipo de classificação é indicado quando o analista tem facilidade de reconhecer todos os padrões da imagem e classes bem distintas entre si. Deve determinar as classes e em seguida as assinaturas, ou seja, o conjunto de dados estatísticos de cada amostra coletada na imagem. Através de a análise estatística saber-se a qualidade da amostra.

Ainda segundo o autor, a classificação não supervisionada requer do usuário apenas alguns parâmetros tais como número de classes e interações. O algoritmo permite agrupar *pixels* com características espectrais similares. É necessário posteriormente associar classes aos agrupamentos, procedimento este que é feito de maneira totalmente automatizada. Este algoritmo permite reunir *pixels* de maneira sequencial, através de uma mínima distância espectral. Assim sendo, cada *pixel* é

associado a determinado agrupamento. O resultado da classificação não supervisionada é a segmentação da imagem dentro de intervalos pré-fixados de variação espectral.

Segundo Novo (1992), as técnicas de classificação digital implicam na implementação de um processo computacional de decisão que atribui certos conjuntos de pontos ou *pixels* de uma imagem a uma determinada classe. Desta forma, o objetivo das técnicas de classificação digital é tornar o processo de mapeamento ou reconhecimento de características da superfície terrestre menos subjetivo e com maior potencial de repetição em situações subseqüentes.

Para Lillesand e Kiefer (1994), o objetivo das técnicas de classificação é categorizar todos os *pixels* de uma imagem digital dentro de uma das várias classes de cobertura da terra, ou temas. Estes dados categorizados podem ser usados para produzir mapas temáticos da cobertura da terra presentes em uma imagem, e/ou produzir resumos estatísticos sobre as áreas cobertas por cada tipo de cobertura da terra. As técnicas de classificação digital podem ser aplicadas a imagens de apenas um canal espectral (unidimensionais) ou a imagens multiespectrais.

A classificação automática dos *pixels* de uma imagem envolve a associação de cada pixel da imagem com um nome que descreve um objeto real. Se a classificação é executada para todos os pixels de uma imagem, o resultado é um mapa temático mostrando a distribuição de categorias (vegetação, solo, uso da terra) que são denominadas de classes. Uma imagem classificada é, portanto, um mapa temático digital, que, se for georreferenciado, pode ser incorporado a um SIG (IBGE, 2000), exemplificado na figura 6.

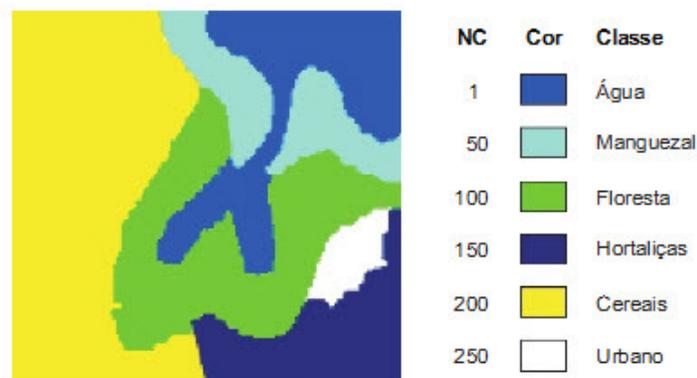


Figura 6 - Exemplo de imagem classificada de acordo com o uso do solo

Fonte: IBGE (2000)

A classificação é implementada com base nas diferenças de comportamento dos materiais ao longo do espectro eletromagnético (IBGE, 2000).

4.14 Dendrometria

O termo dendrometria é de origem grega, significando medida da árvore, conhecida também pelos sinônimos: dasometria, silvimensuração, medição florestal, mensuração florestal e silvimetria. Numa definição mais ampla pode-se conceituar a dendrometria como um ramo da ciência florestal que se encarrega da determinação ou estimação dos recursos florestais, quer seja da própria árvore ou do próprio povoamento, com finalidade de predizer com precisão o volume, o incremento ou a produção de um determinado recurso florestal. Portanto, a dendrometria surgiu para atender objetivos específicos, dentre eles os comerciais, os de ordenação florestal e os de pesquisa (SILVA, 1979).

A base técnica de projetos técnicos de manejo florestal é constituída, em grande parte, por variáveis dendrométricas, o que leva a concluir que a dendrometria também tem o papel de auxiliar no manejo florestal. O conhecimento de certas variáveis florestais para fins de pesquisa exige uma maior precisão nos métodos de medição e de cálculos. A pesquisa combinada com experiências práticas em dendrometria permite o surgimento de novos aparelhos, metodologias, tipos de tabelas, ou seja, a dendrometria também possui objetivos de pesquisa (CUNHA, 2004).

Segundo o mesmo autor, o estudo da dendrometria investiga e desenvolve métodos para determinar dimensões de árvores em pé, submersas ou ao ar livre e de seus produtos; determinar volumes de árvores individuais e de florestas e seus produtos e determinar relações de crescimento e incremento de árvores e florestas. Com objetivo de fornecer informações parcial ou total sobre uma floresta, mediante medidas ou métodos estimativos, que possibilite o conhecimento das potencialidades produtivas e protetivas, visando definir prioridades e estabelecer metas de condução e manejo florestal.

A condução técnica de uma floresta para otimizar o aproveitamento dos recursos econômicos e ecológicos exige, como ponto de partida para a tomada de decisões, a disponibilidade de dados quali-quantitativos sobre as florestas, que resulte em informações sobre o volume de madeira por espécie por hectare, estoque da regeneração natural, dentre outros. Portanto, a dendrometria é de fundamental importância na geração

de informações sempre que qualquer projeto ou atividade floresta venha a se estabelecer (CUNHA, 2004).

4.14.1 Volume

A partir da medição do diâmetro e da altura das árvores, pode-se determinar o volume de árvores. O volume é a variável mais utilizada no diagnóstico do potencial madeireiro de uma floresta, sendo por isso uma variável de muita importância na dendrometria. Além de ser uma variável de uso corrente no manejo florestal, é também a mais utilizada na comercialização e na indústria. Calculando o volume de uma árvore chega-se à determinação do volume de uma floresta. Existem vários métodos de se determinar o volume de uma árvore, tora ou torete: descolamento de água, peso, xilômetro e cubagem (CUNHA, 2004).

Segundo Garcia (2010), o cálculo de volume depende do seu objetivo e do grau de precisão necessário. Geralmente utiliza-se a fórmula de um volume de cilindro corrigido por um fator de forma. A fórmula do volume cilíndrico corrigido pelo fator de forma é: $V = (3,1416 \times DAP^2 \times H) / 40000$, em que: V = volume, em m³; DAP = diâmetro a 1,30m do solo, em cm; H = altura, em m. Outra maneira de se calcular é a cubagem rigorosa. Neste processo, você obtém o volume real através da soma dos volumes das várias seções da árvore de maneira mais precisa e trabalhosa.

Para Cunha (2004), as variações na forma do tronco são devidas à diminuição sucessiva dos diâmetros da base ao topo da árvore. Esta diminuição do diâmetro da árvore é conhecida como "forma da árvore". Após o diâmetro e altura, o fator de forma constitui-se em variável importante na determinação volumétrica. O crescimento em altura é o elemento que mais influencia o fator de forma. Deste modo sabe-se que duas árvores geometricamente idênticas, porém com alturas diferentes, têm diferentes fatores de forma artificial. O fator de forma é definido como uma constante que deve ser multiplicado pelo produto da área transversal (g) com altura (h) para se ter o volume de uma árvore em pé. Sendo $[v = g \times h \times f]$ e $[f = V(\text{real}), \text{cubagem} / V_{\text{cilindro}}]$. À medida que o fator de forma se aproxima de 1, mais cilíndrica é a árvore. Fatores iguais a 1 não são obtidos, porque a árvore apresenta sempre um afilamento ao longo do tronco. O fator de forma médio é calculado sobre o número de árvores representativo da população para aproximações rápidas do volume as árvores. Para a estimativa de volumes individuais,

apesar de ter sido utilizado em alguns levantamentos no passado, não deve ser o método preferido nas condições da floresta tropical (diversidade de formas, dimensões e espécies). Segundo o processo de cálculo, os fatores de forma podem ser divididos em: fator de forma artificial e fator de forma natural.

Ainda segundo o autor, cubagem é o método mais utilizado na prática. Refere-se aos métodos (baseados em fórmulas matemáticas) para determinação do volume de toras, através de medições de diâmetros e alturas. A cubagem refere-se à determinação rigorosa do volume de uma árvore. Na atividade florestal, a cubagem de madeira é uma prática constante, e tem as seguintes finalidades: calcular o volume real de espécies valiosas e ordenar as operações de compra e venda de madeira. Os troncos das árvores não são perfeitamente regulares, e por isso, costuma-se subdividi-los em seções menores, em seguida, cuba-se cada seção individualmente, e através da soma dos volumes parciais, chega-se ao volume da árvore. A divisão em seções não implica em efetuar cortes, é apenas a marcação dos pontos para a coleta dos diâmetros ou circunferências. Em geral, as medições diamétricas são efetuadas a partir da extremidade superior dos tocos, sendo que para uma maior precisão devem ser o menor possível. Assim sendo, essas posições variam desde 0,10m, 0,30m e, a partir daí, de 2,0m em 2,0m ou 1,0m em 1,0m para cada seção. Outros níveis poderão ser estabelecidos dependendo da precisão desejada e da regularidade do tronco. O volume da tora é obtido pelo somatório dos volumes parciais das seções e, quanto menor o comprimento da seção, tanto mais próximo será o volume calculado do volume verdadeiro. O seccionamento do tronco pode ser feito através de comprimentos absolutos (método analítico) ou através de comprimentos relativos.

Alguns estudos foram feitos com o objetivo de estimar o volume de madeira utilizando dados de sensores remotos multiespectrais os quais alcançaram diferentes graus de sucesso, na maioria das vezes com erros superiores àqueles alcançados pelo método tradicional. Como exemplos estão os trabalhos de Thenkabail et al. (2003) e Kayitakire et al. (2006), utilizando imagens do sensor IKONOS, Ponzoni e Shimabukuro (1998), Lu et al. (2004) e Mäkelä e Pekkarinen (2004) utilizando dados do sensor TM/Landsat-5. Mais recentemente, trabalhos fundamentados em dados hiperespectrais e estimativas de variáveis biofísicas, destacam-se os trabalhos de Gong et al (1995), Fernandes et al. (2002) e Hu et al. (2000), os quais trabalharam com estimativas do Índice de Área Foliar (IAF) utilizando o CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager). Já Schlerf et al. (2005) utilizaram o sensor aerotransportado HyMap e dados de campo para

estimar o Índice de Área Foliar (IAF) e volume de madeira, concluindo que o emprego de dados hiperespectrais na quantificação do volume implicou em resultados superiores aos dados multiespectrais.

Para este trabalho o cálculo de volume foi obtido através da equação:

$$V \text{ (m}^3\text{/ha)} = [((\text{DAP}^2/4 * \pi) * H) * f] \quad (3)$$

Onde f = fator de forma.

4.14.2 Área basal

Cunha (2004) relatou que área basal corresponde à soma das áreas transversais de árvores individuais a 1,30m, projetadas sobre o solo, numa parcela ou num hectare. É dada em m² por unidade de área e, mais comumente em m²/ha.

Nesta tese calculou-se área basal pela seguinte fórmula (Equação 4):

$$AB \text{ (m}^2\text{/ha)} = [(\text{DAP}^2/4 * \pi) * n^\circ \text{ árvores}] \quad (4)$$

Como o diâmetro é um parâmetro que compõe a fórmula da área basal, faz-se necessário defini-lo corretamente para evitar erros e é muito importante não confundir o diâmetro médio das árvores com a média aritmética dos diâmetros. Portanto, da área basal do povoamento, resulta a noção de diâmetro médio, sendo preciso conhecer o número de árvores que assenta tal área basal (SILVA, 1979).

4.14.3 Biomassa

Vários trabalhos foram realizados em plantações de eucaliptos para avaliar a biomassa da parte aérea das árvores, utilizando-se equações de regressão. Essas equações foram sempre baseadas em relações empíricas entre a biomassa dos componentes da árvore e o diâmetro à altura do peito, ou a 1,30 m de altura, e a altura, ou a combinação dessas. As equações logarítmicas são mais apropriadas para a estimativa da biomassa, pois apresentam a vantagem de reduzir a variância associada com o sucessivo aumento na altura da árvore (MELLO, 2008).

Segundo Parresol (1999), uma característica desejável das equações de regressão para estimativa da biomassa dos componentes das árvores é que a soma da

biomassa estimada para cada componente da árvore seja igual àquela estimada para toda a árvore. Utilizam-se dados de sensoriamento remoto para estimativa do volume e da biomassa florestal (MONTES et al., 2000; DRAKE et al., 2002), porém essa estimativa depende da prévia medição das dimensões de árvores no local a ser avaliado.

Para o cálculo de estimativas da biomassa desta tese utilizou-se o seguinte modelo (SCHUMACHER e HALL, 1933), (Equação 5):

$$\text{LN}y = b_0 + b_1 * \text{LN}(\text{DAP} * \text{DAP} * \text{H}) \quad (5)$$

Em que:

LN = logaritmo neperiano;

y = biomassa, em kg;

b0 e b1 = parâmetros do modelo;

DAP = diâmetro a 1,3 m de altura, em cm;

H = altura total, em m.

4.14.4 Diâmetro

Segundo Cunha (2004), o diâmetro é uma das variáveis mais importantes na quantificação volumétrica, avaliação de biomassa ou estudo de crescimento. Serve para diferenciar ainda que empiricamente árvores finas de árvores grossas. A medida de qualquer diâmetro da árvore baseia-se sempre na hipótese de que, em cada ponto de medição, o diâmetro obtido aproxima-se do diâmetro de um círculo. Em países que usam o sistema métrico, a medição do diâmetro de árvores em pé é feita a 1,30m acima do solo. Nos trabalhos de medição, a circunferência e, por extensão, a variável diâmetro desempenha um papel importante no levantamento de informações sobre uma floresta. Dentre os pontos importantes, destacam-se por ser uma variável de fácil acesso e medição e é a medida mais importante por servir de base para cálculos como a densidade da floresta em termos de área basal e permite conhecer a estrutura expressa pela distribuição diamétrica.

Ainda segundo o autor, a medição do diâmetro de uma árvore em pé é feita sempre que possível à altura do peito do medidor, observada a referência de 1,30 m acima do solo. Esta regra é largamente difundida na atividade florestal por ser uma posição que facilita o trabalho e manuseio dos instrumentos de medição, e por ser uma forma de padronização. Todavia, alguns países adotam suas próprias medidas de referência

com base na altura média das pessoas, 1,29 m (4 pés e 3") no Reino Unido e 1,37 m (4 pés e 6") nos EUA.

A medição do DAP no local correto, conforme a Figura 7, em cada árvore, é importante, pois contribui para a diminuição dos erros sistemáticos (devidos ao operador ou ao aparelho), os quais são difíceis de serem quantificados e, por isso mesmo, devem ser controlados, a fim de que as informações sobre a floresta sejam consistentes e confiáveis (CUNHA, 2004).

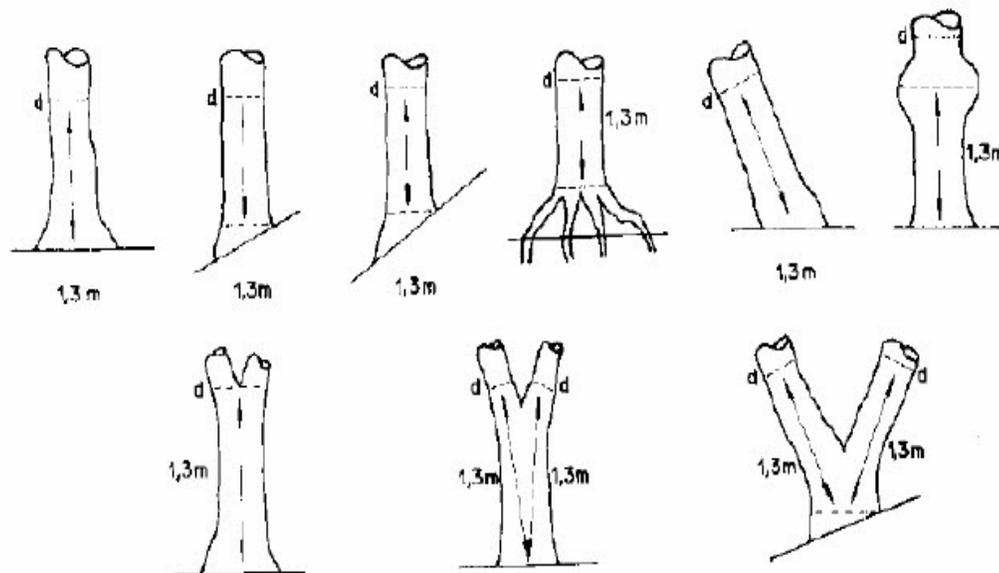


Figura 7 - Medição do DAP em árvores de diferentes formatos

Fonte: Cunha (2004)

Dentre as razões para que o DAP seja de grande importância destacam-se quatro. É uma medida fácil de ser avaliada quando comparada com outras características das árvores, são medidas mais confiáveis, ou seja, os erros de medição e suas causas são reconhecidos e podem ser limitados a um valor mínimo pela utilização de instrumentos apropriados, pela utilização de métodos de medição adequados e pelos cuidados nas tomadas das medidas. É uma medida que fornece a base para muitos outros cálculos. Serve para a obtenção da área seccional à altura do peito, medida importante no cálculo do volume das árvores e de povoamentos (DAP, 2012).

4.14.5 Altura

A variável altura, tal como o diâmetro, é uma importante característica da árvore ou do próprio povoamento florestal. É de suma importância no cálculo do volume e dos incrementos. Normalmente, quando se quer analisar o desenvolvimento de uma espécie, em um determinado sítio, a variável usada para este fim é a altura. A mesma dá o comportamento da referida espécie no decorrer dos anos (SILVA, 1979).

No inventário florestal, as definições de altura utilizadas são: altura total que é a distância entre o solo e o final da copa da árvore e é utilizada para estimar o volume do fuste em equações de volume; altura da copa que é a distância entre o início e o final da copa da árvore. O início da copa normalmente é definido pela inserção do primeiro galho vivo e é utilizada para a definição da intensidade da desrama em árvores destinadas à produção de madeira serrada; altura comercial que é a distância entre algum ponto na parte inferior do fuste e um diâmetro comercial, definido por determinado uso, ou a distância entre algum ponto na parte inferior do fuste e algum defeito no fuste da árvore; e por fim, altura do fuste que é a distância entre o solo e o começo da copa da árvore e que pode coincidir com a altura comercial (DAP, 2012).

O estudo do incremento em altura, no caso de florestas plantadas, auxilia no ordenamento da produção, já que muitas tabelas de produção bem como alguns tipos de prognose para o povoamento estão baseadas também na variável altura. A altura pode servir como indicador da qualidade do sítio. Em florestas plantadas, onde a classificação de sítio é um instrumento clássico de estudo da produção, a altura dominante é largamente empregada na construção de curvas de índice de sítio. A altura pode subsidiar uma caracterização expedita do povoamento, exemplos: floresta alta, floresta baixa, floresta nova. A variável altura participa em várias equações para estimativa de volumes individuais e na determinação e utilização da relação hipsométrica (CUNHA, 2004).

4.15 Análise estatística

Segundo Rao (1999), a estatística é uma ciência que estuda e pesquisa sobre: o levantamento de dados com a máxima quantidade de informação possível; o processamento de dados para a quantificação da incerteza existente na resposta

para um determinado problema; a tomada de decisões sob condições de incerteza, sob o menor risco possível. De fato, a estatística tem sido utilizada na pesquisa científica para a otimização de recursos econômicos, para o aumento da qualidade e produtividade, na otimização em análise de decisões, em questões judiciais, previsões e em muitas outras áreas.

Ao se proceder a uma análise de dados, busca-se de alguma forma uma regularidade, um padrão, ou um modelo presente nas observações. Ao analisar dados, a estatística deve se preocupar com a criação de modelos que “explicitem estruturas do fenômeno em observação, as quais frequentemente estão misturadas com variações acidentais ou aleatórias” (BUSSAB, 1988).

Milone (1995) define modelo matemático como o conjunto das variáveis consideradas em combinação com o modo como elas se relacionam. Não existem modelos perfeitos porque não há como identificar e controlar todas as variáveis envolvidas nos fenômenos em estudo, de maneira que os resultados fornecidos pelos modelos são sempre aproximados. A qualidade de um dado modelo matemático pode ser medida quando aplicada em situações reais, cujos resultados sejam previamente conhecidos. Assim, se ao efetuar a comparação entre os dados reais e teóricos, os valores obtidos forem razoavelmente próximos, o modelo escolhido ou adotado é bom, mas, caso os resultados se apresentem muitos díspares, tanto as variáveis consideradas quanto as relações entre elas devem ser reavaliadas.

4.15.1 Procedimento estatístico “Stepwise”

Dentre os métodos para seleção de variáveis aplicadas a regressões lineares múltiplas, o *Stepwise* é possivelmente o mais amplamente difundido (MONTGOMERY e RUNGEE, 2009). Sua operacionalização ocorre através da sistemática adição ou remoção de variáveis no modelo de regressão, realizada com base em um teste estatístico de significância de cada variável.

Também chamado de regressão por etapas ou passo-a-passo, consistindo na escolha das variáveis mais importantes para a estimação de um modelo de regressão linear múltipla. A primeira etapa desse método inicia-se com um modelo com apenas uma variável regressora, sendo escolhida a variável que apresente o maior coeficiente de correlação com a variável resposta. Na etapa posterior é verificado se

alguma variável regressora pode ser acrescentada ao modelo, após o acréscimo de uma nova variável, a próxima etapa verifica se alguma das variáveis já acrescentadas deverá ser descartada. Esse método finaliza-se quando não há nenhuma variável para ser acrescentada ou descartada no modelo (MONTGOMERY e RUNGEE, 2009).

Segundo o Portal Action (2012), o método *Stepwise* para a seleção de variáveis que é muito usado em regressão linear e qualquer procedimento para seleção ou exclusão de variáveis de um modelo é baseado em um algoritmo que verifica a importância das variáveis, incluindo ou excluindo-as do modelo se baseando em uma regra de decisão. A importância da variável é definida em termos de uma medida de significância estatística do coeficiente associado à variável para o modelo. Essa estatística depende das suposições do modelo. No *Stepwise* da regressão linear um teste F (Fisher) é usado desde que os erros tenham distribuição normal. Na regressão logística os erros seguem distribuição binomial e a significância é assegurada via Teste da Razão de Verossimilhança. Assim, em cada passo do procedimento a variável mais importante, em termos estatísticos, é aquela que produz a maior mudança no logaritmo da verossimilhança em relação ao modelo que não contém a variável.

4.15.2 Modelos e análise de regressão

A análise de regressão é uma técnica estatística usada para modelar e investigar a relação entre duas ou mais variáveis. O modelo é frequentemente usado para previsões através da relação entre estas variáveis de maneira que uma delas possa ser estimada em função das demais.

Para Milone (1995), a regressão tem a função básica de fornecer as equações necessárias para relacionar as variáveis em questão, com as quais podem ser feitas as previsões sobre o comportamento futuro do fenômeno. Essas equações se classificam em: lineares, quando os fenômenos podem ser razoavelmente bem explicados por equações do 1º grau; e não lineares, quando exigem funções de ordem superior, por não se explicarem adequadamente pelas equações do 1º grau.

Modelos de regressão são modelos matemáticos que relacionam o comportamento de uma variável Y com outra X . Quando a função f que relaciona duas variáveis é do tipo $f(X) = a + bX$ temos o modelo de regressão simples. A variável X é a variável independente da equação enquanto $Y = f(X)$ é a variável dependente das

variações de X. O modelo de regressão é chamado de simples quando envolve uma relação causal entre duas variáveis. O modelo de regressão é multivariado quando envolve uma relação causal com mais de duas variáveis. Isto é, quando o comportamento de Y é explicado por mais de uma variável independente X1, X2, ..., Xn (FAU, 2012).

Os modelos acima (simples ou multivariados) simulam relacionamentos entre as variáveis. Esse relacionamento poderá ser do tipo linear (equação da reta ou do plano) ou não linear (equação exponencial, geométrica). A análise de regressão compreende, portanto quatro tipos básicos de modelos: linear simples, linear multivariado, não linear simples ou não linear multivariado (FAU, 2012).

4.15.3 Análise de regressão linear múltipla

Regressão é o processo matemático pelo qual derivamos os parâmetros “a” e “b” de uma função f (X). Estes parâmetros determinam as características da função que relaciona ‘Y’ com ‘X’ que no caso do modelo linear se representa por uma reta de regressão. Esta reta explica de forma geral e teoricamente a relação entre X e Y. Isto significa que os valores observados de X e Y nem sempre serão iguais aos valores de X’ e Y’ estimados pela reta de regressão. Haverá sempre alguma diferença (erro ou desvio), e essa diferença pode significar: que as variações de Y não são perfeitamente explicadas pelas variações de X ou; que existem outras variáveis das quais Y depende ou; que os valores de X e Y são obtidos de uma amostra específica que apresenta distorções em relação à realidade (FAU, 2012).

Ainda segundo os autores, o processo de regressão significa, portanto, que os pontos plotados no gráfico são definidos, modelados ou regredidos, a uma reta que corresponde à menor distância possível entre cada ponto plotado e a reta. Em outras palavras, busca-se reduzir ao mínimo possível os somatórios dos desvios entre Y e Y’. Conforme a Figura 8.

$$Y = \alpha + \beta X \text{ equação da reta a partir dos dados coletados} \quad (6)$$

$$Y' = a + b X' \text{ equação da reta a partir das estimativas} \quad (7)$$

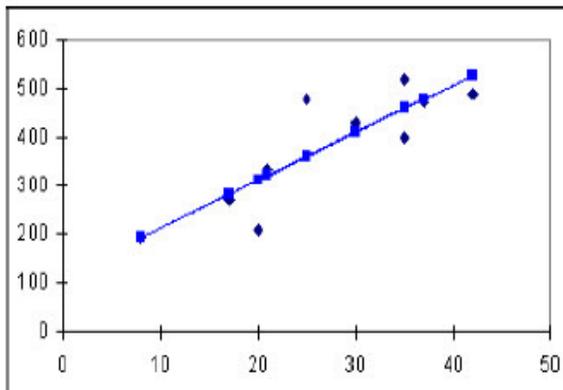


Figura 8 - Exemplo da reta de regressão

Fonte: FAU (2012)

Druck (2004) avaliou o modelo da regressão linear múltipla pela seguinte expressão:

$$Y = X\beta + \epsilon, \quad \epsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (8)$$

ou

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & \dots & x_{1,\kappa-1} \\ 1 & x_{2,1} & \dots & x_{2,\kappa-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n,1} & \dots & x_{n,\kappa-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{\kappa-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

A variável $Y_{\eta,1}$ é a variável dependente com as observações tomadas em cada uma das η áreas estudadas, $X_{\eta,k}$ com $\kappa - 1$ variáveis explicativas também tomadas nas η áreas, $\beta_{k,1}$ são os coeficientes de regressão, e $\epsilon_{\eta,1}$ é o vetor de resíduos.

As observações devem ser não correlacionadas e os resíduos independentes e não correlacionados com variância constante e média igual a zero. O ajustamento é feito segundo um dado critério. O caso mais comum e o aqui utilizado é o critério dos mínimos quadrados. Ou seja, determinar os coeficientes para os quais o modelo ajustado tem a menor soma quadrada dos resíduos (GHILANI, 2010):

$$\sum \epsilon^2 = \epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \dots + \epsilon_n^2 = \text{mínimo} \quad (10)$$

Em que os resíduos são dados pela diferença entre os valores estimados e os valores observados:

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \hat{y}_1 - y_1 \\ \epsilon_2 &= \hat{y}_2 - y_2 \\ &\vdots \\ \epsilon_n &= \hat{y}_n - y_n \end{aligned} \quad (11)$$

Após o ajustamento é necessário verificar o quão bem o modelo se ajustou aos dados. Uma das estatísticas mais utilizadas para esse efeito, no caso de uma regressão linear múltipla, é o coeficiente de determinação, dado por:

$$R^2 = \frac{(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{(y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

Quanto mais próximo do valor 1 melhor é o ajustamento. Deve-se também analisar os resíduos, verificar se estes apresentam as condições de independência e aleatoriedade já referidas.

4.15.4 Análise de correlação entre variáveis

Segundo Milone e Angelini (1995), regressão e correlação são técnicas estatísticas que se baseiam nos conceitos de amostragem para saber se e como duas ou mais variáveis estatísticas de uma mesma população ou não, estão relacionadas umas com as outras. É o relacionamento entre duas ou mais variáveis, expresso em uma forma matemática, determinada por meio de uma equação, para identificar se há relação entre elas, e medir qual o grau dessa relação, se fraca ou forte. Existindo a relação é preciso estabelecer um modelo que interprete a relação funcional entre as variáveis e que o modelo construído seja utilizado para fins de predição.

A avaliação de um modelo procura verificar se os parâmetros estimados são ou não estatisticamente significativos e satisfatórios. Os critérios estatísticos de avaliação dos modelos têm como objetivo verificar o grau de confiabilidade das estimativas obtidas, mediante a aplicação de testes realizados pelas estatísticas t e F, além, da análise de coeficientes de regressão, coeficientes de determinação da correlação e do erro-padrão (MATOS, 1997).

Para Stevenson (1981), a análise da correlação é uma análise de dados amostrais cujo objetivo é saber como e se duas ou mais variáveis estão relacionadas umas com as outras. A análise da correlação gera um número que resume o grau de relacionamento entre duas variáveis.

O coeficiente de correlação é uma medida da relação linear entre duas ou mais variáveis, e simbolizado por (R) indica a proximidade dos pontos à reta de regressão e quanto mais próximos R estiver de 1,0, mais próximos os pontos se encontram

da reta de regressão; quanto mais próximo R estiver de zero, mais pobre é ajustamento da reta de regressão aos pontos (MAHER, 2001).

Leite et al. (2007) explica que o quadrado de R, conhecido por coeficiente de determinação ou R^2 da regressão, objetiva revelar o quanto as variáveis independentes explicam a variação da variável dependente, ou seja, é uma medida que procura refletir o quanto os valores de Y estão relacionados com os de X, podendo variar de 0 a 1, de modo que quanto mais próximo de 1, melhor. O coeficiente de correlação ao quadrado, ajustado pela quantidade de variáveis independentes utilizadas para fazer a estimativa, representado por R^2 ajustado, avalia se houve ganho ou perda pela inclusão de uma nova variável no modelo, ou seja, se o mesmo diminuir está indicando que a nova variável incluída tem pouco poder de explicação podendo até chegar a ser negativo e o inverso também pode ocorrer, ou seja, aumentar seu valor em função do ingresso de uma variável com poder explicativo. A estatística t tem por finalidade testar a significância dos parâmetros estimados do modelo, o que equivale ao teste do efeito individual de X e do termo constante, sendo definida para cada um dos parâmetros estimados. Já a estatística F busca testar o efeito conjunto das variáveis explicativas sobre a dependente, ou seja, verifica se pelo menos uma das variáveis exerce efetivamente alguma influência sobre a variável dependente, ou no caso da regressão simples, testar a significância do efeito de uma variável independente sobre a outra dependente.

4.16 Mapeamento da vegetação

A caracterização e o mapeamento da vegetação do território brasileiro de forma integrada foram iniciada em 1974 com o Projeto RADAM e, posteriormente, denominada RADAMBRASIL, quando foi feito o levantamento dos recursos naturais (geológicos, pedológicos, geomorfológicos, vegetação e potencial do uso da terra) dos Estados brasileiros, numa escala correspondente a 1:5.000.000. Através do uso de radares e levantamentos em campo, os pesquisadores mapearam o território brasileiro de norte a sul (COURA, 2006).

No entanto, a ocupação urbana, a expansão da fronteira agrícola, a exploração dos recursos naturais mudaram a paisagem de forma significativa tanto na sua composição florística quanto na sua estrutura. As técnicas de sensoriamento remoto juntamente com as análises de informações espaciais em ambientes de sistemas de

informações geográficas tornaram possíveis a análise e o monitoramento multitemporal e espacial das mudanças ocorridas na superfície terrestre (DEFRIES et al., 2002).

A identificação, classificação e o monitoramento dos diferentes biomas são atividades relevantes por várias razões, especialmente porque constituem uma informação essencial para o estudo dos ciclos geoquímicos globais e do impacto resultante das atividades antrópicas (ZHANG et al., 2003). Diante da necessidade do monitoramento regional e/ou global para uma melhor compreensão do seu papel nas atuais mudanças, novos sensores têm sido propostos, desenvolvidos e lançados para se obter dados com uma melhor qualidade temporal, espacial, espectral e radiométrica (NASA, 2000).

4.17 Manejo de plantios de eucalipto

O manejo é o gerenciamento dos recursos florestais, desenvolvendo e aplicando métodos quantitativos e conhecimentos ecofisiológicos que visam gerar produtos, serviços, e benefícios diretos e indiretos, garantindo sustentabilidade econômica, social e ambiental a partir de uma floresta (DAP, 2012). Considerando-se, cumulativa ou alternativamente, a utilização de múltiplas espécies madeireiras, de múltiplos produtos e subprodutos não-madeireiros, bem como a utilização de outros bens e serviços de natureza florestal.

O manejo sustentado mantém uma produção contínua do recurso explorado, sem a deterioração dos demais recursos e benefícios envolvidos, inclusive o financeiro. Ele propicia uma série de bens, para os quais não há mercado perfeito e que são de difícil mensuração em termos monetários (BERGER, 1990; CARVALHO FILHO, 1996).

Manejo pode ser definido como sendo o gerenciamento dispensado a um povoamento florestal, o qual interfere nas condições ambientais em prol do desenvolvimento da floresta, de um cultivo florestal, ou também como sendo a administração de uma empresa florestal. Relaciona-se à administração dos benefícios diretos e indiretos proporcionados pela floresta ou pela cultura florestal. O manejo de florestas, ou de cultivos florestais, deve englobar um conjunto de procedimentos e técnicas que assegurem a permanente capacidade das árvores para oferecer produtos e serviços, diretos e indiretos; a capacidade de regeneração natural; a capacidade de manutenção da

biodiversidade e a sustentabilidade direta de ligação econômica, sócio-culturais e ambientais (SABOGAL, 2006).

No caso do eucalipto, o corte para industrialização ocorre normalmente aos 7 anos de idade, num regime que permite até 3 rotações sucessivas e econômicas, com ciclo final de até 21 anos. Os reflorestamentos tradicionais de eucalipto são representados por densos maciços florestais, plantados em espaçamentos regulares e normalmente com uma única espécie. Para que se tenha sucesso nesse empreendimento, precisa-se considerar o espaçamento da espécie florestal (EMBRAPA, 2012).

Segundo o mesmo autor, plantios mais adensados resultam na produção de um elevado número de árvores com pequenos diâmetros, as quais normalmente são utilizadas para fins menos nobres como lenha, carvão, celulose, engradados e estacas para cercas. Espaçamentos amplos resultam em um número menor de plantas por unidade de área, tornando mais fácil o acesso de máquinas para o plantio e tratos culturais. Facilitam também a retirada da madeira e empregam menos mão de obra, além de permitirem a produção de madeira de melhor valor comercial (postes, vigas, esteios e serraria). Como desvantagens há maior necessidade de tratos culturais e menor derrama natural. A implantação de povoamentos, assim manejados, é naturalmente uma excelente alternativa para se integrar as atividades agrícola, florestal e pecuária em um sistema de produção misto.

Práticas de manejo em eucalipto, caracterizadas por espaçamentos iniciais largos, desbastes precoces e pesados, e, podas altas, revelam-se superiores aos tradicionais, com a produção de madeira de boa qualidade, com bons resultados econômicos. Além disso, permite a penetração de altos níveis de radiação no sub-bosque, o que, por sua vez, favorece o desenvolvimento satisfatório de outras espécies, também com valor econômico, associadas (EMBRAPA, 2012).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Descrição geral da área de estudo

As áreas estudadas, Figura 9, estão situadas entre as coordenadas 756051m-758915m/7437244m-7461880m, no fuso 22S no sistema Universal Transversa de Mercator (UTM), Datum WGS84.

A Fazenda Pinheiro com altitude de aproximadamente 865m e a Fazenda Cascata com 650 m localizadas nas regiões denominadas, respectivamente, de reverso da “cuesta” e depressão periférica da “cuesta”, ocupando a porção sul-sudoeste do município de Botucatu/SP e a leste do município de Itatinga/SP, onde segundo o Mapa Pedológico do Estado de São Paulo (Embrapa, 2012) predomina a unidade de solo tipo Latossolos Vermelhos distróficos (LVd) e a unidade de solo Latossolo Vermelho- amarelo (LVa) respectivamente, classificados como relevo plano e suave ondulado.

O clima predominante nos municípios, segundo o sistema Köpen, é do tipo Cfa - clima temperado chuvoso com vento predominante a sudeste (SE). Sendo a temperatura média anual em torno dos 20°C, com precipitação anual média de 1447 mm.

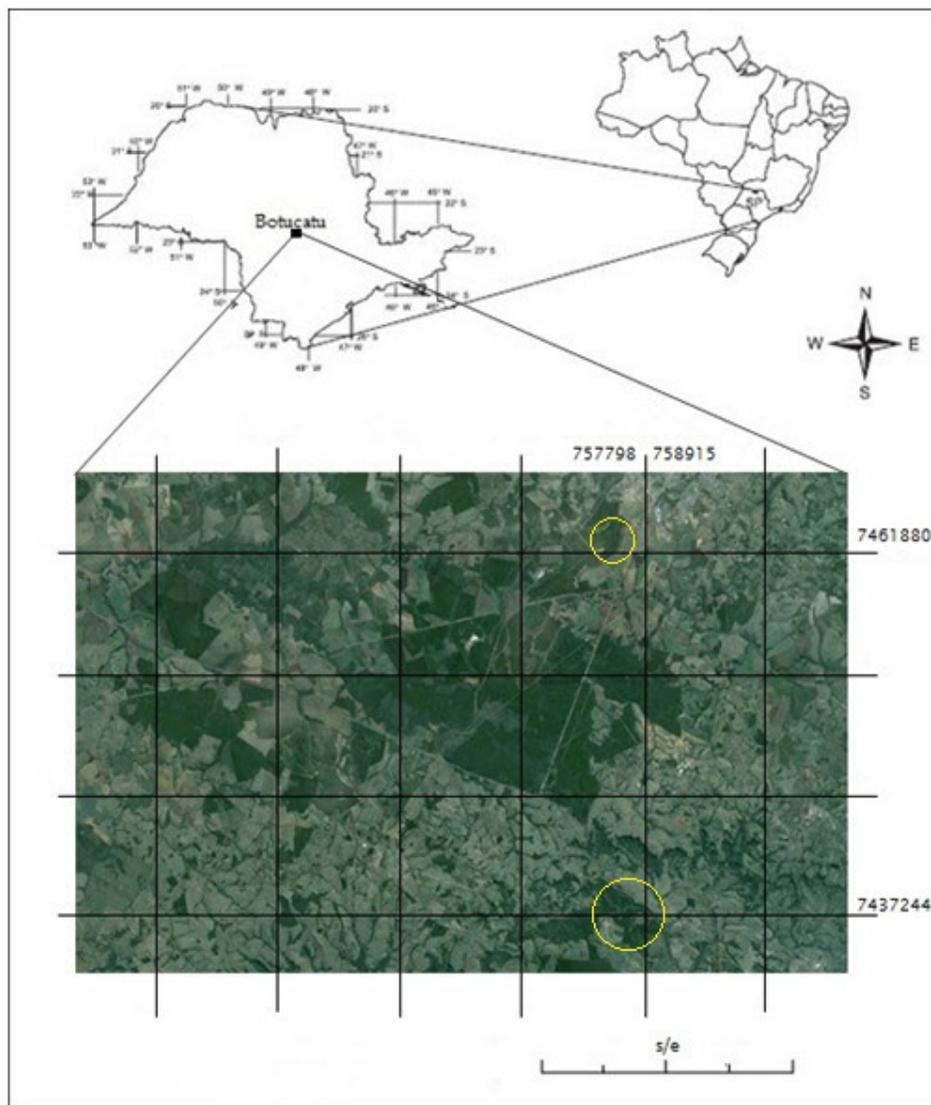


Figura 9 - Ilustração da localização aproximada das áreas de estudo na região do município de Botucatu/SP

5.2 Aquisição dos dados

Para este estudo utilizaram-se imagens digitais Landsat 5/TM adquiridas junto ao U.S. Geological Survey / Earth Resources Observation & Science Center (EROS), com as bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 para as épocas de 2007, 2008, 2009 e 2010 das regiões onde estão localizadas as fazendas. A seleção observou basicamente o critério de quantidade e distribuição de nuvens, sendo assim, foram escolhidas as imagens em que a influência deste fenômeno não apresentava prejuízo na nitidez da paisagem.

Para complementar o estudo, utilizaram-se dados de levantamentos de campo de seis parcelas da Fazenda Pinheiros, Figura 10, e dados de 27 parcelas pertencentes à Fazenda Cascata, Figura 11. Vale salientar que estas parcelas são constituídas apenas por *Eucalyptus grandis* (Egr) com praticamente a mesma idade (3,5 anos em 2007 e 6,5 anos em 2010).

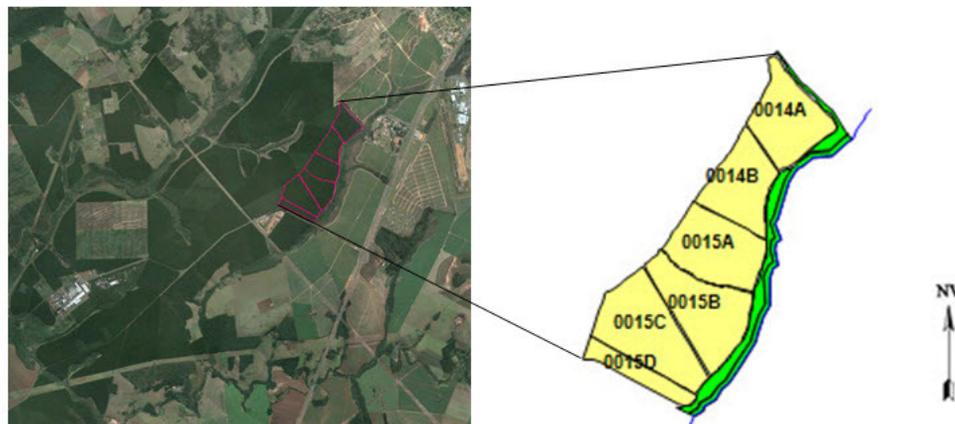


Figura 10 - Parcelas de reflorestamento da Fazenda Pinheiros situada entre as coordenadas 757252m-757798m/7459827m-7461880m, UTM-22S



Figura 11 - Parcelas de reflorestamento da Fazenda Cascata situada entre as coordenadas 756051m-758915m/7440966m-7437244m, UTM-22S

O inventário florestal de campo de cada fazenda, referente aos anos de 2007, 2008, 2009 e 2010, foram cedidos pela empresa Duratex S/A em 2012, com dados de campo das parcelas, como por exemplo: espaçamento, área, idade na medição, data da medição, altura, número de árvores por hectare, fustes por hectare, entre outros. As Tabelas 1 e 2, referentes ao ano de 2010, apresentam alguns dados essenciais de cada fazenda utilizados para os cálculos, onde HD representa a altura predominante em metros; HT é a altura total em metros e q é o diâmetro médio em centímetros.

Tabela 1 - Dados das quadras da Fazenda Pinheiro em 2010

Quadra	Espaçamento (m)	Idade (anos)	HD (m)	HT (m)	q (cm)	Árvores (n/ha)	Mortalidade (n/ha)	Mortalidade (%)
0015C	3,00 X 1,70	6,4	25,8	21,5	14,2	1.528	432	22,040
0014B	3,00 X 1,70	6,6	25,4	20,9	13,4	1.690	270	13,775
0014A	3,00 X 1,70	6,7	25,8	22,1	15,0	1.296	664	33,877
0015D	3,00 X 1,70	6,4	25,5	21,2	13,9	1.759	201	10,255
0015B	3,00 X 1,70	6,4	25,1	21,2	13,2	1.852	108	5,510

Tabela 2 - Dados das quadras da Fazenda Cascata em 2010

Quadra	Espaçamento (m)	Idade (anos)	HD (m)	HT (m)	q (cm)	Árvores (n/ha)	Mortalidade (n/ha)	Mortalidade (%)
0002	3,00 X 2,00	6,18	32,00	24,85	16,68	1.574,07	91,93	5,518
0003	3,00 X 2,00	6,18	31,75	25,07	16,64	1.435,19	230,81	13,854
0004	4,00 X 1,50	6,13	29,65	24,18	15,69	1.527,78	138,22	8,296
0007	4,00 X 1,50	6,13	33,25	26,73	17,45	1.481,48	184,52	11,075
0009	4,00 X 1,50	6,17	32,93	26,42	16,51	1.412,04	253,96	15,243
0013	4,00 X 1,50	6,12	33,25	26,83	17,21	1.342,60	323,40	19,411
0015	4,00 X 1,50	6,14	31,65	24,07	15,47	1.574,07	91,93	5,518
0016	4,00 X 1,50	6,14	31,71	24,57	15,64	1.481,48	184,52	11,075
0017	3,75 X 1,80	5,20	26,52	22,11	15,54	987,65	493,35	33,311
0018	3,75 X 1,80	4,95	29,45	24,13	17,11	1.049,38	431,62	29,143
0019	4,00 X 1,50	6,05	32,40	24,90	15,56	1.435,19	230,81	13,854
0021	4,00 X 1,50	6,10	32,06	25,41	15,96	1.435,19	230,81	13,854
0022	4,00 X 1,50	5,88	31,15	25,29	16,41	1.319,45	346,55	20,801
0023	4,00 X 1,50	6,06	32,25	26,26	16,37	1.111,11	554,89	33,306
0024	4,00 X 1,50	6,12	29,60	24,36	16,05	1.435,19	230,81	13,854
0025	4,00 X 1,50	6,12	31,45	26,20	16,73	1.342,60	323,40	19,411
0027	4,00 X 1,50	5,87	30,65	26,31	17,30	1.157,41	508,59	30,527
0028	4,00 X 1,50	5,98	32,35	25,62	16,33	1.435,19	230,81	13,854
0029	4,00 X 1,50	5,98	31,10	24,10	15,75	1.481,48	184,52	11,075
0030	4,00 X 1,50	6,00	31,40	25,53	16,31	1.157,41	508,59	30,527
0031	4,00 X 1,50	6,05	31,68	25,73	16,46	1.365,74	300,26	18,022
0032	4,00 X 1,50	5,96	27,15	23,52	16,37	1.203,70	462,30	27,749
0034	3,00 X 2,00	5,34	30,65	24,45	16,53	1.250,00	416,00	24,969

Tabela 2 - Dados das quadras da Fazenda Cascata em 2010

Quadra	Espaçamento (m)	Idade (anos)	HD (m)	HT (m)	q (cm)	Árvores (n/ha)	Mortalidade (n/ha)	Mortalidade (%)
0035	4,00 X 1,50	6,04	31,30	26,83	17,02	1.342,59	323,41	19,412
0036	4,00 X 1,50	6,04	32,45	25,98	17,50	1.157,41	508,59	30,527
0037	4,00 X 1,50	6,04	32,95	24,92	16,08	1.388,89	277,11	16,633
0038	4,00 X 1,50	6,04	31,05	25,33	16,58	1.388,89	277,11	16,633

5.3 Equipamentos e programas computacionais

No desenvolvimento do trabalho utilizou-se um computador portátil marca Hewlett - Packard (HP), modelo HP Pavilion dv3; com processador Intel Core 2 duo 2.10 GHz; memória de 4 Gigabytes; Disco Rígido de 500 Gigabytes com sistema operacional Windows Vista.

Os programas de computador utilizados foram: PCI Geomatics, versão 9.1 (Geo-intelligence Solutions, 2003), Figura 12; o Microsoft Office Excel 2007 (Microsoft, 2007), Figura 13; Idrisi Kilimanjaro, versão 14.01 (Clark Labs, 2003), Figura 14; ArcGis 10 Desktop (ESRI, 2010), Figura 15 e R, versão 3.0.0 (The R Foundation for Statistical Computing, 2013), Figura 16. Alguns deles utilizados para a mesma função como, por exemplo, cálculo da reflectância, NDVI e regressão, objetivando a verificação do método em Sistemas de Informação Geográfica distintos e com uma sequência diferente de inserção dos dados.

As Figuras 12, 13, 14, 15 e 16 ilustram a interface de cada programa de computador.

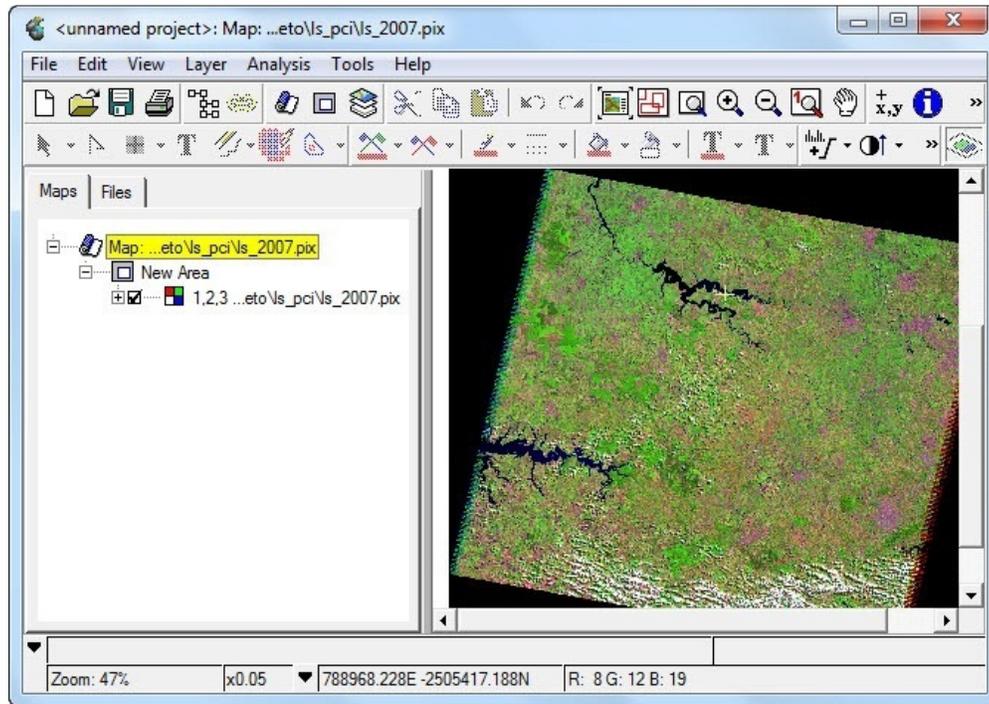


Figura 12 - PCI Geomatics (versão 9.1)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
66		0016	15.64	31.71	1.481.48	4.879042662	2.322554013	1.584949025	0.842667448	3596.471321				
67		0017	15.54	26.52	987.65	4.676355558	2.15186573	1.54251908	0.766335247	2280.347672				
68		0018	17.11	29.45	1.049.38	4.991504073	2.417260804	1.607737282	0.882635	2613.355166				
69		0019	15.56	32.40	1.435.19	4.890880561	2.332523027	1.587372361	0.846950526	3493.703693				
70		0021	15.96	32.06	1.435.19	4.933863439	2.36872007	1.59612234	0.862349754	3528.362273				
71		0022	16.41	31.15	1.319.45	4.962486432	2.392824265	1.601906912	0.872474369	3264.810009				
72		0023	16.37	32.25	1.111.11	4.994042204	2.419398232	1.608245643	0.883518845	2768.62444				
73		0024	16.05	29.60	1.435.19	4.861538511	2.307813295	1.581354954	0.836300451	3469.79486				
74		0025	16.73	31.45	1.342.60	5.012865313	2.435249681	1.61200767	0.89004929	3359.249164				
75		0027	17.30	30.65	1.157.41	5.057133959	2.472529503	1.620799912	0.905241717	2923.665841				
76		0028	16.33	32.35	1.435.19	4.99214079	2.417797	1.607864834	0.882856795	3574.658774				
77		0029	15.75	31.10	1.481.48	4.873914683	2.318235604	1.583897451	0.840806381	3592.150232				
78		0030	16.31	31.40	1.157.41	4.95800922	2.389053884	1.601004293	0.870897423	2861.003766				
79		0031	16.46	31.68	1.365.74	4.985966254	2.412597341	1.606627237	0.880703902	3397.04763				
80		0032	16.37	27.15	1.203.70	4.811898094	2.266009759	1.57109162	0.818020469	2875.774222				
81		0034	16.53	30.65	1.250.00	4.960783331	2.391390037	1.601563658	0.871874802	3091.798075				
82		0035	17.02	31.30	1.342.59	5.044807895	2.462149223	1.618359535	0.901034637	3382.513421				
83		0036	17.50	32.45	1.157.41	5.141842584	2.543864923	1.637411495	0.933684548	2975.81227				
84		0037	16.08	32.95	1.388.89	4.978937644	2.406678275	1.605216544	0.878247487	3449.258358				
85		0038	16.58	31.05	1.388.89	4.980894427	2.408326135	1.605609479	0.878931956	3450.754754				

Figura 13 - Microsoft Office Excel 2007

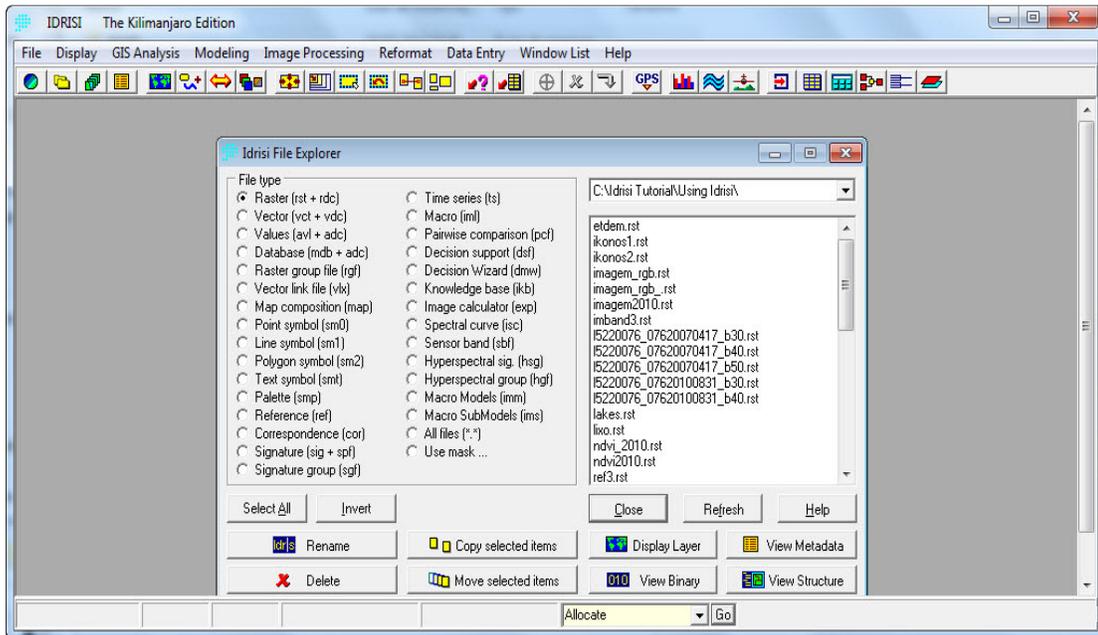


Figura 14 - Idrisi Kilimanjaro

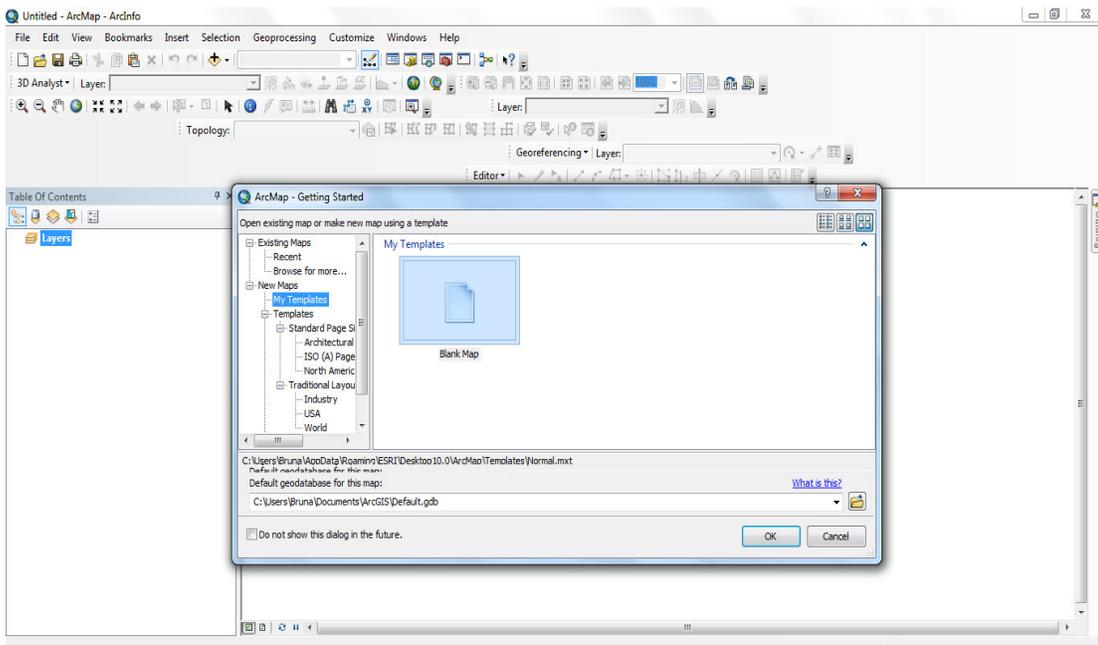


Figura 15 - ArcGis 10 Desktop

```

RGui (32-bit)
Arquivo Editar Visualizar Misc Pacotes Janelas Ajuda

R Console
# script em R para regressao linear

# importar dados
qpinhoiro <- read.table("./QuadrasPinheiro.csv", header=TRUE, sep=",")

qpinhoiro <- qpinheiro[qpinhoiro$epoca == 2008,]

# regressao

# area basal
a_basal.lm = lm(a_basal ~ ndvi + r4, data = qpinheiro)

# volume
volume.lm = lm(volume ~ ndvi + r4, data = qpinheiro)

# biomassa
biomassa.lm = lm(biomassa ~ ndvi + r3, data = qpinheiro)

## RESULTADOS ##
U:**- reg.R Top (19,0) (Fundamental)

```

Figura 16 - R (versão 3.0.0)

5.4 Métodos e tratamento dos dados

Iniciou-se a pesquisa através de levantamentos bibliográficos e pesquisa de ensaios com outros tipos de florestas, outras imagens de satélite e diferentes métodos para definir qual metodologia se adequava melhor aos dados oferecidos.

Índices extraídos de imagens de sensores remotos com volume e idade da floresta foram relacionados em trabalhos realizados no Brasil e no exterior (SOUSA, 1997; WARNECKE et al., 2002 e KUOKAL, 2004). No entanto, conforme Sousa (1997) e Xavier (1998), os índices utilizados, desenvolvidos para análise de culturas agrícolas, apresentam problemas de saturação quando aplicados a florestas adultas. Segundo Maciel et al. (2009), é possível estimar parâmetros estruturais de uma floresta primária em uma área no município de Paragominas, Estado do Pará, relacionando dados biométricos, com dados orbitais obtidos pelas imagens Landsat-7. Sendo este último artigo, o que possuía uma metodologia mais semelhante quanto aos procedimentos estatísticos, correlacionando o grau de dependência linear entre as variáveis biométricas e digitais, sendo útil ao desenvolvimento do presente trabalho.

Iniciado o tratamento dos dados, as imagens de satélite e as tabelas com dados das observações de campo foram processados no intuito de gerar as amostras que entram no ajustamento dos modelos de regressão, as quais posteriormente foram analisadas detalhadamente.

5.4.1 Escolha das imagens de satélite

Definiu-se que as imagens usadas seriam adquiridas pelo sensor TM a bordo do satélite Landsat-5, já georreferenciadas obtidas junto ao U.S. Geological Survey /Earth Resources Observation & Science Center (EROS), Tabela 3. Valendo lembrar que a cobertura de nuvens apresentou-se como fator de limitação na obtenção de imagens.

Tabela 3 - Características das imagens selecionadas para o estudo

Imagem	Ano	Bandas	Coordenadas	Datum
LT52200762007107CUB01	2007	1,2,3,4,5,6 e 7	UTM 22	WGS84
LT52200762008254CUB01	2008	1,2,3,4,5,6 e 7	UTM 22	WGS84
LT52200762009224CUB00	2009	1,2,3,4,5,6 e 7	UTM 22	WGS84
LT52200762010243CUB00	2010	1,2,3,4,5,6 e 7	UTM 22	WGS84

Estas imagens possuem resolução espacial de 30 x 30m (0,09 ha) e resolução temporal de 16 dias. São adquiridas em diferentes faixas de comprimento de onda nas regiões do visível e do infravermelho do espectro eletromagnético e cada imagem recobre uma área no terreno com dimensão de 185 x 185 km. Para a escolha das bandas espectrais do Landsat-5 levou-se em consideração as características e aplicações de cada banda. No caso foram escolhidas as bandas 3, 4 e 5 ideais para trabalhar com vegetação.

As bandas escolhidas têm por características revelar a vegetação verde, densa e uniforme. A banda 3 apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação e bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal. Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da mata galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal; permite a identificação de áreas agrícolas. Na banda 4, os corpos de água absorvem muita energia e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água. A vegetação reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas. Serve para separar e

mapear áreas ocupadas com *pinus* e eucalipto. Serve para mapear áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas. E também permite a identificação de áreas agrícolas. A banda 5 apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite (ENGESAT, 2012).

5.4.2 Processamento e medição de características das imagens

De posse das imagens de interesse, e do programa PCI Geomatics, fez-se a importação da imagem através do item “import PCIDSK”, no qual se selecionou a importação apenas de uma banda, no caso a banda 5. Após este procedimento salvo, fez-se a adição da banda 4 através do item “transfer layer” e o mesmo para a banda 3.

Depois de feita a combinação das bandas para o ano de 2007, fez-se o mesmo procedimento para os anos seguintes: 2008, 2009 e 2010. Para facilitar a visualização da área de estudo efetuou-se o corte da imagem em torno da área de interesse através do comando “Clipping / Subsetting”, alterando o nome do arquivo de saída.

O objetivo de tratar a imagem no PCI Geomatics foi calcular a reflectância, que é a razão entre fluxo radiante e incidente, e o NDVI da imagem a fim de promover a melhor caracterização das formações florestais da área de estudo. Procedeu-se então a conversão dos números digitais para reflectância, utilizando-se do item “raster calculator”, para a determinação do índice de vegetação NDVI, que é dado pela Equação (2):

$$NDVI = \frac{\text{infravermelho próximo} - \text{vermelho}}{\text{vermelho} + \text{infravermelho próximo}} \quad (2)$$

Onde a reflectância na banda referente ao infravermelho próximo foi representado pela banda 4 e reflectância na banda referente ao vermelho pela banda 3. Por fim, leram-se diversos pontos escolhidos aleatoriamente dentro de cada parcela de interesse para fazer uso dos mesmos no próximo passo.

No programa de computador Microsoft Excel, para cada ano (2007, 2008, 2009 e 2010) tomou-se nota dos números digitais de cada banda de cada parcela em estudo pertencentes à Fazenda Pinheiro, obtidos na etapa anterior pelo PCI Geomatics. Estes números são do sistema RGB de cores onde cada cor é definida pela quantidade de

vermelho, verde e azul que a compõem, onde o número 0 indica ausência de intensidade e o número 255 indica intensidade máxima. Em seguida, fez-se a média para cada parcela.

Ainda fazendo uso do Microsoft Excel, no qual o objetivo é fazer o cálculo da reflectância, porém para isso é necessário a transformação do número digital em valores de radiância. A radiância é a intensidade do fluxo radiante por unidade de ângulo sólido e seu conceito pode ser comparado ao conceito de brilho, ou seja, um objeto é considerado mais brilhante quanto maior for sua radiância medida.

Para calcular a radiância em cada banda ($L_{\lambda i}$), utilizam-se os parâmetros radiância mínima e máxima, irradiância no topo da atmosfera e ganho do sensor, parâmetros que variam para cada banda (CHANDER et al., 2009). Além disso, são necessários outros parâmetros que dependem da data da imagem, como a distância Terra-sol e o ângulo de elevação solar.

Essas radiâncias representam a energia solar refletida por cada *pixel*, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, medida ao nível do satélite Landsat nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7. Para a banda 6, denominada banda termal, essa radiância representa a energia emitida por cada *pixel*. O conjunto da radiância monocromática de todas as sete bandas do TM Landsat 5 pode ser obtido pela Equação (13):

$$L_{\lambda i} = L_{\lambda min,i} + \frac{L_{\lambda max,i} - L_{\lambda min,i}}{255} DN \quad (13)$$

Onde $L_{\lambda min,i}$ e $L_{\lambda max,i}$ são as radiâncias espectrais mínimas e máximas, DN (*digital number*) é a intensidade do *pixel* que neste caso, varia de 0-255, e o índice corresponde às bandas espectrais 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, neste projeto, 3 e 4 do sensor TM.

Para o cálculo da reflectância também é necessário conhecer o valor de algumas variáveis. De todas elas, apenas o número digital do *pixel* varia dentro de uma imagem, sendo todas as demais constantes. Além do número π ($\pi = 3,141592\dots$) usado na transformação de graus para radianos, as variáveis que se mantêm constantes dentro de uma mesma imagem são: e = ângulo de elevação solar no momento da obtenção da imagem (dado da imagem); z = ângulo zenital solar ($90^\circ - e$); dda = dia do ano contado consecutivamente a partir de 1 de janeiro até a data da imagem; d = distância Terra-Sol em unidades astronômicas (LUIZ et al., 2003).

Ainda segundo os autores, a equação que descreve a transformação da imagem original em valores de reflectância corrigidos pode ser escrita da seguinte maneira:

$$Reflectânciab = jb \times (NDb - espalh_relativob) \quad (14)$$

$$\text{Onde } jb = ((\pi \times d^2) / ganhob) \div (Eb \times \cos(z))$$

z = ângulo zenital solar;

d = distância Terra-Sol em unidades astronômicas;

Eb = valor médio da irradiância solar total na banda b , em watts/(m²×µm).

5.4.3 Cálculo das variáveis biométricas da floresta

As variáveis biométricas estudadas foram: área basal, biomassa e volume, sendo que os cálculos realizados consideraram todos os indivíduos levantados nas unidades amostrais (parcelas).

A área basal foi computada como sendo a somatória das áreas transversais de todas as árvores por unidade de área, sendo expressa em m²/ha. Calculado pela seguinte fórmula (SILVA, 1979):

$$AB \text{ (m}^2\text{/ha)} = [(DAP^2/4 * \pi) * n^\circ \text{ árvores}] \quad (4)$$

A biomassa da vegetação, definida como sendo o peso seco de material vivo por unidade de área, foi estimada através do seguinte modelo (SCHUMACHER e HALL, 1933):

$$LNy = b_0 + b_1 * LN(DAP*DAP*H) \quad (5)$$

Em que: LN = logaritmo neperiano; y = biomassa, em kg; b_0 e b_1 = parâmetros do modelo; DAP = diâmetro a 1,3 m de altura, em cm; H = altura total, em m. O método escolhido foi considerado o mais adequado para a vegetação de floresta de eucalipto, onde levou-se em consideração apenas o fuste e casca das árvores para o cálculo justificado por ser o material com valores significativos para a empresa que forneceu os dados. Os valores de b_0 e b_1 (parâmetros do modelo) são oriundos do artigo de MELLO e GONÇALVEZ (2008), intitulado “Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas”, publicado na Revista *Árvore*; os quais determinaram, independentes do local, uma constante para estimativa da biomassa dos componentes das árvores em que b_0 e b_1

para fuste é: -4.59711 e 1.05811 e b0 e b1 para casca é: -5.65757 e 0.89106, respectivamente.

Para este trabalho, a fórmula adotada para o cálculo de volume de madeira por unidade de área foi:

$$v \text{ (m}^3\text{/ha)} = [((\text{DAP}^2/4 * \pi) * H) * f] \quad (3)$$

Onde f = fator de forma; o qual tem uma variação de acordo com a idade da planta.

Vale ressaltar que existem outras variáveis biométricas como densidade e biodiversidade, por exemplo, que não foram abordadas pois não apresentaram correlação com os dados de satélite e, lembrar que, para esta etapa do trabalho utilizou-se os dados da Fazenda Pinheiro.

5.4.4 Regressão época a época

Utilizando o Idrisi Kilimanjaro, o objetivo foi através da análise de correlação entre as variáveis independentes (variáveis digitais) e as variáveis dependentes (variáveis biométricas) obter a função de regressão com o modelo que melhor explica a dependência entre as variáveis. Visando relacionar os dados de campo com a utilização conjunta dos dados oriundos das imagens geradas, efetuaram-se análises de regressão múltipla pelo método *Stepwise*, podendo-se, assim, determinar a variável ou variáveis independentes que melhor explicassem a variação de cada variável dependente. Ressalta-se que as variáveis área basal, biomassa e volume foram consideradas variáveis dependentes e os valores digitais de reflectância (REF) e o índice de vegetação (NDVI), correspondentes às unidades amostrais, foram considerados variáveis independentes, obteve-se a equação padrão $y = a * \text{NDVI} + b * \text{REF} + c$ (eq. 15). O comando “Regress” do Idrisi é responsável pela regressão.

5.4.5 Primeira fase de verificação do método

De volta ao programa de computador Microsoft Excel com os dados da Fazenda Cascata, inicialmente verificou-se os valores encontrados de área basal, volume e biomassa pelo mesmo método utilizado na Fazenda Pinheiro, através das fórmulas já citadas anteriormente. Em seguida, aplicou-se a equação de regressão

encontrada no Idrisi referente aos dados da outra área de estudo, tendo assim um meio de verificação do método.

Para a próxima etapa, também como meio de verificação, com os dados do inventário florestal da Fazenda Cascata e utilizando o Idrisi Kilimanjaro, fez-se os cálculos de NDVI e reflectância fazendo uso das imagens de satélite, com destaque para o utilitário “VegIndex” para o cálculo do NDVI. O objetivo desta etapa foi encontrar a equação de regressão para cada parâmetro biométrico de cada ano da fazenda agora em estudo.

5.4.6 Segunda fase de verificação do método

No ArcGis, o primeiro passo foi georreferenciar a Fazenda Cascata, sabendo-se que quanto maior o número de pontos coletados, mais preciso é o georreferenciamento. Na sequência, efetuou-se a digitalização dos limites das áreas correspondentes as quadras em estudo, gerando assim geometrias do tipo polígono, conforme a Figura 17. Em seguida, converteu-se os polígonos vetoriais para uma estrutura *raster*. Acrescentou-se, em arquivo *.tif*, as duas imagens que já foram anteriormente processadas no Idrisi referentes à reflectância e ao NDVI. Fez-se a média dos pontos em cada parcela para NDVI e reflectância, a fim de encontrar o valor das coordenadas x e y médio através do centróide de cada parcela. Para assim, reunir todos os valores em uma única tabela, incluindo os valores de volume, biomassa e área basal.



Figura 17 - Parcelas da Fazenda Cascata sobrepostas à imagem de satélite no ArcGis

5.4.7 Regressão série temporal

Pode-se distinguir efetivamente as duas etapas do trabalho quando optou-se pela regressão série temporal como alternativa de atender as dificuldades encontradas nas informações analisadas da regressão época a época, detalhados no próximo tópico (item 6) de resultados e discussão da tese, ou seja, para obter um componente temporal e alcançar uma tendência estatística, modelos por regressão múltipla foram determinados ao adicionar o valor médio de cada parcela ano a ano ao longo do tempo.

Linguagem de programação e um ambiente para cálculo estatístico, o R contempla uma ferramenta para criação e manipulação de gráficos; o qual foi o instrumento escolhido para esta etapa.

Utilizou-se este programa de código aberto para modelar e investigar a relação entre as variáveis, conforme citado anteriormente (itens 4.15.2, 4.15.3 e 4.15.4), fazendo-se uso do recurso do comando `lm()` a fim de executar a regressão múltipla para análise estatística conjunta dos anos considerados, função equivalente ao comando “Regress” do Idrisi Kilimanjaro para cálculo da regressão.

O R foi utilizado também para a geração dos gráficos os quais facilitaram a interpretação das informações encontradas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise de regressão época a época

As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam os resultados obtidos na primeira etapa da discussão do trabalho. Para cada ano estudado, utilizando-se como variáveis independentes os valores digitais de reflectância e/ou índice de vegetação, uma equação referente ao volume, área basal e biomassa foi encontrada. Além do valor de R^2 ajustado proveniente de cada equação.

Tabela 4 - Equações de volume do período estudado e valores de R^2 ajustado (Fazenda Pinheiro)

ano	R^2 ajustado	equação:
2007	0.170511	$eq_vol_2007 = 306.5319 - 451.7395*eq_ndvi_2007 + 459.9947*eq_ref4_2007$
2008	0.128272	$eq_vol_2008 = 13.5136 + 97.7839*eq_ndvi_2008 + 319.0300*eq_ref4_2008$
2009	0.285729	$eq_vol_2009 = -1161.3818 + 2441.0828*eq_ndvi_2009 - 1612.6618*eq_ref4_2009$
2010	0.380342	$eq_vol_2010 = 591.5330 + 1480.2263*eq_ndvi_2010 - 4877.9718*eq_ref4_2010$

Tabela 5 - Equações de área basal do período estudado e valores de R^2 ajustado (Fazenda Pinheiro)

ano	R^2 ajustado	equação:
2007	0.091333	$eq_ab_2007 = 13.0331 - 8.4602*eq_ndvi_2007 + 25.6038*eq_ref4_2007$
2008	0.101831	$eq_ab_2008 = 4.8864 + 4.8127*eq_ndvi_2008 + 42.2395*eq_ref4_2008$
2009	0.455745	$eq_ab_2009 = -125.4093 + 241.6711*eq_ndvi_2009 - 114.4081*eq_ref4_2009$
2010	0.106177	$eq_ab_2010 = 36.3906 + 175.9454*eq_ndvi_2010 - 473.0489*eq_ref4_2010$

Tabela 6 - Equações de biomassa do período estudado e valores de R^2 ajustado (Fazenda Pinheiro)

ano	R^2 ajustado	equação:
2007	0.028722	$eq_bio_2007 = -9.7688 + 2818.6629*eq_ndvi_2007$
2008	0.221413	$eq_bio_2008 = -4800.0586 + 11564.6995*eq_ndvi_2008$
2009	0.764665	$eq_bio_2009 = -18539.5155 + 29659.9368*eq_ndvi_2009$
2010	0.068755	$eq_bio_2010 = -7529.0702 + 17680.3298*eq_ndvi_2010$

As tabelas acima trazem resultados baseados na equação padrão $y = a*NDVI + b*REF + c$ (15); verificando que fazendo-se uso dos cálculos de NDVI e reflectância dispondo das imagens de satélite pode-se determinar os parâmetros biométricos escolhidos. Para volume e área basal fez-se uso dos valores de reflectância da banda 4 e do índice de vegetação, onde $Volume = a*NDVI + b*REF4 + c$ (16) e $Área\ basal = a*NDVI + b*REF4 + c$ (17), para a biomassa, utilizou-se apenas o NDVI, onde $Biomassa = a*NDVI + b$ (18), a fim de obter equações de regressão com melhor resultado para cada parâmetro biométrico de cada ano da fazenda agora em estudo.

No entanto, os valores de R^2 ajustado apresentados nas tabelas 4, 5 e 6 não foram satisfatórios. Como descrito anteriormente (itens 4.15.3 e 4.15.4), o objetivo da análise estatística é saber a qualidade de uma amostra buscando regularidade presente nas observações na qual a regressão e correlação são técnicas estatísticas que se baseiam neste conceito de amostragem. O coeficiente de determinação (R^2) é utilizado no caso de uma regressão linear para verificação do quão bem o modelo se ajusta aos dados. As tabelas trazem valores de R^2 ajustado consideravelmente inferiores a 1, portanto insatisfatórios.

Nestas circunstâncias, na tentativa de solucionar este problema do coeficiente de determinação, volta-se a área inicial e ao invés de utilizar pontos aleatórios

de cada parcela para chegar as equações apresentadas nas Tabelas 4, 5 e 6, fez-se uma média de todos os pixels da área em questão, na ferramenta R.

Houve uma alteração também no que se diz respeito ao cálculo da biomassa citado anteriormente, e, outro critério importante modificado foi quanto as variáveis independentes. As variáveis independentes que melhor explicam a variância da variável dependente, são o NDVI e as reflectâncias da banda 3 e 4, dispendo-se da equação padrão agora representada por $\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2$ (eq. 19), tem-se a Tabela 7.

Tabela 7 - Variáveis independentes para cálculo dos parâmetros biométricos

y	x_1	x_2
Área Basal	NDVI	Reflectância banda 4
Volume	NDVI	Reflectância banda 4
Biomassa	NDVI	Reflectância banda 3

Assim, executou-se uma regressão múltipla para cada época, com recurso do comando `lm()` da ferramenta R já referido. Os resultados obtidos para o R^2 estão apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 - Valores de R^2 da Fazenda Pinheiro

Época	R^2		
	Área Basal	Volume	Biomassa
2007	0.1315	0.0751	0.0941
2008	0.1476	0.0369	0.0967
2009	0.0068	0.0446	0.0123
2010	0.4860	0.3562	0.4758

Tabela 9 - Valores de R^2 da Fazenda Cascata

Época	R^2		
	Área Basal	Volume	Biomassa
2007	0.3491	0.5297	0.5387
2008	0.3686	0.2229	0.2182
2009	0.3167	0.2572	0.4131
2010	0.2868	0.0483	0.1068

Os gráficos de regressão e resíduos da área basal para a época de 2008 estão representados na Figura 18 a título de exemplo, já que com os dados das tabelas 8 e 9, pode-se novamente constatar que os valores de R^2 são muito pequenos e por isso estatisticamente insignificantes.

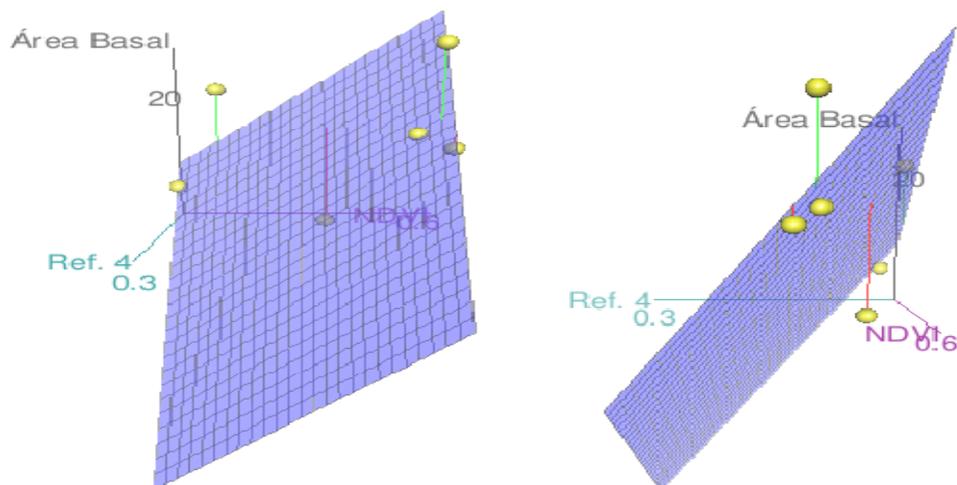


Figura 18 - Plano ajustado e representação dos resíduos da área na Fazenda Pinheiro à época 2008 em duas perspectivas

De posse dos resultados apresentados pode-se verificar que mesmo com os valores de R^2 insatisfatórios não se conclui a inexistência de correlação entre as variáveis dependentes e independentes, ou seja, outro fator, além da falta de correlação entre variáveis, esta presente.

Através de uma análise mais detalhada verificou-se que estes valores baixos do coeficiente de determinação são devido a pouca variabilidade dos dados.

Enquanto no trabalho de Maciel et al.(2009) citado anteriormente, existia uma floresta com grande variedade de espécies de árvores em diferentes estados de desenvolvimento, em nossa área de estudo passa-se exatamente o contrário, todas as árvores são da mesma espécie e a sua idade é constante para uma mesma época. Isto significa que, para um mesma época os valores tanto de área basal, volume e biomassa (variáveis dependentes) como os valores de NDVI e reflectância (variáveis independentes) pouco irão variar espacialmente, conforme Figura 18.

6.2 Análise de regressão série temporal

Na segunda etapa da discussão da tese os resultados referentes à análise de regressão da série temporal foram relatados.

É de conhecimento que o desvio padrão mostra o quanto de variação existe em relação ao valor esperado (média) e que um baixo desvio padrão indica

que os dados tendem a estar próximos da média, enquanto o desvio padrão alto indica que os dados estão espalhados por uma gama de valores. A Tabela 10 apresenta os valores médios e desvio padrão para cada uma das variáveis.

Tabela 10 - Média e desvio padrão para cada uma das variáveis (Fazenda Pinheiro)

Época		Área Basal	Volume	Biomassa	NDVI	REF 3	REF 4
2007	\bar{x}	15.168	104.750	58.036	0.730	0.039	0.346
	σ	0.977	9.060	4.624	0.010	0.001	0.014
2008	\bar{x}	19.309	162.802	88.400	0.588	0.051	0.265
	σ	1.105	10.993	6.821	0.014	0.001	0.008
2009	\bar{x}	21.838	109.521	100.521	0.647	0.040	0.265
	σ	1.498	13.819	8.339	0.008	0.000	0.007
2010	\bar{x}	24.965	268.003	145.834	0.533	0.058	0.256
	σ	1.673	16.794	10.701	0.007	0.001	0.005

Como o comportamento dos dados relativos à variação são muito semelhantes para as duas fazendas, apresentou-se na Tabela 10 os valores referentes à Fazenda Pinheiro. E, ao analisá-la, é visível a reduzida variação dos dados, ou seja, desvio padrão baixo.

A fim de contornar a falta de variabilidade de dados, mencionada anteriormente, decidiu-se estender a regressão à série temporal, como é possível verificar através da média e desvio padrão ao longo do período estudado para cada variável, como mostra a Tabela 11.

Tabela 11 - Média e desvio padrão para cada variável - série temporal (Fazenda Pinheiro)

	Área Basal	Volume	Biomassa	NDVI	REF 3	REF 4
\bar{x}	20.320	185.074	100.448	0.625	0.047	0.283
σ	3.872	62.084	33.477	0.075	0.008	0.039

Com esta variabilidade mais favorável, executou-se o ajustamento para toda a série temporal. Os resultados para o valor de R^2 encontram-se na Tabela 12 e como esperado, estes valores são substancialmente maiores que os obtidos para a regressão anterior.

Tabela 12 - Valores de R^2 da Fazenda Pinheiro e Cascata

Fazenda	R^2		
	Área Basal	Volume	Biomassa
Pinheiro	0.6746	0.7018	0.7100
Cascata	0.4530	0.5614	0.5102

Apesar de terem melhorado significativamente quando comparados com os valores obtidos para o caso anterior, os valores de R^2 mostraram-se como principal inconveniente à pesquisa por se apresentarem ainda baixos do ponto de vista estatístico, é importante destacar que para a Fazenda Pinheiro o valor encontrado próximo de 70% é considerado aceitável (tabela 12).

Os novos modelos obtidos com melhor ajuste, para a fazenda Pinheiro, foram:

$$\text{Área basal} = 46.1016 - 22.0824 * \text{NDVI} - 42.3719 * \text{REF4} \quad (20)$$

$$\text{Volume} = 613.4285 - 471.3079 * \text{NDVI} - 473.5523 * \text{REF4} \quad (21)$$

$$\text{Biomassa} = 545.1527 - 562.3361 * \text{NDVI} - 1999.1469 * \text{REF3} \quad (22)$$

E para a fazenda Cascata:

$$\text{Área basal} = 44.6752 - 29.4520 * \text{NDVI} - 9.7488 * \text{REF4} \quad (23)$$

$$\text{Volume} = 681.5558 - 586.2572 * \text{NDVI} - 259.7072 * \text{REF4} \quad (24)$$

$$\text{Biomassa} = 494.6741 - 498.1773 * \text{NDVI} - 860.8670 * \text{REF3} \quad (25)$$

As Figuras 19 a 24 apresentam os gráficos dos resíduos com os planos ajustados.

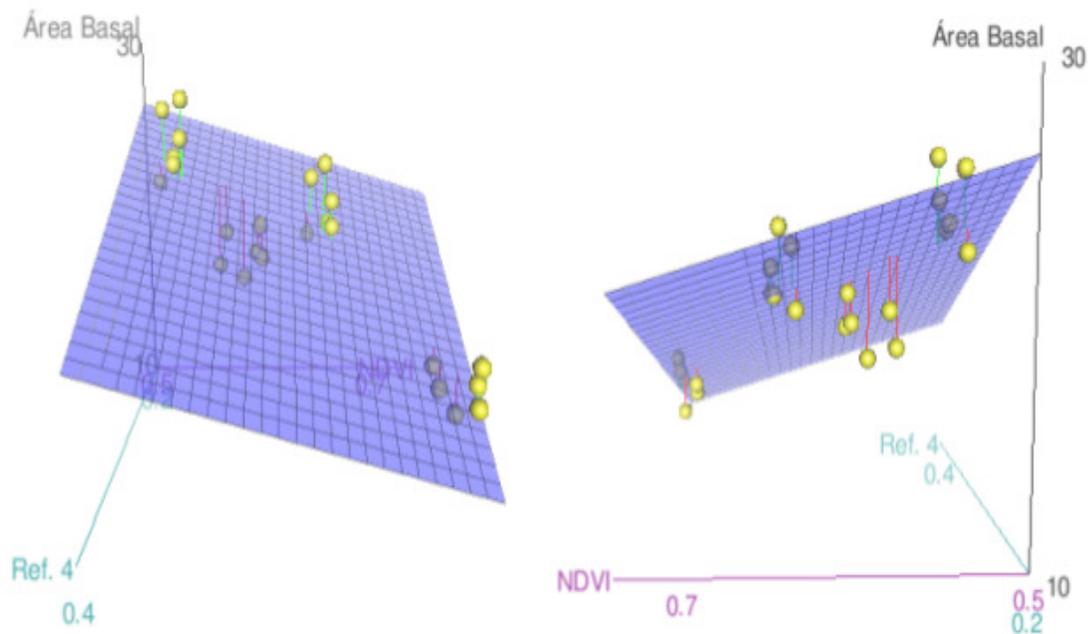


Figura 19 - Plano ajustado e representação dos resíduos da área basal na Fazenda Pinheiro em duas perspectivas

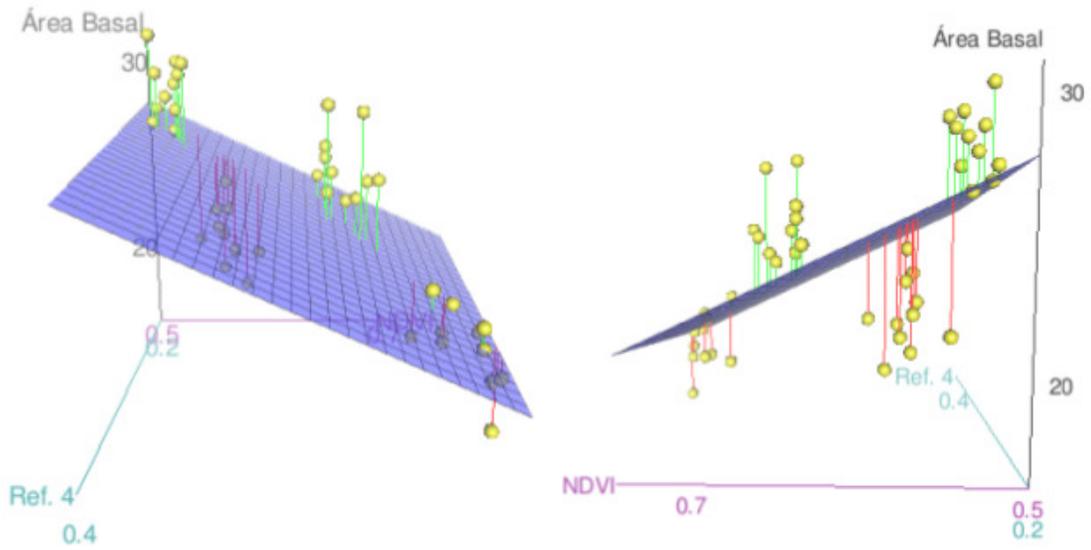


Figura 20 - Plano ajustado e representação dos resíduos da área basal na Fazenda Cascata em duas perspectivas

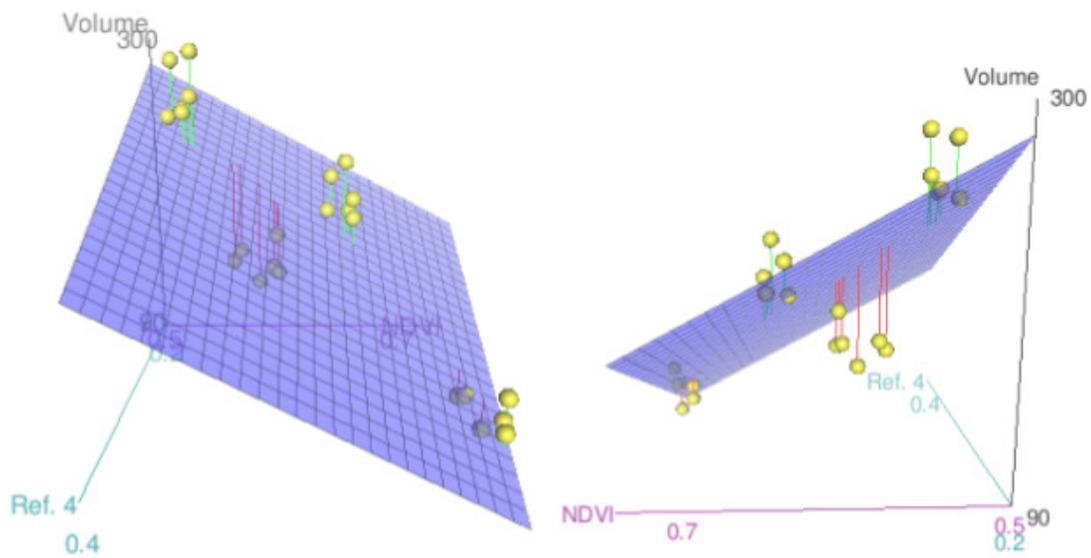


Figura 21 - Plano ajustado e representação dos resíduos do volume na Fazenda Pinheiro em duas perspectivas

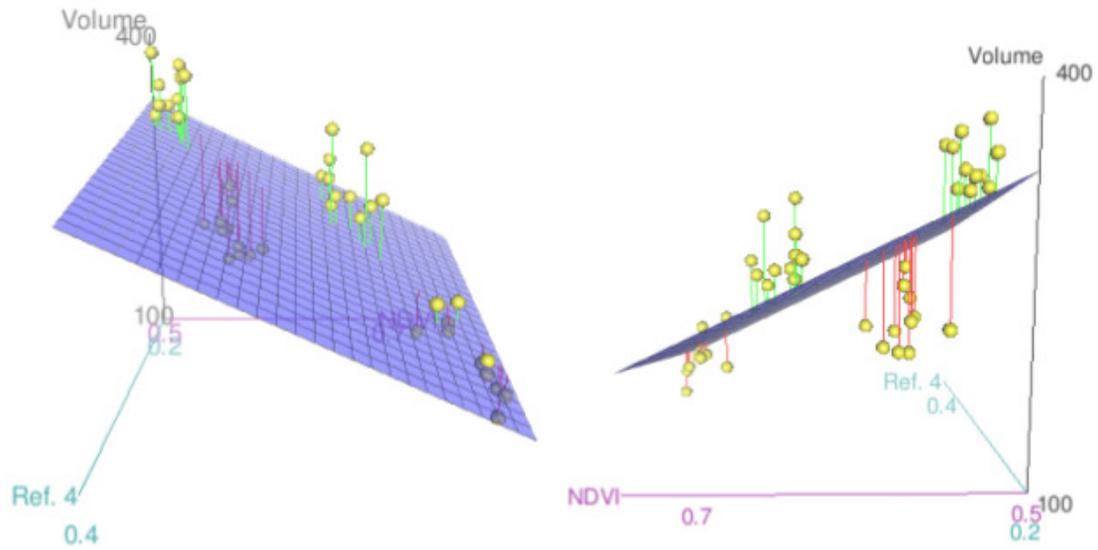


Figura 22 - Plano ajustado e representação dos resíduos do volume na Fazenda Cascata em duas perspectivas

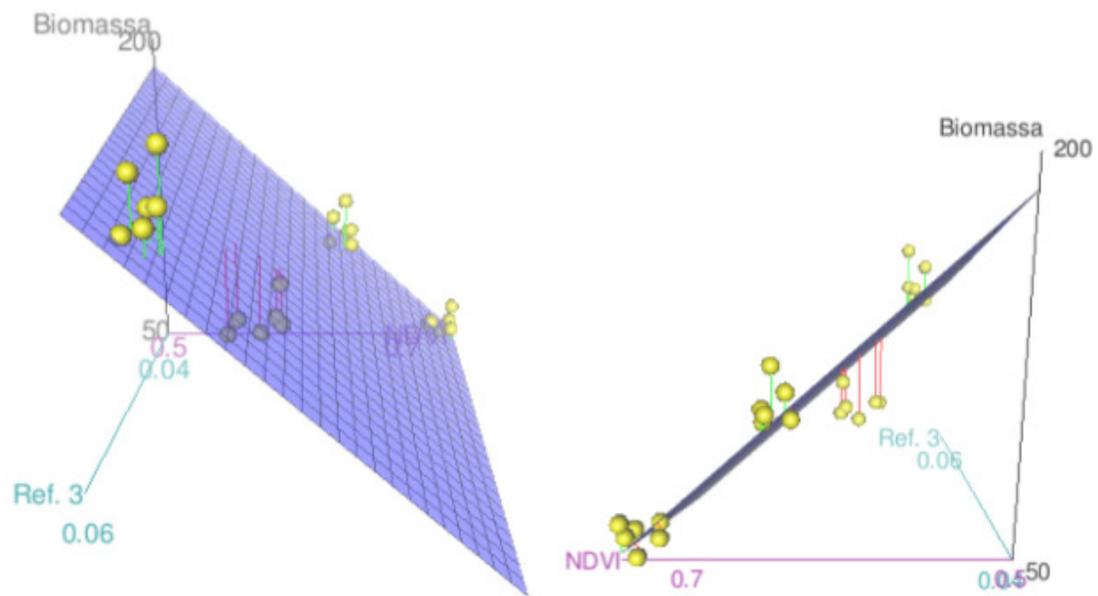


Figura 23 - Plano ajustado e representação dos resíduos da biomassa na Fazenda Pinheiro em duas perspectivas

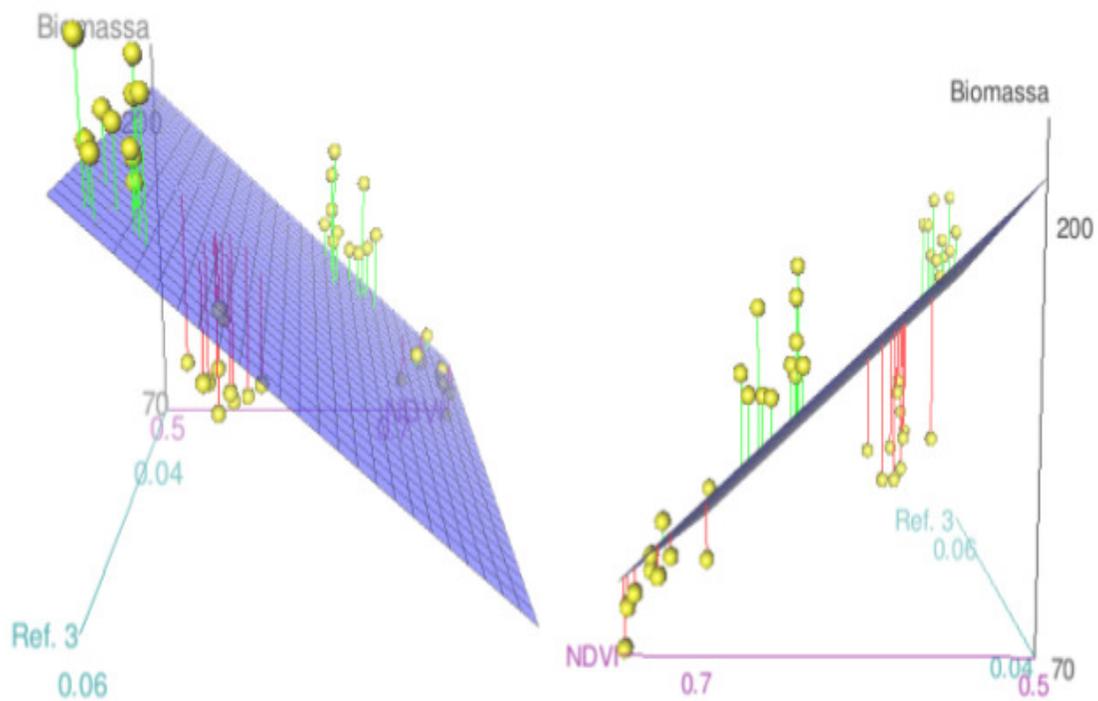


Figura 24 - Plano ajustado e representação dos resíduos da biomassa na Fazenda Cascata em duas perspectivas

Ao analisar os resíduos (Figuras 19 a 24), verifica-se que estes apresentam um padrão não aleatório. Este padrão é um padrão sistemático, claramente relacionado com a época de aquisição e se expressa de igual forma nas duas fazendas. Fenômeno este que se deve à diferenças relativa da camada atmosférica entre as épocas de aquisição, sendo considerado um problema típico de sensoriamento remoto quando se utilizam imagens para detecção de alterações em que o efeito relativo da atmosfera deve ser corrigido.

Segundo Yang (2000), através da técnica de normalização de todas as imagens a uma única época, ou seja, removendo-se o efeito relativo da atmosfera entre épocas para detecção de alterações a partir da diferença de imagens é uma maneira possível de resolver o problema dos resíduos não aleatórios ao longo do tempo. Técnica que envolve a aquisição de valores radiométricos de áreas que não tenham sofrido alterações ao longo do tempo, e que estejam presentes na imagem de referência e nas imagens a serem normalizadas. Com esses valores e por regressão linear determina-se os modelos de normalização que posteriormente são aplicados a todas as imagens, exceto à imagem da época de referência.

6.3 Análise de resultados

A análise estatística dos dados provenientes da medição de campo permite uma estimativa analítica da incerteza associada ao resultado final, sendo assim, o uso dos dados de campo através do inventário florestal foi um diferencial no desenvolvimento da pesquisa, assim como a avaliação da potencialidade de utilização das imagens de satélite na estimativa das principais variáveis dendrométricas onde a aparência da cobertura vegetal em uma imagem orbital é consequência de um processo complexo que envolve muitos parâmetros e fatores ambientais.

Na primeira etapa (item 6.1) os valores encontrados de R^2 foram muito baixos do ponto de vista estatístico, ou seja, com pouca significância estatística devido à falta de contraste dos dados. Para tornar significativos os métodos e as interpretações estatísticas é geralmente necessário dispor de um grande número de medidas, e, neste caso, as árvores são da mesma espécie e encontram-se na mesma fase de desenvolvimento apesar do estudo ter sido realizado em duas diferentes fazendas.

Como não há uma tendência, também devido a pouca variabilidade dos dados, não foi possível obter um único modelo universal para determinação dos parâmetros biofísicos na primeira etapa do trabalho, porém, obteve-se relação com as variáveis independentes onde o erro médio quadrático foi satisfatório.

Na segunda etapa, a série temporal possibilitou a determinação de modelos por regressão múltipla para estimativa de parâmetros estruturais deste tipo de floresta a partir de imagens de satélite, ou seja, ao adicionar várias épocas suprimiu-se o problema da reduzida variabilidade radiométrica, conforme item 6.2.

Atingindo-se o objetivo proposto com a obtenção dos modelos (equações 20 a 25), verificou-se um valor de R^2 próximo a 70% para a Fazenda Pinheiro, considerado um valor aceitável e de bom resultado comparado a levantamentos feitos em campo, já para a Fazenda Cascata manteve-se um baixo R^2 , Tabela 12. Ao analisar os resíduos tomou-se ciência de que não tinham um comportamento aleatório ao longo do tempo sendo a explicação mais plausível para este comportamento são os efeitos atmosféricos, visível nos gráficos de resíduos (Figuras 19 a 24).

O método aqui desenvolvido pode ser reaplicado para plantações de florestas de eucalipto com restrições quanto as condições consideradas, afinal os

resultados podem variar para outras espécies, estrutura e para outros métodos de determinação das variáveis.

7 CONCLUSÕES

Com maior disponibilidade de sensores com melhores resoluções espacial e espectral o presente estudo reforça o uso de técnicas de sensoriamento remoto possibilitando avaliações qualitativa e quantitativa mais detalhadas de florestas.

Dentre as limitações encontradas, a maior delas foi a variabilidade reduzida de tal forma que não foi suficiente para a determinação de uma única equação geral com a finalidade de obter resultados em árvores de diferentes características da cultura avaliada, como é demonstrado pelos valores de R^2 associados aos ajustamentos realizados.

A fim de suprimir o problema quanto à variabilidade reduzida, modelos por regressão múltipla foram determinados com a utilização dos dados de todos os anos considerados, assim, foi possível a estimação de parâmetros estruturais deste tipo de floresta a partir de imagens de satélite. Outra importante limitação verificada na análise dos resíduos é o contraste entre as camadas atmosféricas nas diferentes épocas de aquisições.

Observando as devidas restrições e os modelos com melhor ajuste estatístico, conclui-se que é possível utilizar imagens de sensores remotos para a ampliação da capacidade de geração de informações em cadastros florestais.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF: Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário Estatístico da ABRAF, ano base 2007**. Brasília: 2008. 90p.

ANTUNES, A. F. B. **Fundamentos de sensoriamento remoto em ambiente de geoprocessamento**: apostila do curso de geoprocessamento. Curitiba: UFPR, 2005.

ASSAD, M. L. L. Uso de um sistema de informações geográficas na determinação da aptidão agrícola de terras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, p. 133-139, 1995.

ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistemas de Informação Geográfica**: Aplicações na agricultura. 2 ed. Brasília: EMBRAPA - CPAC 1998. 434 p.

BARET, F.; GUYOT, G. **Potential and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment**. *Remote Sensing of Environment*, 35:161-173, 1991.

BAUERMANN, G. C. **Uso de imagens de sensores remotos na estimativa de características dendrométricas de povoamentos de eucalipto.** 2008, 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

BECKER, B. K; BUARQUE, C.; SACHS, I. **Dilemas e desafios do desenvolvimento sustentável no Brasil.** Rio de Janeiro: Garamond, 2007. 146 p.

BERGER, R. Métodos de valorização de recursos florestais. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6, Campos do Jordão, 1990. **Anais...** Campos do Jordão: SBS, 1990. p.55-60.

BOLFE, E. L.; FONSECA, E. L.; PEREIRA, R. S.; MADRUGA, P. R. A. Verificação da exatidão em classificação digital de povoamentos florestais em imagem orbital mediante três índices. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 4., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p.2671-2677.

BONHAM-CARTER, G. F. Geographic information systems for geoscientists. **Pergamon. Computer Methods in the Geosciences.** Ottawa: v. 13, p. 397, 1994.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resource assessment.** Nova Iorque: Oxford University Press, 1986. 194 p.

BUSSAB, W. de O. **Análise de variância e de regressão.** São Paulo: Atual, 1988.

CAETANO, M. **Detecção Remota:** manual da cadeira de detecção remota da Pós-Graduação e Mestrado em Ciência e Sistemas de Informação Geográfica. Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação da Universidade Nova de Lisboa: Lisboa, 2002.

CÂMARA, G.; DAVIS C.; MONTEIRO A.M.V. **Introdução à ciência da geoinformação.** São José dos Campos: INPE, 2004. 78 p.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; FUCKS, S. D.; CARVALHO, M. S. **Análise espacial e geoprocessamento**. São José dos Campos: INPE, 2002, p. 7.

CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J.; MITSUO II, F. **SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling**. Londres: Computers & Graphics, 1996. p. 395-403.

CAMPBELL, J. B. **Introduction to Remote Sensing**. 2 ed. Londres: Taylor & Francis, 1996.

CAMPOS, S.; ARAUJO JR., A. A.; BARROS, Z. X.; CARDOSO, L. G.; PIROLI, E. L. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao uso da terra em microbacias hidrográficas, Botucatu/SP. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 431-435, 2004.

CARVALHO FILHO, A. P. O engenheiro florestal e o manejo florestal sustentável. In: **EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-CPATU** Diagnóstico dos projetos de manejo florestal no estado do Pará – fase paragominas: Belém, 1996. p.48-52. (Relatório)

CARVALHO, A. D. F.; GERALDI, I. O. Histórico do melhoramento genético de eucalipto no Brasil. Disponível em: <<http://www.genetica.esalq.usp.br/pub/seminar/ADFCarvalho-200602-Resumo.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2012.

CHANDER, B. MARKHAM, D. HELDER. **Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors**, Remote Sensing of Environment - NASA, 113, p. 893 - 903, 2009.

CONFLOR. O que é Inventário florestal? Disponível em: <<http://www.conflor.com.br/index.php/faq/54-o-que-e-inventario-florestal-.html>>. Acesso em: 25 out. 2012.

COURA, S. M. C. **Mapeamento de vegetação do estado de Minas Gerais utilizando dados MODIS**. São José dos Campos: INPE, 2006. 129p.

CRÓSTA, A. P., **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas-SP, IG, 170 p. 1992.

CUNHA, U. S. Dendrometria e Inventário Florestal. **Série Técnica adaptada**. Escola Federal de Manaus. Manaus, p. 37-47, 2004.

DAP, Florestal. Qual a definição e importância da DAP? Disponível em: <<http://www.dapflorestal.com.br/area/faq>>. Acesso em: 25 out. 2012.

DEFRIES, R. S.; HOUGHTON, R. A.; HANSEN, M. C.; FIELD, C. B.; SKOLE, D.; TOWNSHEND, J. Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for 1980s and 1990s. **Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America**. V. 99, n. 22, p. 14256-14261, 2002.

DOSSA, D.; CANZIANI, J. R. **Trabalhador na administração rural: nível médio**. Curitiba: SENAR-PR, 1998. 86 p.

DOSSA, D.; SILVA, H. D.; BELLOTE, A. F. J.; RODIGHERI, H. R. **Produção e rentabilidade do Eucaliptos em empresas florestais**. Colombo: Comunicado Técnico Embrapa, n. 83, 2002.

DRAKE, J. B.; DUBAYAH, R. O.; KNOX, R. G.; CLARK, D. B., BLAIR, J. B. Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, Minnesota, v.81, p.378-392, 2002.

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004.

DUCATI, J. R., SEMMELMANN, F. R., GUASSELLI, L. A., DEPPE, F., MARTINS, R. L., KRELING, M. T., CAUDURO, G. **Inventário Florestal do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CEPSSRM/UFRGS, 1999.

ELVIDGE, C. D.; LYON, R. J. P. Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass. **Remote Sensing of Environment**, Minnesota, 17:265-279, 1985.

EMPRAPA, Florestas. Cultivo do Eucalipto: Importância socioeconômica e ambiental. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/01_01_historico.htm>. Acesso em: 25 out. 2012.

EMBRAPA, Florestas. Cultivo do Eucalipto. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/09_sistemas_agroflorestais.htm>. Acesso em: 25 out. 2012.

ENGESAT. Landsat 5 TM - Ficha Técnica Resumida. Disponível em: <<http://www2.engesat.com.br/?system=news&action=read&id=528>>. Acesso em: 4 nov. 2012.

FATORGIS. O que são geotecnologias. geoprocessamento - definições técnicas. Disponível em: <http://www.fatorgis.com.br/geotecnologias_tecnicas.asp>. Acesso em: 02 ago. 2007.

FAU, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. **Apostila de Estatística Aplicada**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2012.

FERNANDES, R.; MILLER, J. R.; HU, B.; RUBINSTEIN, J. G. A multiscale approach to mapping effective leaf area index in boreal *Picea marina* stands using high spatial resolution CASI imagery. **International Journal of Remote Sensing**, Nottingham, v. 23, p. 3547-3568, 2002.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de Satélite para Estudos Ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos. 2002.

FONSECA, A. D.; FERNANDES, J. C. **Detecção Remota**. Lisboa: Lidel, 2004.

FOODY, G. M.; PALUBINSKAS, G.; LUCAS, R. M.; CURRAN, P. J.; HONZAK, M. Identifying terrestrial carbon sinks: classification of successional stages in regenerating tropical forest from Landsat TM data. **Remote Sensing of Environment**, Minnesota, 205-216 p., 1996.

FORMAGGIO, A. R.; ALVES, S. D. & EIPHANIO, J. C. N. Sistemas de Informação Geográfica na obtenção de mapas de aptidão agrícola e de taxa de adequação de uso das terras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, p. 249-256, 1992.

FREITAS FILHO, M. R.; MEDEIROS, J. S. Análise multitemporal da cobertura vegetal em parte da Chapada do Araripe- CE, utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., 1993, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1993. p.73-80.

FREITAS FILHO, M. R. de, **Análise geoambiental com aplicação de geotecnologias nas nascentes do riacho dos Macacos: bacia do rio Acarajú-CE**. 2004, 91 f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2004.

GARCIA, E. A., **Caracterização física e química do solo e avaliação do desenvolvimento de plantas de eucalipto em função do espaçamento e da adubação, visando a colheita precoce para utilização em bioenergia**. 2010. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

GHILANI, C. D. **Adjustment Computations: Spatial Data Analysis**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2010.

GONG, P.; PU, R.; MILLER, J. R. Coniferous forest leaf area index estimation along the Oregon transect using compact airborne spectrographic imager data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Maryland, v.61, p. 1107-1117, 1995.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inventário Florestal do Estado de São Paulo**, p. 22-23, 1993.

GUERRA, G. L.; COSTA, D. P. da; SILVA, V. V. da; FERREIRA, A. M. M. Identificação dos padrões de uso e cobertura do solo através da aplicação de geotecnologias: o caso do Parque Estadual das Várzeas do rio Ivinhema, MS. Disponível em: <http://www.igeo.uerj.br/VICBG-2004/Eixo2/E2_085.htm>. Acesso em: 07 out. 2008.

HOLBEN, B.N.; TUCKER, C.J.; FAN, C.J. **Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 46:651-656, 1980.

HU, B.; INANNEN, K.; MILLER, J. R. Retrieval of leaf area index and canopy closure from CASI data over the BOREAS flux tower sites. **Remote Sensing Of Environment**. Minnesota, v. 74, p. 255-274, 2000.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Introdução ao Processamento Digital de Imagens: Manuais Técnicos em Geociências**. Rio de Janeiro: IBGE, 2000. n9.

IGEO. Tutorial de detecção remota. Disponível em: < http://www.igeo.pt/gdr/tutorial_gdr.php#sensores>. Acesso em: 10 fev. 2013.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). **Introdução ao sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE, 2001.

JACOVINE, L. A. G.; ALVES, R. R.; VALVERDE, S. R.; SILVA, M. L.; NARDELLI, A. M. B.; SOUZA, A. P. Processo de implementação da certificação florestal nas empresas moveleiras nacionais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.30, n.6, p.961-968, 2006.

JARDIM, F. de M. **Treinamento Avançada em Redes Wireless**. São Paulo: Digerati Books, 2007. 128 p.

JENSEN, J. **Introductory digital image processing**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. 316 p.

KAYATAKIRE, F.; HAMEL, C.; DEFOURNY, P. Retrieving forest structure variables based on image texture analysis and IKONOS-2 imagery. **Remote Sensing of Environment**, Minnesota, v. 102, p. 390-401, 2006.

KAYITAKIRE, F. **Forest stand characterisation using very high resolutions satellite remote sensing**. Tese (Doutorado em Ciências Agronômicas e Engenharia Biológica), Faculdade de Engenharia Biológica, Agronômica e Ambiental, Universidade Católica de Louvain, 2006.

KUNTSCHIK, G. **Estimativa de biomassa vegetal lenhosa em cerrado por meio de sensoriamento remoto óptico e de radar**. 2004. 154 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Ecologia, Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo: São Paulo, 2004.

KUOKAL, T. **Nonparametric Assessment of Forest Attributes by Combination of Field Data of the Austrian Forest Inventory and Remote Sensing Data**. Master Thesis, Universitat fur Bodenkultur Wien, 2004.

LEITE, R. M.; CLEMENTE, A.; GARCIA, R. **Análise de Regressão: uma ferramenta para a previsão de vendas**. São Paulo: USP, 2007.

LEPSCH, I. F., coord. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Campinas: Sociedade Brasileiro Ciência do Solo, 1991. 175p.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 3 ed. United States of América: John Wiley & Sons, 1994. 1040 p.

LIRA, V.; SILVA, B.; NETO, J.; FARIAS, M.; BEZERRA, M.; FRANCO, E.; ANDRADE, A. Análise espectral de índice de vegetação em área irrigada com cana-de-

açúcar. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Pitanga, vol 1, n1, 2009.

LU, D; MAUSEL, P.; BRONDIZIO, E.; MORAN, E. Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. **Forest Ecology and Management**, Melbourne, v. 198, p. 149-167, 2004.

LUCAS, R. M.; HONZAK, M.; DO AMARAL, I.; CURRAN, P. J.; FOODY, G. M. Forest regeneration on abandoned clearances in central Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, Nottingham, 23(5), 965–988, 2002.

LUIZ, A. J. B.; GÜRTLER, S.; GLERIANI, J. M.; EPIPHANIO, J. C. N.; CAMPOS, R. C. Reflectância a partir do número digital de imagens ETM+. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11. (SBSR), 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2071 - 2078.

MACIEL, M. N. M.; BASTOS, P. C. O.; CARVALHO, J. O. P.; WATRIN, O. S. Uso de imagens orbitais na estimativa de parâmetros estruturais de uma floresta primária no município de Paragominas, Estado do Pará. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, n. 52, p. 159-178, 2009.

MAHER, M. **Contabilidade de custos: criando valor para a administração**. São Paulo: Atlas, 2001.

MÄKELÄ, H.; PEKKARIEN, A. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. **Forest Ecology and Management**, Melbourne, v. 196 p. 245-255, 2004.

MATHER, P. M; **Computer Processing of Remotely-Sensed Images**. West Sussex: John Wiley & Sons, 1999, 292 p.

MATOS, O. C. de. **Econometria básica: teoria e aplicações**. São Paulo: Atlas, 1997.

MÄTZLER, C. **Physical Principles of Remote Sensing. Manuscript of the Lecture Course:** Manuscript of the Lecture Course. Switzerland: Institut Für Angewandte Physik (IAP), 2008.

MAUSEL, P.; WUY, L. **Spectral identification of successional stages following deforestation in the Amazon.** Hong Kong: Geocarto International, 1993, 4, p. 61-71.

MEGIATO, E. I.; GARRASTAZU, M. C.; KOESTER, E.; ALBA, J. M. F. **Geoprocessamento para delimitação da bacia hidrográfica do Arroio Pelotas.** Trabalhos acadêmicos de geoprocessamento desenvolvidos no laboratório de planejamento ambiental em 2007 Embrapa, 2007.

MELLO, S. L. M.; GONÇALVEZ, J. L. M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de Eucalyptus grandis em sítios com produtividades distintas. **Revista Árvore**, Viçosa, v.32, n.1, p.101-111, 2008.

MILONE, G.; ANGELINI, F. **Estatística aplicada.** São Paulo: Atlas, 1995.

MONTES, N.; GAUQUELIN, T.; BADRI, W.; BERTAUDIÈRE, V.; ZAOUÏ, E. H. A non-destructive method for estimating above-ground forest biomass in threatened woodlands. **Forest Ecology and Management**, Fort Collins, v.130, n.1, p.37-46, 2000.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGEE, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros.** Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação.** 3 ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 320p.

MOURA, C. S. **Física para o ensino médio:** gravitação eletromagnetismo e física moderna. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2011. 284 p.

MUCHONEY, D. M.; HAACK, B. N. Change detection for monitoring forest defoliation. **International Journal of Remote Sensing**, Nottingham, v.60, n.10, p.1243-51, 1994.

NARDELLI, A. M.; GRIFFITH, J. J. Modelo teórico para compreensão do ambientalismo empresarial do setor florestal brasileiro. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.6, p.855-869, 2003.

NASA. The Landsat program. Disponível em: < <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 2 out. 2007.

NASA. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – NASA's Earth Observing System, 2000.

NATURAL RESOURCES CANADA. Image Classification and Analysis. Disponível em: <<http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geography-boundary/remote-sensing/fundamentals/1920>> . Acesso em: 10 fev. 2013.

NOGUEIRA, J. de S.; LIMA, E. A. de. **Coletânea física ambiental I**. São Paulo: Baraúna, 2011.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1989.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 328 p.

OLIVEIRA, E. **Um sistema computadorizado de prognose do crescimento e produção de Pinus com critérios quantitativos para avaliação técnica e econômica de regimes de manejo**. 1995. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

OLIVEIRA, L. M. T.; SILVA, E. Diagnostico de fragmentos florestais nativos, em nível de paisagem, Eunápolis- BA. **Revista Árvore**, Viçosa, v.21, n.4, p.501-510, 1997.

OLIVEIRA, L.; PEREIRA, L.; PEREIRA, G.; MORAES, E.; MAEDA, E. Estudo da variabilidade de índices de vegetação através de imagens do ETM+/LANDSAT 7. **Anais...**

do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 5995-6002.

PARRESOL, B. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. **Forest Science**, Minnesota, v.45, n.4, p.573-593, 1999.

PEREIRA, M. N.; KURKDJIAN, M. L. N. O. de; FORESTI, C. **Cobertura e uso da terra através de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1989. 118 p.

PONZONI, F. J. **sensoriamento remoto no estudo da vegetação: diagnosticando a mata atlântica**. São José dos Campos: INPE, 2002.

PONZONI, F. J.; DISPERATI, A. A. **Comportamento espectral da vegetação**. São José dos Campos: INPE, 1995.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Relações entre índices de vegetação (NDVI e SAVI) e parâmetros biométricos de plantios de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus camaldulensis* em Cachoeira do Manteiga (MG). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 357-366, 1998.

PORTALACTION. Seleção Stepwise. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/954-sele%C3%A7%C3%A3o-stepwise>>. Acesso em: 18 set. 2012.

RAO, C.R. **Statistics: A technology for the millennium Internal**. v. 8, n. 1. Asian: J. Math. & Statist. Sci, 1999.

REICHHARDT, T. **First Photo From Space**. Washington: Air & Space Magazine, 2006.

REIS, A. **Recuperação de áreas florestais degradadas utilizando as sucessões e as interações planta-animal**. São Paulo: Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica e Secretaria do Meio Ambiente, 1999. 90p.

RIBEIRO, J. R. D. P. **A detecção remota no inventário florestal:** Análise das potencialidades da utilização das imagens de satélite. Dissertação (Mestrado em Ciência e Sistemas de Informação Geográficas), Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2007. 153 p.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento tecnologia transdisciplinar.** Juiz de Fora: Ed. Do Autor, 2000. 220 p.

ROCHA, J. C. da; GALVANIN, E. A. dos S.; JESUS, P. H. H. de; DALLACORT, R. Análise comparativa de índices de vegetação para detecção de bordas de talhões de culturas de cana-de-açúcar em imagens Landsat-TM. In: 3º SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL. **Anais...** 3º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Cáceres, MT, 2010. Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 514.

RODENACKER, K; BENGTSSON, E. **A feature set for cytometry on digitized microscopic images.** In: Analytical Cellular Pathology 25. Newark: IOS Press, 2003. p 1–36.

RODIGHERI, H.; GRAÇA. L. R. Análise econômica comparativa de dois sistemas de cultivos de erva-mate com rotação soja-trigo no sul do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 34., 1996, Aracaju. **Anais...** Brasília: SOBER, 1996. p. 1494-1504.

SAATCHI, S.; AGOSTI, D.; ALGER, K.; DELABIE, J.; MUSINSKY, J. Examining fragmentation and loss of primary forest in the Southern Bahian Atlantic forest of Brazil with radar imagery. **Conservation Biology**, Washington, 15(4): 867 – 875. 2001.

SABOGAL, C. **Manejo florestal empresarial na Amazônia brasileira.** Belém: CIFOR, 2006.

SANTIAGO, R. H. S. **Caracterização espectral e identificação de áreas afetadas pela seca de ponteiros do eucalipto do Vale do Rio Doce (SPEVRD) com ênfase em dados orbitais TM/LANDSAT.** 1988. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP. 1988.

SANTOS, M. L. M.; MATTOS, M. M.; PIRES, I. O.; BROWN, I. F.; ASSIS, W. S. Utilização de imagens de satélite no mapeamento preliminar do uso da terra e na capacitação de agricultores do médio Rio Capim - Paragominas - PA, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., 1993, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1993. 15 p.

SCHANDA, E. **Physical Fundamentals of Remote Sensing**. London: Springer-verlag, 1986.

SCHLERF, M.; ATZEBERGER, C.; HILL, J. Remote sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, Minnesota, v. 95, p. 177-194, 2005.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v.47, n.9, p.719-734, 1933.

SILVA, J. A. A.; PAULA NETO, F. **Princípios básicos de dendrometria**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Ciência Florestal, 1979, 191p.

SILVA, A. M. **Curso Processamento digital de imagens de satélite**. Porto Alegre: Centro de Eventos da PUCRS, 2001. Disponível em: < <http://www.cartografia.org.br> >. Acesso em: 19 fev. 2007.

SILVA, L.; COSTA FILHO, J. F. da; LIMA, E. R. V. de; ALMEIDA, H. A. de. Análise do albedo e do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) em uma bacia hidrográfica, usando o SEBAL - surface energy balance algorithm for land. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 2009, Viçosa. **Anais...** Viçosa: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2009.

SKIDMORE, A. K. An expert system classifies eucalipt forest types using thematic mapper data and a digital terrain model. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, vol. 55, n. 10., p. 1449-1464, 1989.

SKOLE, D.; TUCKER, C. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. **Science**, 260, p.1905-1910, 1993.

SOARES, A. M. L.; FILHO, M. R. F.; CARVALHO, M. S. B. S.; SOARES, Z. M. L. Aplicação de geotecnologias na identificação de conflitos entre o uso da terra e a legislação ambiental. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007, p. 2651-2657.

SOARES, V. P.; HOFFER, R. M. Detecção de mudanças em povoamentos de Eucalyptus spp e outros usos da terra através de imagens TM/LANDSAT-5 na região do vale do Rio Doce-MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 20, n. 1., p.117-127, 1996.

SOARES, V. P.; BRITES, R. S.; RIBEIRO, C. A. Á. S. **Avaliação da mudança da cobertura em áreas reflorestadas usando razão de bandas de imagens de satélite.** *Cerne*, v.4, n.1, p.22-34, 1998.

SOUSA, C. L. de. **Uso de imagens-índice e de imagens-proporção para avaliar a quantidade de madeira em povoamentos de Pinnus spp.** Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Flávio Jorge Ponzoni e Yosio Edemir Shimabukuro, aprovada em 04 de julho de 1997. São José dos Campos: INPE, 1997.

SOUZA, C. C. de; MOREIRA, A. de A.; SCHIMITH, R. S.; BRANDÃO, P. C.; SILVA, E. **Técnicas de sensoriamento remoto como subsídios aos estudos de florestas implantadas no Brasil – uma revisão bibliográfica.** *Ciência Florestal*, v. 17, n. 4, p. 409-417, 2007.

SPURR, S.H. **Photogrammetry and photointerretation.** Nova Iorque: Ronald Press, 1960. 472p.

STEVENSON, W. J. **Estatística aplicada à administração**. São Paulo: Harbra, 1986. The R Project for Statistical Computing Disponível em: <www.r-project.org>. Acesso em: 17 jun. 2013.

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

THIEL, C.; WEISE, S.; QUEGAN, C. S. Radar remote sensing for the delineation of forest cover maps and the detection of deforestation. **Forestry**, 79, p. 589 – 597, 2006.

TUCKER, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, Minnesota, 8, p.127-150, 1979.

VALENTE, R. O. A.; VETTORAZZI, C. A. Análise da estrutura da paisagem na Bacia do Rio Corumbatai, SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.62, p.114-129, 2002.

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

VILELA, M. F.; SOARES, V. P.; ADUAN, R. E.; FILHO, E. I. F.; PEREIRA, R. A.; RIBEIRO, C. A. A. S. Uso de imagens orbitais como base de dados para projetos de reforma agrária. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.4, p.627-638, 2005.

WARNECKE, L.; NANNI, R.; NEDOVIC-BUDIC, Z.; STITELER IV, W. **Remote Sensing and Geographic Information Technology in the Nation's 50 State Forestry Organizations**. Syracuse, New York: GeoManagement Associates Inc., 2002.

WILLSTATTER, R.; STOLL, A. **Untersuchungen uber die assimilation der kohlensaure**. Berlin: Springer, 1918.

WU, B.; XU, W.; ZHANG, Y.; TIAN, Y.; HUANG, J. **Evaluation of CBERS-2 CCD Data for Agricultural Monitoring.** In Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International, 2004.

XAVIER, A. C. **Estimativa de Propriedades Biofísicas de Plantações de Eucaliptos a partir de dados Landsat-TM.** Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. São José dos Campos: INPE, 1998. 116p.

XIMENES, A. C.; AMARAL, S. Predição de parâmetros estruturais de florestas tropicais a partir das técnicas de transformada de Fourier e delimitação manual de copas aplicadas em imagens de alta resolução espacial. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 3, n. 11, p.202-207, mar. 2010.

YANG, X.; LO, C. P.. Relative Radiometric Normalization Performance for Change Detection from Multi-Date Satellite Images. **Photogrammetric Engineering And Remote Sensing**, Athens Ga Usa, v. 8, n. 66, p.967-980, 2000.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H.; HODGES, J. C. F.; GAO, F.; REED, B. C.; HEUTE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, Minnesota, v. 84, p. 471-475, 2003.