



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.05.22.38-TDI

**CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL A PARTIR DE  
MODELOS EMPÍRICOS E AVALIAÇÃO DO MODELO  
GRART NA CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE  
DOSSÊIS DE *Eucalyptus* spp.**

Ludmila Roque Ferraz Pacheco

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelos Drs. Flávio Jorge Ponzoni, e Rogério Costa Campos, aprovada em  
28 de maio de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37EJB4P>>

INPE  
São José dos Campos  
2010

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):****Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

**Membros:**

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr<sup>a</sup> Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTARIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.05.22.38-TDI

**CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL A PARTIR DE  
MODELOS EMPÍRICOS E AVALIAÇÃO DO MODELO  
GRART NA CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE  
DOSSÊIS DE *Eucalyptus* spp.**

Ludmila Roque Ferraz Pacheco

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelos Drs. Flávio Jorge Ponzoni, e Rogério Costa Campos, aprovada em  
28 de maio de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37EJB4P>>

INPE  
São José dos Campos  
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Pacheco, Ludmila Roque Ferraz Pacheco.

P115c Caracterização estrutural a partir de modelos empíricos e avaliação do modelo GRART na caracterização espectral de dosséis de *Eucalyptus* spp. / Ludmila Roque Ferraz Pacheco. – São José dos Campos : INPE, 2010.

xxvi+166 p. ; ( sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.05.22.38-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Orientadores : Drs. Flávio Jorge Ponzoni, e Rogério Costa Campos.

1. Eucalyptus. 2. Caracterização estrutural. 3. Modelo GRART. 4. Caracterização espectral. I.Título.

CDU 528.88: 582.776.2)

---

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de Mestre em  
Sensoriamento Remoto

Dr. João Roberto dos Santos



---

Presidente / INPE / SJCampos - SP

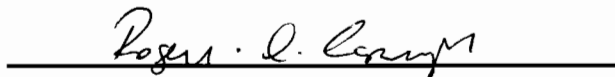
Dr. Flávio Jorge Ponzoni



---

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Rogério Costa Campos



---

Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

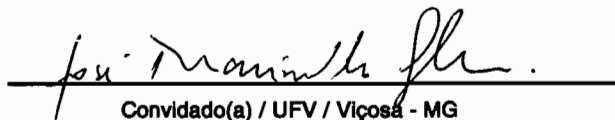
Dr. Lênio Soares Galvão



---

Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. José Marinaldo Gleriani



---

Convidado(a) / UFV / Viçosa - MG

Aluno (a): Ludmila Roque Ferraz Pacheco

São José dos Campos, 28 de maio de 2010



*"Uma jornada de duzentos quilômetros começa com um simples passo."*

PROVÉRBIO CHINÊS





*A meus pais, Regina e Mário, minhas irmãs, Larissa e Lenina e meu amor, Bernard dedico. Obrigada por sempre estarem ao meu lado. O que realmente importa nesta vida são vocês e os momentos que estamos juntos.*

*AMO VOCÊS!*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Agradeço meus orientadores, Dr. Flávio Jorge Ponzoni e Dr. Rogério de Costa Campos, pelo apoio imensurável, pela dedicação, por tornarem este trabalho possível.

Agradeço ao amigo Clódis de Oliveira Filho, à amiga Sandra Benfica pela ajuda no trabalho de campo e, pela ajuda durante estes dois anos.

Agradeço ao amigo, mestre, Márico Mello Pupin pela essencial ajuda nas análises estatísticas realizadas neste trabalho.

Agradeço aos doutorandos Cleber e Arnaldo pela disponibilidade cedida sempre que precisei.

Agradeço ao mestre Gustavo Bayma pelos ensinamentos em alguns aplicativos para o processamento das imagens.

Agradeço ao amigo Hiran pela ajuda com os aplicativos gráficos.

Agradeço à equipe da empresa FIBRIA pelo acolhimento na semana de realização do trabalho de campo, pela compreensão, atenção, ensinamento, disponibilidade de tempo e dedicação.

Agradeço ao exemplar funcionário da empresa FIBRIA, Luciano, pelo apoio, pela paciência e disposição na ajuda da coleta dos dados.

Agradeços aos demais funcionários que tornaram possível a realização da coleta dos dados de campo, em especial ao César.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro dado nestes dois anos de pesquisa.

Agradeço ao pessoal da secretaria de pós-graduação, Vera, Lucas, Laís, Valéria pelo apoio, carinho, incentivo, e por me aturarem nestes dois anos.

Agradeço ao meu maior amigo e amor, Bernard, conseguimos chegar até aqui.

Agradeço ao meu sempre orientador Fábio Ricardo Marin pelo apoio no começo desta jornada.

Agradeço à meus pais, que compreenderam minha ausência em muitos momentos de alegria familiar.

Agradeço à turma de 2008 pela amizade e companheirismo.



## RESUMO

Modelos empíricos e modelos fundamentados na teoria da transferência radiativa são aplicados atualmente para a extração de informações quantitativas a partir de dados espectrais e de suas relações com os parâmetros biofísicos de um dossel vegetal. Neste trabalho ambos os modelos foram aplicados com objetivo de adquirir informações: estrutural e espectral de dosséis de *Eucalyptus* spp. (eucalipto). Correlações foram avaliadas entre os dados dendrométricos e de densidade de dosséis ( $D$ ) de eucalipto coletados na Unidade Capão Bonito da empresa FIBRIA e dados radiométricos extraídos de imagens do sensor TM/Landsat 5, provenientes de duas passagens (datas próximas à coleta de dados em campo) sobre a área de estudo. Os resultados indicaram que as maiores correlações foram identificadas nas relações estabelecidas entre as dimensões da copa e a altura dos dosséis com dados da banda espectral do infravermelho próximo independentemente da data de passagem do satélite. As estimativas da distribuição espacial de dados dendrométricos e de  $D$  fundamentadas na caracterização espectral foram consistentes em relação à distribuição espacial das idades dos plantios para o período de realização do trabalho. Foram aplicados testes estatísticos para avaliar diferenças de desempenho de modelos empíricos definidos a partir de dados radiométricos de datas diferentes. Os resultados indicaram que houve diferença significativa de desempenho entre os modelos estabelecidos a partir de dados provenientes de datas diferentes. O modelo de transferência radiativa *GRART* (*Geometrically Arbitrary Radiative Transfer*) foi aplicado no método direto para a estimativa de FRB espectral dos dosséis de eucalipto a fim de analisar se os valores estimados pelo modelo representariam adequadamente a dinâmica espectral destes dosséis quando comparados com os dados radiométricos extraídos das imagens os quais serviram de referência. A aplicação do modelo *GRART* no estudo da reflectância de dosséis de eucalipto foi feita considerando dois modos distintos de operação do modelo, a primeira considerando a direção da linha de plantio e a segunda desconsiderando a direção das linhas de plantio. Os resultados indicaram que o desempenho do modelo no estudo da reflectância dos dosséis de eucalipto não foi satisfatório principalmente nas bandas da região espectral do visível. O melhor desempenho do modelo *GRART* foi obtido quando as direções das linhas de plantio não foram consideradas como dados de entrada no modelo.



# **STRUCTURAL CHARACTERIZATION FROM EMPIRICAL MODELING AND GRART MODEL EVALUATION IN THE *Eucalyptus* spp. CANOPIES SPECTRAL CHARACTERIZATION**

## **ABSTRACT**

Empirical modeling and models based on transfer theory have been applied to estimate quantitative information from spectral data and from their relationships with canopy biophysical parameters. Both modeling strategies have been explored here in order to estimate structural and spectral information from *Eucalyptus* spp. (eucalipto) canopies. Correlations between biophysical and structural (D) data provided by FIBRIA enterprise (Capão Bonito headquarters) and TM/Landsat 5 spectral data of eucalipto canopies from two different dates have been evaluated. Results indicated that higher correlations have been observed to crown dimension and tree high with the NIR spectral data, independent on the image date. The spatial distribution of the biophysical data seemed to be consistent according to the stand ages. Statistical tests have been applied to evaluate the performance of the empirical modeling strategy. Results indicated significant performance differences considering the image date. The transfer model GRART (Geometrically Arbitrary Radiative Transfer) was applied in the direct mode to the eucalipto canopy spectral RF estimation in order to evaluate the their spectral characterization by GRART comparing to the spectral characterization carried out by the TM/Landsat 5 images. The GRART application was carried out considering and not considering the plantation line orientations. Results showed that GRART model has not presented satisfactory performance mainly in the visible bands. The best results of the GRART application has been achieved when the plantation line orientations are considered.





## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Efeitos provocados na irradiância solar que atinge a superfície da Terra, provocados pela atmosfera. ....	9
Figura 2.2 - Comportamento espectral de uma folha sadia. ....	10
Figura 2.3 - Classes de distribuição angular. ....	13
Figura 2.4 - Influência da geometria do dossel na sua reflectância. ....	14
Figura 2.5 - Esquema dos fatores que envolvem o sensoriamento remoto da vegetação. ....	19
Figura 2.6 - Possíveis geometrias de plantas que podem ser consideradas no modelo. .	26
Figura 2.7 - Variação arbitrária das plantas no estande nas posições $x$ alinhado com a direção Norte-Sul e $y$ alinhado com a direção Leste-Oeste. ....	26
Figura 2.8 - Representação de um estande com estrutura <i>lattice</i> (a) e estrutura em linha (b). ....	27
Figura 3.1 - Localização geográfica da Unidade Florestal de Capão Bonito. ....	33
Figura 3.2 - Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: Município de Capão Bonito. ...	34
Figura 3.3 - Unidades de Conservação no município de Capão Bonito. ....	36
Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia. ....	38
Figura 4.2 - Exemplo da amostragem dos parâmetros realizada em 10 árvores subsequentes, em uma mesma linha de plantio, sendo arbitrária a escolha da primeira árvore. ....	39
Figura 4.3 - Aquisição das medições da Densidade de cobertura do dossel utilizando o densitômetro, segundo Stumpf (1993) (a); Formato do circuito percorrido dentro de cada talhão (b). ....	41
Figura 4.4 - Medições radiométricas coletadas das folhas utilizando o espectrorradiômetro SPECTRON SE-590 acoplado à esfera integradora LICOR 1800. ....	42
Figura 4.5 - Condições de geometria de aquisição para as medições radiométricas de solo e serrapilheira. ....	43
Figura 4.6 - Amostras de solo (a) e amostras de serrapilheira (b). ....	44
Figura 4.7 - Produtos dos dados SRTM: declividade (a) e orientação das vertentes (b) do limite da Unidade Florestal de Capão Bonito. ....	49
Figura 4.8 - Representação dos elementos considerados para definição das classes de iluminação: posição solar nas datas de aquisição da imagem (1), do relevo (2) e orientação das vertentes (3). ....	52

Figura 4.9 - Desvio dos dados observados $Y_i$ em torno da linha de regressão ajustada.	59
Figura 4.10 - Imagens de alta resolução disponibilizadas no aplicativo “Google Earth” e utilizadas para coleta das coordenadas de dois pontos dentro de cada talhão para informação da direção da linha de plantio. ....	62
Figura 4.11 - Funções filtro de resposta do sensor TM/Landsat5. Os números identificam as funções filtro de cada Banda (1, 2, 3, 4) respectivamente. .	64
Figura 5.1 - Variação dos parâmetros biofísicos coletados em campo em função da idade, Diâmetro à Altura do Peito (a), Altura total (b), Altura Comercial (c), Altura da Copa (d), Raio da Copa (e) e Densidade da Cobertura do dossel (f). ....	69
Figura 5.2 - Fotografias das linhas de plantio e abertura da copa em plantações com 1 ano de idade (a); e em plantações com mais de seis anos de idade. ....	71
Figura 5.3 - Exemplos da variação dos materiais orgânicos que cobrem o solo variando de acordo com as características ambientais e idade dos talhões, nesta ordem, 1 ano (a), 2 anos (b), 3 anos (c), 4 anos (d), 5 anos (e), 6 anos (f), 7 anos (g), 8 anos (h) e 9 anos (i). ....	73
Figura 5.4 - Valores FRDH médios obtidos a partir das 30 amostras de serrapilheira os quais foram empregados nas simulações computacionais. ....	74
Figura 5.5 - Valores FRDH, FTDH e absortância médios obtidos a partir dos três tipos de folhas os quais foram empregados nas simulações computacionais. ....	75
Figura 5.6 - Imagens correspondentes aos dias 22.04.2009 (A) e 24.05.2009 (B) corrigidas radiometricamente e geometricamente do sensor TM/Landsat5 que foram utilizadas no trabalho. ....	76
Figura 5.7 - Histograma dos valores obtidos por meio do cálculo da equação do fator de iluminação para imagem do dia 22.04.2009 (a) e para imagem do dia 24.05.2009. ....	78
Figura 5.8 - Classes de iluminação referentes à imagem do dia (a) 22.04.2009 e (b) 24.05.2009. ....	79
Figura 5.9 - Espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 espécie 1(a); espécie 3(c) e espécie 5(e); espectros médios extraídos das imagens do dia 24.05.2009 espécie 1(b); espécie 3(d); espécie 5(f). (Conclusão).....	85
Figura 5.10 - Distribuição espacial da idade dos plantios florestais de eucalipto na Unidade Florestal de Capão Bonito na época da realização do trabalho de campo. ....	89
Figura 5.11 – Mapas temáticos relativos à distribuição espacial de parâmetros dendrométricos e estruturais elaborados a partir do estabelecimento de modelos de regressão linear. (Conclusão) .....	92
Figura 5.12 - Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 e os espectros médios simulados para espécie 1(a); espécie 3(c); espécie 5(e); Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens	

do dia 24.05.2009 e os espectros médios simulados para espécie 1(b); espécie 3(d); espécie 5(f). (Conclusão) .....	99
Figura 5.13 - Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 e os espectros médios simulados para espécie 1(a); espécie 3(c); espécie 5(e); Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 24.05.2009 e os espectros médios simulados para espécie 1(b); espécie 3(d); espécie 5(f). (Conclusão) .....	107
Figura 5.14 - Gráficos de dispersão dos dados simulados pelo modelo <i>GRART</i> e os dados observados nas imagens TM para a data 22.04.2009 (a, b, c, d) e para data 24.05.2009 (e, f, g, h) para as quatro faixas espectrais (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo – Banda 1, 2, 3 e 4) respectivamente. (Conclusão).....	109
Figura 5.15 - Gráfico de dispersão dos dados simulados pelo modelo <i>GRART</i> e os dados observados nas imagens TM para a data 22.04.2009 (a, b, c, d) e para data 24.05.2009 (e, f, g, h) para as quatro faixas espectrais (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo – Banda 1, 2, 3 e 4) respectivamente. (Conclusão).....	115



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 4.1 - Características da geometria de iluminação e visada das duas imagens utilizadas. ....	45
Tabela 4.2 - Valores de $L_{max\lambda}$ e de $L_{mín\lambda}$ utilizados na equação para o cálculo da radiância no topo da atmosfera na faixa espectral $\lambda$ . ....	47
Tabela 4.3 - Combinações realizadas considerando a orientação das vertentes e a declividade do terreno. ....	51
Tabela 5.1 - Idade e espécies dos 30 talhões visitados em campo. ....	68
Tabela 5.2 - Dados que representam a geometria de visada e iluminação das duas passagens do satélite. ....	77
Tabela 5.3 - Classes de iluminação para cada parcela visitada em campo. ....	80
Tabela 5.4 - Parcelas selecionadas para a caracterização espectral dos dosséis de eucalipto. ....	81
Tabela 5.5 – Coeficientes de correlação ( $r$ ) entre variáveis dendrométricas e estruturais e os valores de FR. ....	87
Tabela 5.6 - Valores calculados para o teste z. ....	93
Tabela 5.7 - Média da diferença entre os valores MSPR e MSE calculados para os 10.000 ajustes para cada imagem. ....	94
Tabela 5.8 – Parâmetros dendrométricos medidos nas parcelas alocadas nos dosséis de eucalipto, dados cadastrais fornecidos pela empresa e dados coletados na literatura. ....	95



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

FR	Fator de reflectância
IAF	Índice de area foliar
DAP	Diâmetro a altura do peito
H	Altura total das árvores
INFORM	Invertible Forest Reflectance Model
Hymap	Hyperspectral mapper
FRB	Fator de reflectância bidirecional
$R^2$	Coefficiente de determinação
PROSPECT	A model leaf optical properties spectra
GRART	Geometrically Regular Arbitrary Radiative Transfer
FDRB	Função de distribuição da reflectância bidirecional
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
TM	Thematic mapper
SKYL	Parcela do fluxo difuso
$\theta_s$	Ângulo zenital solar
$\psi_s$	Ângulo azimutal solar
FRDH	Fator de Reflectância Direcional Hemisférico
FTDH	Fator de Transmitância Direcional Hemisférico
DAF	Distribuição angular de folhas
$f(\theta_1, \psi_1)$	Função de densidade de distribuição
$\theta_1$	Inclinação da folha em relação a normal
$\psi_1$	Orientação azimutal da folha
IV	Índices de vegetação
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
R	Resultado da interação da radiação com o sistema total
a	Características da fonte
b	Interação da radiação com a atmosfera
c	Interação da radiação com a vegetação
d	Interação da radiação com o solo
e	Características do sensor

GO	Geometria Óptica
C	Contribuição da radiância proveniente da fração radiométrica da copa iluminada
Fc	Fração radiométrica da copa iluminada
G	Contribuição da radiância proveniente da fração radiométrica do solo iluminado
Fg	Fração radiométrica do solo iluminado
T	Contribuição da radiância proveniente da fração radiométrica da copa sombreada
Ft	Fração radiométrica da copa sombreada
Z	Contribuição da radiância proveniente da fração radiométrica do solo sombreado
Fz	Fração radiométrica do solo sombreado
SAIL	Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves
1-SKYL	Fluxo direto
Cfa	Clima subtropical
Cfb	Clima subtropical
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis
SR	Sensoriamento Remoto
E(1,2,3,4,5,6 e 7)	Espécie1, Espécie2, Espécie3, Espécie4, Espécie5, Espécie6 e Espécie7
GPS	Global Positioning System
Ht	Altura do tronco/comercial
Rc	Raio da copa
D	Densidade de cobertura do dossel
LARAD	Laboratório de Radiometria
DSR	Divisão de Sensoriamento Remoto
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
$\rho\lambda$	Reflectância aparente
$L\lambda$	Radiância no topo da atmosfera na faixa espectral $\lambda$
d	Distância Terra-Sol



$E_{sun\lambda}$	Irradiância solar no topo da atmosfera na faixa espectral $\lambda$
$L_{max\lambda}$	Radiância máxima quando $QCAL = QCAL_{max}$
$L_{min\lambda}$	Radiância mínima quando $QCAL = 0$
$QCAL$	Valores dos números digitais referentes e proporcionais a radiância no topo da atmosfera
$QCAL_{max}$	Valor Máximo do número digital quando $L\lambda = L_{max\lambda}$
6S	Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum
$r_t$	Vetor direcional terreno
$r_s$	Vetor direcional iluminação
$\theta_t$	Declividade
$\psi_t$	Imagem azimuth/orientação da vertente
NE – SE	Direção nordeste - sudeste
SE-SO	Direção sudeste-sudoeste
SO-NO	Direção sudoeste-noroeste
NO-NE	Direção noroeste-nordeste
$r$	Coefficiente de correlação de Pearson
$\hat{Y}_i$	Variável dependente
$X_i$	Variável independente
$\beta_0$ e $\beta_1$	Parâmetros da regressão linear
Z	Normal Padrão
SRTM	Shuttle Radar Topograph Mission
ND	Número Digital
MSPR	Erro médio quadrático de predição
MSE	Erro médio quadrático
SSE	Quadrado da soma dos erros
$\rho_b$	Reflectância espectral efetiva após a convolução
$\rho_\lambda$	Reflectância espectral modelada no intervalo espectral da banda ( $\lambda_{min}$ , $\lambda_{max}$ );
$f(\lambda)d\lambda$	função de resposta do sensor normalizada no intervalo espectral da banda
$D_x$	Espaçamento em x
$D_y$	Espaçamento em y



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Hipóteses do trabalho .....	4
1.2 Objetivo Geral .....	5
1.3 Objetivos Específicos .....	5
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>7</b>
2.1 Reflectância de vegetação .....	8
2.1.2 Efeitos da arquitetura e do solo no transporte da radiação no dossel .....	11
2.2 Métodos empíricos utilizados na extração de informações quantitativas da vegetação. ....	16
2.3 Modelos fundamentados na teoria da Transferência Radiativa.....	18
2.3.1 Modelos híbridos - Geometria Óptica (GO) e Transferência de Radiação .....	23
2.3.2 O modelo <i>Geometrically Arbitrary Radiative Transfer (GRART)</i> .....	23
2.3.3 Descrição do modelo <i>GRART</i> .....	25
2.4 Efeito da topografia na irradiância .....	28
2.5 A cultura do eucalipto.....	29
<b>3 ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>33</b>
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>37</b>
4.1 Seleção da área de estudo e coleta de dados de campo .....	39
4.1.1 Medidas Radiométricas .....	42
4.2 Dados Orbitais .....	44
4.2.1 Imagens do sensor TM/Landsat5.....	45
4.2.2 Registro das imagens e correção atmosférica.....	45
4.3 Considerando a influência da geometria de iluminação na disposição do terreno	48
4.3.1 Extração dos valores de fator de reflectância das imagens .....	53
4.4 Caracterização estrutural: definição dos modelos de regressão .....	54
4.4.1 Avaliação e comparação dos modelos de regressão.....	56
4.5 Aplicação do modelo de transferência radiativa <i>GRART</i> .....	60
4.5.1 Avaliação das simulações do modelo <i>GRART</i> .....	63
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>67</b>
5.1 Dados coletados em campo .....	67
5.2 Medidas radiométricas: folhas e serrapilheira.....	72

5.3 Imagens Orbitais: localização espacial das parcelas coletadas em campo.....	75
5.4 Classes de fator de iluminação e extração dos valores de fator de reflectância das imagens.....	77
5.4.1 Caracterização espectral dos dosséis florestais a partir dos dados radiométricos TM/Lansat 5 .....	81
5.5 Modelos empíricos: mapeamento.....	87
5.5.1 Análise da consistência dos resultados nas diferentes datas.....	93
5.6 Aplicação do modelo <i>GRART</i> .....	94
5.6.1 Considerando a orientação das linhas de plantio: caracterização espectral.....	96
5.6.2 Desconsiderando a orientação das linhas de plantio: caracterização espectral ..	103
5.6.3 Considerando a orientação das linhas de plantio: análises estatísticas.....	108
5.6.4 Desconsiderando a orientação das linhas de plantio: análises estatísticas .....	113
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>119</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>121</b>
<b>APÊNDICE A. ....</b>	<b>131</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>133</b>
<b>APÊNDICE C. ....</b>	<b>135</b>
<b>APÊNDICE D. ....</b>	<b>141</b>
<b>APÊNDICE E.....</b>	<b>151</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em trabalhos envolvendo a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto no estudo da vegetação as estimativas quantitativas de parâmetros biofísicos e/ou bioquímicos são amplamente utilizadas em diversas aplicações, como nas ecológicas, nas meteorológicas, na agricultura e na silvicultura (PINTY et al., 2004; HABOUDANE et al., 2004; SCHLERF; ATZBERGER, 2006; COLOMBO et al., 2008; SANTIS et al., 2009; HOUBORG et al., 2009). Estes parâmetros são frequentemente requeridos, por exemplo, em modelos de produtividade e na realização de inventários florestais. Como exemplo destes parâmetros pode-se citar o índice de área foliar (*IAF*), o diâmetro a altura do peito (*DAP*) e a altura das árvores (*H*) os quais são indispensáveis para o conhecimento do desenvolvimento das plantas e este último utilizado como variável essencial na estimativa do volume de madeira de florestas plantadas, as quais são destinadas a suprir a demanda crescente por madeira que é atualmente a matéria-prima utilizada para produção de diversos bens de consumo. Tais estimativas são então viabilizadas mediante o desenvolvimento de modelos empíricos e modelos físicos. Estes últimos são muitas vezes referenciados como modelos fundamentados na teoria da transferência radiativa (LIANG, 2004; SCHLERF; ATZBERGER, 2006; DARVISHZADEH et al., 2008; COLOMBO et al., 2008; HOUBORG et al., 2009).

Os modelos empíricos são baseados em relações estatísticas estabelecidas entre variáveis da superfície terrestre e dados detectados remotamente (reflectância, índices de vegetação etc) (SCHLERF et al., 2005). Especificamente para o caso da aplicação das técnicas de sensoriamento remoto no estudo da vegetação, nem todas as variáveis que influenciam no processo de interação entre a radiação eletromagnética e o dossel vegetal são consideradas no estabelecimento de tais relações. Os modelos empíricos são de fácil aplicação, mas são restritos a certo conjunto de dados que os geraram e não exploram relações de causa e efeito (LIANG, 2004). Apesar disso, ainda são utilizados por diversos autores na extração de informações quantitativas de dosséis vegetais a partir de dados de sensoriamento remoto.

Os modelos fundamentados na teoria da transferência radiativa são considerados atualmente alternativas promissoras por permitirem analisar a interação da radiação incidente no dossel (reflexão, absorção e transmissão) com os elementos intrínsecos e extrínsecos à vegetação (folhas, troncos, colmos, flores, frutos e inclusive o solo) levando ainda em consideração os aspectos geométricos tanto da incidência da radiação, quanto da coleta dos dados, estabelecendo relações de causa e efeito (LIANG, 2004). Estes modelos se servem do conhecimento do sistema físico envolvido no processo de interação da radiação com o dossel e, também podem servir como base para extração de variáveis de interesse da vegetação a partir de medições espectrais (KIMES et al., 2000; HUENNERICH, 2001; SCHLERF; ATZBERGER, 2006; CAMPOS, 2008; SANTIS et al., 2009; BARRY et al., 2010).

Goel (1988) descreveu como *sentido direto* a aplicação dos modelos de transferência radiativa na estimativa da reflectância da vegetação a partir de um conjunto de dados espectrais, geométricos e biofísicos que constituem as variáveis de entrada no modelo. O autor descreveu ainda o sentido “inverso” dessa aplicação, caracterizada então pela estimativa de parâmetros biofísicos da cobertura vegetal mediante o conhecimento de valores de Fatores de Reflectância (FR)<sup>1</sup> extraídos de dados remotamente coletados. Assim, é possível então explorar abordagens quantitativas na análise de dados radiométricos provenientes de dosséis vegetais por meio da aplicação de modelos de transferência radiativa e a exatidão e a confiabilidade dos resultados desse sentido inverso podem ser ao menos primeiramente conhecidas pelo desempenho dos modelos aplicados no sentido direto (PINTY et al., 2001; COMBAL, 2002; SCHLERF;

---

<sup>1</sup> Reflectância é uma propriedade do objeto e não pode ser diretamente medida. Ela pode ser estimada mediante o cálculo de Fatores de Reflectância que relacionam a intensidade da radiação refletida por um objeto pela intensidade da radiação incidente em específicas regiões espectrais.

ATZBERGER, 2006). No sentido inverso então, dados radiométricos (gerados a partir de dados detectados remotamente) são usados como dados de entrada para estimar as propriedades biofísicas e/ou bioquímicas do dossel (SCHLERF; ATZBERGER, 2006; COLOMBO et al., 2008; SANTIS et al., 2009), tais como: o índice de área foliar, o conteúdo de água nas folhas, o conteúdo de clorofila etc (GEMMELL & VARJO, 1999; SCHLERF; ATZBERGER, 2006; HOUBORG et al., 2007; COLOMBO et al., 2008; DARVISHZADEH et al., 2008; BARRY et al., 2010).

Nas últimas décadas quantidade significativa de modelos de transferência radiativa foi desenvolvida. Eles operam em diferentes níveis de sofisticação e são capazes de representar efeitos unidimensionais ou tridimensionais a custos computacionais bem diferenciados (PINTY et al., 2001).

Com objetivo de estimar parâmetros biofísicos de dosséis de *spruce*, Schlerf e Atzberger (2006), parametrizaram o modelo denominado *INFORM* (do inglês, *Invertible Forest Reflectance Model*) com dados de campo, e posteriormente compararam os dados de FRB (Fator de reflectância bidirecional) simulados pelo modelo com os dados medidos pelo sensor *Hymap* (do inglês, *Hyperspectral mapper*). Após a certificação de que os dados simulados eram realísticos em relação aos dados medidos, os autores inverteram o modelo utilizando, para isso, redes neurais. O coeficiente de determinação obtido mediante a relação entre os parâmetros biofísicos estimados pelo modelo e os parâmetros coletados em campo foram de  $R^2=0,73$  para o *IAF* (índice de área foliar),  $R^2=0,54$  para cobertura da copa e  $R^2=0,77$  para a densidade do tronco.

Santis et al. (2009) uniram dois modelos de transferência radiativa e demonstraram melhoria da precisão em relação aos métodos empíricos utilizados anteriormente na estimativa e no mapeamento da severidade das áreas queimadas em florestas da região europeia próxima ao Mar Mediterrâneo. Os modelos utilizados foram: *PROSPECT* (do inglês, *A model of leaf optical properties spectra*) (JACQUEMOUD, 1990) que é amplamente utilizado em nível foliar e estima a reflectância e a transmitância da folha a partir de uma série de parâmetros de entrada; e o outro modelo, denominado *GeoSAIL*,

desenvolvido por Huemmrich (2001), que considera dados em nível de dossel e que, segundo os autores, representaria melhor as estruturas complexas das florestas da região do Mar Mediterrâneo localizadas na Espanha e a Portugal.

O modelo *GRART* (do inglês, *Geometrically Regular Arbitrary Radiative Transfer*) proposto por Campos (2008) é um modelo tridimensional híbrido que simula a interação da radiação dentro de dosséis com plantas regularmente arranjadas, como plantações de café, de Eucalyptus, de citrus, e ainda culturas anuais no início do ciclo fenológico. Campos (2008) apresentou o modelo e avaliou seu desempenho na estimativa da Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional (FDRB) de dosséis de cafezais tipicamente descontínuos e regulares. A avaliação do desempenho do modelo foi feita a partir da reflectância medida pelo sensor *ASTER* (do inglês, *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*). O autor mostrou que perante os resultados encontrados em seu trabalho, o modelo apresenta bom desempenho para estudos de dosséis agrícolas descontínuos e regulares ao demonstrar conexão lógica entre FRB modelado e os parâmetros biofísicos do dossel. Neste contexto, o modelo *GRART* constitui alternativa promissora, para o entendimento do processo de interação da radiação eletromagnética em dosséis esparsos e para a estimativa de parâmetros biofísicos quando este for bem parametrizado.

### **1.1 Hipóteses do trabalho**

- ✓ Existem relações empíricas entre os dados radiométricos extraídos de imagens obtidas através do sensor *Thematic Mapper* do satélite Landsat 5 (TM/Landsat5) e dados dendrométricos coletados em campo de dosséis de eucalipto.
- ✓ As relações empíricas podem ser utilizadas para a caracterização estrutural dos dosséis de eucalipto.
- ✓ A caracterização espectral de dosséis de eucalipto provenientes da aplicação do modelo *GRART* apresenta o mesmo comportamento observado da caracterização espectral dos dosséis provenientes dos dados radiométricos extraídos das imagens de satélite do sensor TM/Landsat5.



- ✓ Os valores de FRB simulados pelo modelo *GRART* característicos dos dosséis de eucalipto são similares aos dados radiométricos do sensor TM/Landsat5.
- ✓ O modelo *GRART* é uma alternativa para a modelagem do processo de interação da radiação com dosséis de eucalipto.

## **1.2 Objetivo Geral**

Estabelecer modelos empíricos que relacionam dados radiométricos com dados dendrométricos visando conhecer o potencial dos primeiros na predição de dados dendrométricos para o conjunto de dados utilizado e, mediante esse conhecimento, avaliar o potencial do modelo *GRART* na caracterização espectral de dosséis de eucalipto.

## **1.3 Objetivos Específicos**

- ✓ Caracterizar estruturalmente dosséis de eucalipto pertencentes à empresa FIBRIA a partir de dados coletados em campo e dados radiométricos do sensor TM/Landsat5 provenientes de duas passagens do satélite mediante aplicação de modelos empíricos;
- ✓ Avaliar o desempenho dos modelos empíricos obtidos e validá-los com novos conjuntos de dados;
- ✓ Caracterizar espectralmente os dosséis de eucalipto a partir de dados radiométricos do sensor TM/Landsat5 provenientes de duas passagens do satélite e a partir de dados radiométricos simulados pelo modelo *GRART*, comparando os resultados, e;
- ✓ Avaliar quais parâmetros biofísicos estariam mais relacionados às diferenças obtidas entre os valores de FRBs simulados pelo modelo e aqueles extraídos das imagens do sensor TM/Landsat5, utilizando para isso regressões lineares múltiplas.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Estabelecer relações qualitativas e quantitativas entre os dados radiométricos coletados por sensores colocados a bordo de plataformas aéreas ou orbitais e as variáveis biofísicas e geofísicas de objetos tem se constituído o objetivo principal das pesquisas relacionadas com o sensoriamento remoto (PINTY et al., 2001). A estimativa de propriedades da superfície terrestre a partir de dados de sensoriamento remoto óptico tem sido objeto de estudos, desde que medidas resultantes da interação da radiação incidente com os objetos da superfície terrestre foram realizadas e disponibilizadas por sensores a bordo de plataforma orbitais ou mesmo aéreas (JACQUEMOUD et al., 2000). Para o estudo da vegetação modelos empíricos e físicos são aplicados para o estabelecimento das relações quantitativas entre os dados radiométricos e os parâmetros biofísicos da vegetação. Ambas as modelagens são exploradas e utilizadas com diferentes graus de sucesso no estudo da vegetação.

Desta forma, na fundamentação teórica será abordada breve descrição do processo de interação da radiação eletromagnética com os elementos da vegetação. Além disso, serão mencionados os meios pelos quais informações quantitativas de dosséis vegetais são extraídas a partir de dados radiométricos coletados remotamente. Destacando-se modelos empíricos e os modelos com embasamento físico. Será abordada descrição breve sobre os modelos com embasamento físico, a fim de introduzir o leitor ao assunto e ainda prepará-lo para a sucinta descrição do modelo GRART, o qual foi utilizado neste trabalho. Objetivou-se com isso, repassar ao leitor o “nicho” que o modelo se enquadra. Também será abordada sucinta apresentação sobre os efeitos da topografia na irradiância, pois como um dos objetivos específicos deste trabalho foi verificar se os valores de FRB simulados pelo modelo, o qual não considera os efeitos topográficos na irradiância, apresentariam a mesma dinâmica dos dados de FR extraídos das imagens orbitais as quais são afetadas por tais efeitos, necessitou-se buscar alternativas que suavizassem estas interferências. Por fim, breve histórico e as características da cultura de plantios florestais de eucalipto, os quais foram utilizados neste estudo, são apresentadas.

## 2.1 Reflectância de vegetação

A compreensão da dinâmica espectral de dosséis vegetais diferencia-se do comportamento espectral de uma folha isolada (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007). Para estudar a vegetação a partir de técnicas de sensoriamento remoto, além da compreensão da interação da radiação eletromagnética com as folhas isoladas necessita-se também do conhecimento desta interação com os diversos elementos constituintes dos dosséis. Segundo GOEL, 1988 são inúmeros os fatores que determinam a refletância de um dossel. Entre estes fatores podem ser destacados: o fluxo solar que incide sobre o dossel, as propriedades ópticas e estruturais dos elementos do dossel e do solo.

No topo do dossel, basicamente incidem dois tipos de fluxos: o fluxo direto (aquele que não foi interceptado pela atmosfera) e o fluxo difuso (parcela do fluxo que foi espalhada na direção descendente), denominado por GOEL (1988) de SKYL. Dependente das condições atmosféricas (principalmente das partículas de poeira e vapor d'água), a fração SKYL varia com o comprimento de onda, sendo maior na região do visível (400 – 700 nm) do que na região do infravermelho próximo (800 – 1100 nm) (Figura 2.1). Os ângulos, zenital solar  $\theta_s$  e azimutal solar  $\psi_s$ , caracterizam a direção do fluxo direto, enquanto que o fluxo difuso é caracterizado por sua distribuição angular (NICODEMUS et al. 1977; GOEL, 1988).

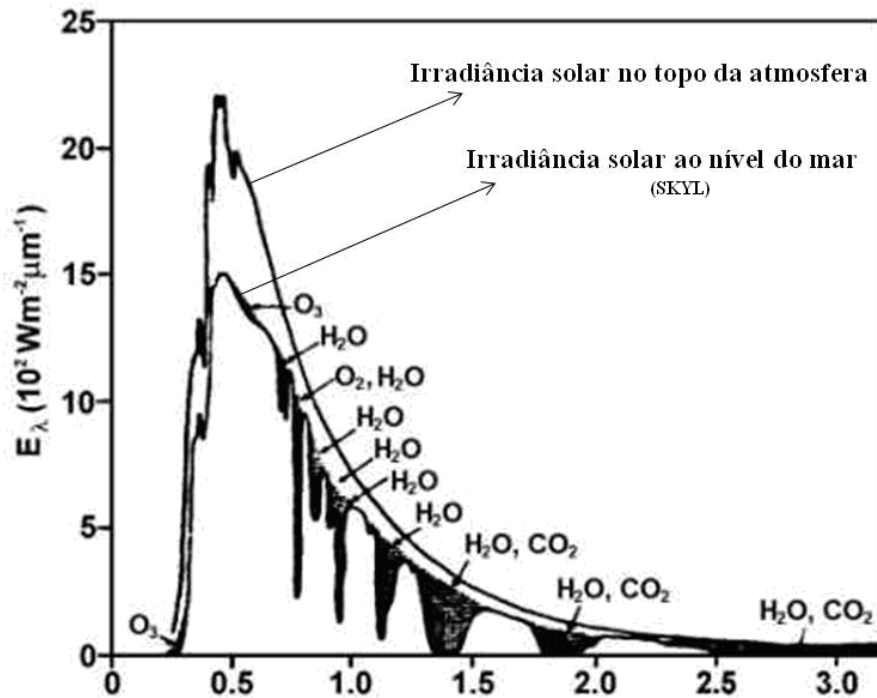


Figura 2.1 - Efeitos provocados na irradiância solar que atinge a superfície da Terra, provocados pela atmosfera.

Fonte: Adaptado de PONZONI e SHIMABUKURO (2007).

Devido aos muitos elementos constituintes dos dosséis (folhas, galos, troncos, flores etc.), o fluxo solar incidente está sujeito a dois processos: a absorção e o espalhamento. O processo de espalhamento pode ser dividido em dois sub-processos: a reflexão e a transmissão através dos elementos constituintes do dossel. A direção e o destino do fluxo que incide sobre esses elementos dependem das características deste fluxo incidente (como o comprimento de onda, ângulo de incidência e polarização) e das características destes elementos (propriedades superficiais, estrutura celular, composição química etc.).

Considerando a folha como um destes elementos, a reflexão da radiação eletromagnética consiste de duas partes: a reflexão especular (ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão) e a reflexão difusa. Da mesma maneira, a fração transmitida consiste da porção refratada e da difusa. A análise conjunta dos três principais processos (absorção, transmissão e a reflexão) permite a compreensão do processo de interação da radiação com a vegetação, e resulta no estudo dos fatores

influentes (químicos e estruturais) na reflexão da radiação por folhas isoladas e por dosséis vegetais. (GAUSMAN, 1969; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

A caracterização espectral de folhas isoladas tem sido realizada em laboratórios com condições ambientais controláveis (GAUSMAN et al., 1969), com fontes de iluminação posicionadas próximo à vertical (normal a superfície de uma das faces da folha), ou ainda utilizando esferas integradoras que permitem estimar valores de Fatores de Reflectância Direcional Hemisférico (FRDH) e/ou de Fator de Transmitância direcional Hemisféricas (FTDH) das faces ventrais e dorsais da folha. Basicamente, o comportamento espectral de uma folha isolada sadia se assemelha com o descrito graficamente na Figura 2.2.

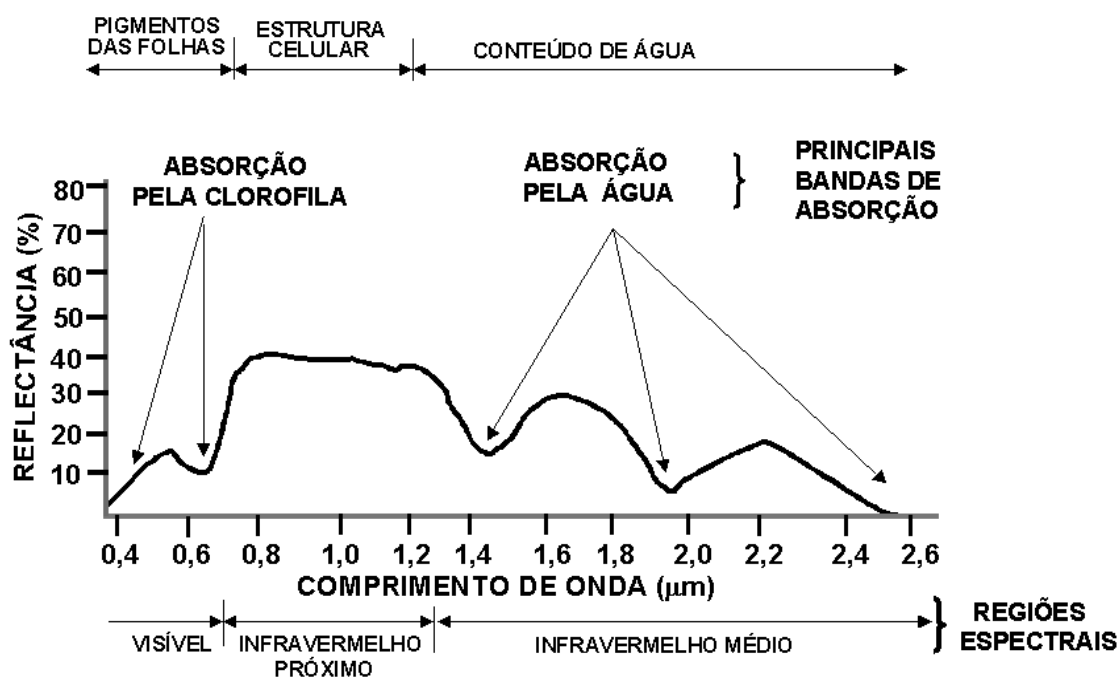


Figura 2.2 - Comportamento espectral de uma folha sadia.  
 Fonte: Adaptado de PONZONI e SHIMABUKURO (2007)

Na Figura 2.2, é apresentando o espectro de reflectância de uma folha sadia, para o intervalo de comprimento de onda entre 0,4 a 2,6µm. Para análise da dinâmica espectral da folha, o espectro será dividido em três regiões espectrais, quais sejam: visível, infravermelho próximo e infravermelho médio.

Na região do visível os elementos responsáveis pelas regiões de absorção e relativa maior reflexão na região do verde são os pigmentos presentes nas folhas (carotenóides, clorofila, xantofilas entre outros). A maioria destes pigmentos absorve a energia proveniente da região do azul e do vermelho. Existem pigmentos que absorvem a energia proveniente da região do verde, por exemplo. Porém, a abundância de pigmentos como as clorofilas (clorofila a e clorofila b) e as suas coincidentes bandas de absorção na região do azul tendem a dominar e acabam mascarando o efeito de outros pigmentos presentes. A absorção na região do vermelho pela clorofila é diretamente proporcional à quantidade destes pigmentos presentes nas folhas (KESHIN, 1957 apud PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; TAGEEVA et al., 1960).

Na região do infravermelho próximo há dominância da reflexão da folha. O predomínio desta reflexão é resultado do espalhamento da radiação que ocorre dentro da estrutura foliar (espalhamento interno). Este espalhamento é fruto da interação da radiação com as diversas estruturas internas presentes nas folhas. De maneira geral, quanto mais lacunosa for à estrutura interna da folha, maior será o espalhamento interno da radiação incidente, e assim, maiores serão os valores de reflectância (GAUSMAN et al., 1969)

Na região do infravermelho médio a água localizada no interior das folhas é responsável pelas principais bandas de absorção nesta região (ASNER, 1998). A relação existente entre a quantidade de água presente nas folhas e as bandas de absorção observadas nesta faixa espectral é diretamente proporcional. Ou seja, quanto menos umidade presente nas folhas menores serão as bandas de absorção nesta região, e conseqüentemente maior será o brilho. As bandas de absorção provocadas pela água nesta região espectral tendem ofuscar bandas de absorção provocadas por outros constituintes bioquímicos (como exemplo, lignina e celulose) (ASNER, 1998; GAUSMAN, 1985).

### **2.1.2 Efeitos da arquitetura e do solo no transporte da radiação no dossel**

A modelagem do espalhamento do fluxo solar incidente no dossel não leva em conta apenas a caracterização espectral (absorção e espalhamento) de seus elementos constituintes, mas também suas densidades e orientações. O fluxo que incide sobre os elementos do dossel (por ex. a folha) é proveniente da parcela da radiação que não foi

interceptada por nenhum elemento do dossel e da parcela da radiação que foi interceptada e então espalhada por esses mesmos elementos. Da mesma maneira que os elementos constituintes do dossel, o sensor recebe diversos tipos de fluxos, como por exemplo, o fluxo espalhado apenas a partir de um elemento da vegetação (espalhamento único); o fluxo espalhado por diversos elementos do dossel (espalhamento múltiplo), mas sem atingir o solo, o fluxo refletido pelo solo sem ter sido interceptado por elementos do dossel e o fluxo refletido pelo solo e interceptado pelos elementos do dossel e espalhado na direção do sensor (GOEL, 1988; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Goel (1988) considera representativos da arquitetura do dossel, a distribuição espacial dos elementos constituintes da vegetação, bem como suas densidades e orientações. A distribuição espacial destes elementos depende principalmente das características iniciais de formação do dossel. Assim, por exemplo, quando se considera culturas agrícolas, plantios florestais, a modelagem da distribuição espacial destes elementos é dependente das características relacionadas às maneiras como as sementes foram plantadas no solo, do tipo da vegetação e do estágio de desenvolvimento destas plantas. Para dosséis esparsos, os modelos podem considerar seus elementos constituintes distribuídos em sub-dosséis padronizados (plantios em linha ou estrutura *lattice*<sup>2</sup> ou aleatoriamente, sem uma padronização) (NORMAN; WELLES, 1983). Em contrapartida, em alguns tipos de vegetação com cobertura florestal densa onde não há

---

<sup>2</sup> Tomando-se o padrão espacial descontínuo das plantas num espaço x,y, o qual é dependente da implantação e do posicionamento das plantas com distância igual ou variada nas duas direções ortogonais, a estrutura *lattice* ocorre quando a descontinuidade no espaçamento entre as plantas acontecer em ambos os eixos (x,y), ou seja, as plantas não se tocam na direção da linha de plantio, não há um contínuo da vegetação.



predominância de espaçamentos entre as árvores, a densidade dos elementos da vegetação é considerada uniforme, sendo caracterizada pelo índice de área foliar (*IAF*) que expressa a quantidade em área de folhas por área no terreno.

Com o aumento do *IAF*, o fluxo solar incidente no dossel e o fluxo na direção do sensor são afetados na região do visível com o aumento da absorção, e na região do infravermelho próximo com o aumento no espalhamento do fluxo, e assim ocorre o aumento da reflexão (KOBAYASHI et al., 2007). Entretanto esta variação na estrutura do dossel (*IAF*) é significativa quando não há interferência de outros elementos na reflectância do dossel como ocorre em dosséis esparsos, onde a contribuição da resposta do substrato é expressiva, e ainda quando efeitos provocados por sombras dentro do dossel não são observados (ASNER, 1998; WALTHALL, 1997).

Outro parâmetro que caracteriza a densidade e orientação dos elementos do dossel é a distribuição angular de folhas (*DAF*) sendo amplamente utilizada na modelagem do transporte de radiação. Ela é caracterizada por uma função de densidade de distribuição  $f(\theta_1, \psi_1)$  da folhagem, em que  $\theta_1$  é a inclinação da folha com relação à normal e  $\psi_1$  é a sua orientação azimutal. Algumas distribuições teóricas estabelecidas com base em trabalhos de fitometria são apresentadas na Figura 2.3.

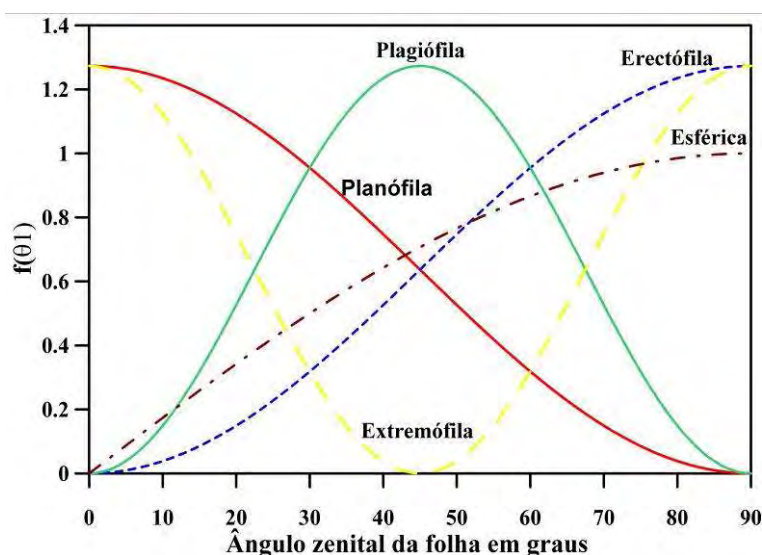


Figura 2.3 - Classes de distribuição angular.

Fonte: Adaptado de Ross (1981).

Assim como o *IAF*, a *DAF* atua diretamente nas mudanças da reflectância do dossel. De acordo com Norman et al. (1985) citado por PONZONI (1993) as interferências na reflectância causadas pela *DAF* são resultado da integração deste parâmetro, da geometria de iluminação e da geometria de visada. Tal afirmação pode ser observada na Figura 2.4. A intensidade da radiação “sentida” pelos dois observadores depende da geometria de iluminação, da distribuição angular destas folhas e da posição destes observadores. Neste exemplo, didaticamente, Norman et al. (1985) citado por PONZONI e SHIMABUKURO (2007), mostram que devido a distribuição angular de ambas as folhas, a folha 2 posicionada perpendicularmente aos raios solares é melhor iluminada do que a folha 1 que se encontra posicionada quase que paralelamente aos raios solares. Neste caso, o observador 1, que tem o Sol praticamente nas suas costas, perceberá brilho mais intenso da folha bem iluminada (folha 2) do que a folha fracamente iluminada (folha 1). Nesta situação, o brilho da cena conta com a influência da reflectância da face dorsal da folha 1 e da face ventral da folha 2. Em contrapartida, o observador 2 observará melhor a folha 1, e um pouco a folha 2. Para este observador a cena aparecerá mais escura. O brilho desta cena observado por ele será composto da transmitância da folha 1 e pela reflectância da folha 2.

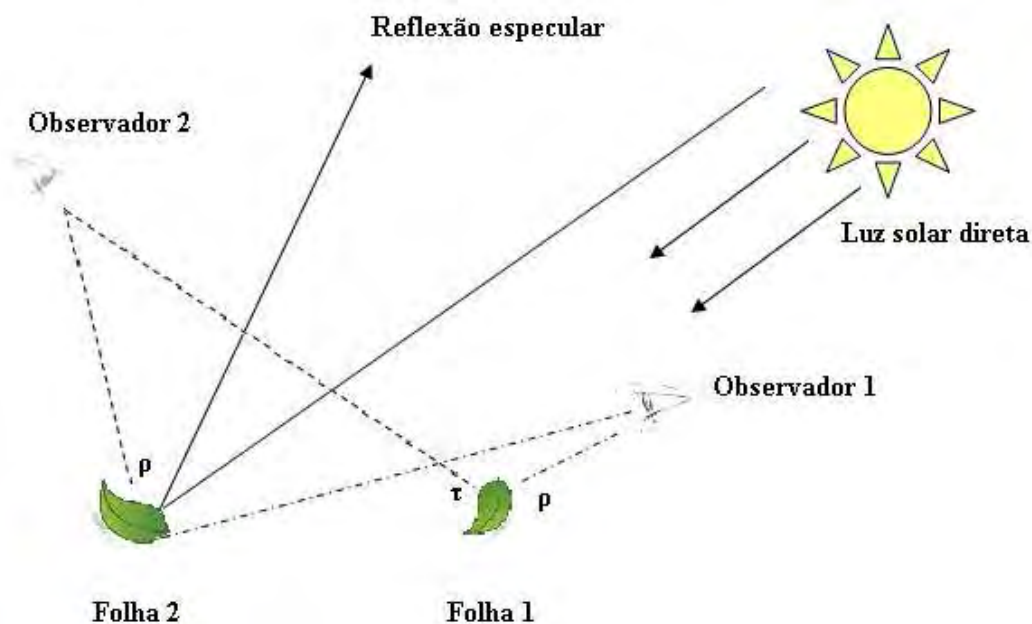


Figura 2.4 - Influência da geometria do dossel na sua reflectância.

Fonte: Adaptado de Norman et al. (1985) citado por PONZONI e SHIMABUKURO (2007).

Um efeito que merece destaque e pode ser também observado na Figura 2.4 é o efeito *hotspot*. Este efeito ocorre quando a reflectância do dossel tende a ser elevada. Este aumento na reflectância do dossel é resultado do posicionamento do Sol perante o observador, ou seja, ocorre quando o Sol encontra-se posicionado logo atrás do observador (ou sensor) que observa uma grande parcela de componentes do dossel diretamente iluminados, sem interferência das sombras do interior do dossel ou sobre a superfície do solo que ficam camufladas pelos elementos do dossel. O efeito *hotspot* em outras palavras ocorre quando o ângulo formado entre o vetor da direção de propagação da radiação incidente e o vetor da direção de propagação da radiação espalhada tende a zero. Quando o ângulo entre os vetores assume o valor zero, sombras não são registradas na direção de observação, momento que ocorre o pico de reflexão (NI et al., 1999; CAMPOS, 2008; LI e STRAHLER, 1992). A dependência deste efeito perante a distribuição angular das folhas é nítida, uma vez que um dossel é formado por muitas folhas que apresentam diversas variações nas inclinações e nos ângulos azimutais. O tamanho das folhas ou dos ramos, a densidade dos dosséis, e o tamanho da copa são importantes fatores para a determinação do efeito *hotspot* (LEBLANC et al, 1999).

Além disso, a *DAF* influencia diretamente a reflectância de um dossel, pois ela altera a probabilidades de ocorrência de aberturas dentro do dossel em função dos ângulos zenital solar e de visada, os quais determinam se os fluxos de incidência e de reflexão serão ou não interceptados pelos elementos da vegetação. A partir das observações acima, nota-se que a reflectância de um dossel é profundamente dependente da *DAF*.

Assim como ocorre com os elementos da vegetação, o solo absorve e espalha a radiação incidente sobre ele. Da fração espalhada, parte deste fluxo é especular e a outra parte é difusa. Quanto maior for a rugosidade da superfície do solo mais não-lambertiana (anisotrópica) será a sua reflectância. Porém em muitos modelos de transferência radiativa desenvolvidos para dosséis, o elemento solo é assumido como um elemento refletor puramente lambertiano caracterizada pela sua reflectância hemisférica. Assim, quando o dossel estudado é muito denso com *IAF* superiores a 3, esta suposição torna-se desprezível porque pouca radiação atinge o solo e conseqüentemente a reflectância

deste elemento passa a ser desconsiderável. Porém quando dosséis esparsos (com *IAF* inferior a 3) são considerados, a influência da reflectância deste elemento apresenta importância maior, especialmente em visadas verticais e na direção do efeito *hotspot* (retro-espalhamento) (KIMES, 1982). O efeito do espalhamento múltiplo entre o solo e o dossel é ainda o principal desafio na modelagem da reflectância da vegetação (KIMES, 1984; GOEL, 1988; KUUSK, 2001).

## **2.2 Métodos empíricos utilizados na extração de informações quantitativas da vegetação**

Conforme mencionado anteriormente, estimativas de parâmetros biofísicos e bioquímicos da vegetação a partir de dados detectados remotamente podem ser realizadas por modelos empíricos e/ou físicos (LIANG, 2004; SCHLERF; ATZBERGER, 2006; COLOMBO et al., 2008; DARVISHZADEH et al., 2008; HOUBORG et al., 2009). Apesar de inúmeras argumentações favoráveis ao emprego dos modelos físicos na predição da reflectância de dosséis vegetais (sentido direto) ou na estimativa de parâmetros biofísicos ou bioquímicos a partir de dados radiométricos (sentido inverso), a aplicação destes modelos não é trivial, merecendo diferentes tipos de adaptações e de considerações de acordo com o tipo de dossel que se esteja estudando (CAMPOS, 2008). Assim, modelos empíricos vêm ainda sendo utilizados cujos resultados apresentam diferentes graus de sucesso.

A modelagem empírica consiste do estabelecimento de relações entre variáveis mediante equações de regressão, sendo um método computacionalmente eficiente (DARVISHZADEH et al., 2008). Os modelos empíricos geralmente relacionam Fatores de Reflectância (FR) ou Índices de Vegetação (IVs) com uma ou múltiplas variáveis biofísicas mediante a definição de modelos de regressão. A fragilidade destas relações em estudos dessa natureza é bem conhecida, pois apresenta desvantagens em decorrência, neste caso, da influência de outras variáveis na interação da radiação com a vegetação as quais não são consideradas dentro do modelo. Ainda, a relação entre as variáveis exige normalmente levantamentos de campo laboriosos e custosos e a aplicação do modelo é limitada às condições ambientais aonde ele foi desenvolvido

(COLOMBO et al., 2008; ASNER et al., 2003). As relações estatísticas derivadas destes modelos e estabelecidas entre os parâmetros da vegetação e dos dados coletados remotamente são específicas para cada sensor, região de estudo e amostragem, além de variarem no espaço e no tempo (COLOMBO et al., 2003).

Canavesi e Ponzoni (2007) utilizaram modelagem empírica na estimativa da distribuição espacial de volume de madeira em plantios de eucalipto. Os autores levaram em consideração o efeito da topografia sobre os valores de FR extraídos de imagens do sensor TM/Landsat5 e concluíram que mesmo empiricamente foi possível estimar o volume de madeira dos plantios de eucalipto.

Como outros exemplos podem ser citados os trabalhos de Aragão et al. (2005) que estudaram a variabilidade espacial de *IAF* na região leste da Amazônia brasileira; de Foody e Cluter (2003) que avaliaram as possibilidades de estimativas preditivas de biomassa florestal entre duas regiões na Amazônia usando dados TM/Landsat5; de Steininger (2000) que estimou biomassa de formações florestais secundárias em florestas localizadas entre o Brasil e a Bolívia e Ponzoni et al (no prelo) que estabeleceram relações empíricas entre biomassa florestal e dados radiométricos do sensor CHRIS-PROBA, na região da Floresta Nacional do Tapajós.

Schlerf et al. (2005) avaliaram as relações estabelecidas entre índices de vegetação derivados a partir de dados hiperespectrais (*Hymap*) e dados multiespectrais (TM/Landsat reamostrados a partir dos dados *Hymap*), e dados biofísicos provenientes de 40 dosséis florestais. O estudo demonstrou que as variáveis biofísicas são determinadas com melhor acurácia a partir de dados hiperespectrais do que com dados multiespectrais.

Colombo et al. (2008) utilizaram as duas modalidades de modelos (empírico e físico) para estimar o conteúdo de água das folhas em um dossel de “poplar” localizado na planície de inundação do rio Ticino, na Itália. De maneira geral, ambos os métodos apresentaram bom desempenho na estimativa do conteúdo de água. Entretanto, segundo os autores, a utilização do método empírico pode ser limitada em extensas áreas e em dosséis heterogêneos, pois é dependente de condições de amostragem, requerer trabalho

de campo para ser parametrizado e ainda pode ser aplicado somente na área do respectivo trabalho de campo.

Marsden et al. (2009) estabeleceram relações entre uma série temporal do produto MOD13Q1 que corresponde ao índice de vegetação *NDVI* (do inglês, *Normalized Difference Vegetation Index*) proveniente de dados do sensor MODIS da plataforma Terra, com características estruturais provenientes de 16 talhões com plantios de eucalipto localizados em São Paulo. Altas correlações entre o índice acumulativo e o volume de madeira, e entre o índice acumulativo e altura das árvores dominantes foram encontradas.

### **2.3 Modelos fundamentados na teoria da Transferência Radiativa**

A interação da radiação eletromagnética com dosséis vegetais é muito complexa e influenciada por diversos fatores. A modelagem da reflectância de dosséis via modelos fundamentados na teoria da transferência radiativa, diferentemente dos modelos empíricos, permite simular a trajetória da radiação incidente dentro do dossel levando em consideração aspectos espectrais e estruturais dos elementos que os compõem, bem como por outros relacionados à geometria de iluminação e de visada. A modelagem serve para o conhecimento do sistema físico envolvente no processo de interação da radiação com o dossel e, também como base para quantificar variáveis da vegetação a partir de medições espectrais (GOEL, 1988; VALERIANO, 1992; KIMES et al., 2000; ASNER et al., 2003; SCHLERF; ATZBERGER, 2006).

Goel (1988) apresentou o que chamou de “sistema de sensoriamento remoto da vegetação” que se encontra ilustrado na Figura 2.5. Destacam-se como componentes deste sistema:

- (a) as condições e características da iluminação (intensidade e localização do sol);
- (b) as condições atmosféricas (densidade do ar, aerossóis etc);

(c) as características dos alvos (estrutura do dossel, tamanho, posição, parâmetros ambientais etc);

(d) as características do solo (rugosidade, declividade, textura, mineralogia etc);

(e) as características do sensor (resolução espacial, radiométrica, temporal, espectral).

De acordo com o autor, o resultado desta interação é representado pela letra (R) (Figura 2.5). Ela simboliza a radiação detectada pelo sensor e que foi alterada no processo de interação.

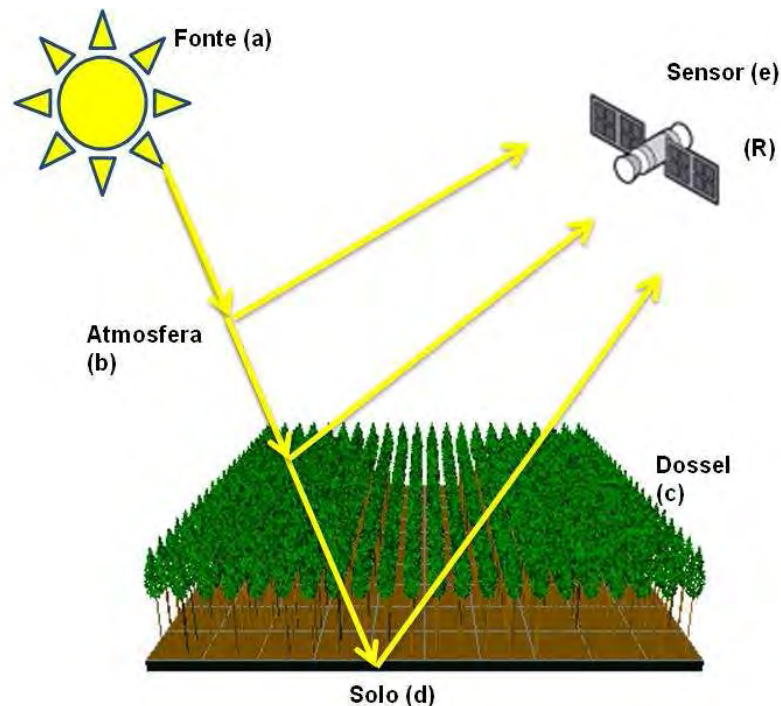


Figura 2.5 - Esquema dos fatores que envolvem o sensoriamento remoto da vegetação.  
Fonte: Adaptado e modificado de Goel (1988).

Assim, a energia refletida é dependente do comprimento de onda e detalhes espaciais introduzidos por todos os componentes do sistema. Define-se a partir da Equação 2.1, que a energia (R) detectada pelo sensor é determinada em função de uma série de componentes presentes no sistema total do sensoriamento remoto da vegetação.

$$R = f(a, b, c, d, e) \quad (2.1)$$

Em que:

$R$  é o resultado da interação da radiação eletromagnética com o sistema total que será detectado pelo sensor;

$a$  são as características da fonte;

$b$  é a interação da radiação com a atmosfera;

$c$  é a interação da radiação com a vegetação;

$d$  é a interação da radiação com o solo;

$e$  são as características do sensor;

A estimativa do resultado da interação da radiação eletromagnética ( $R$ ) a partir das características dos componentes do sistema total (Equação 2.1) é denominada de *Método direto* (GOEL, 1988). Segundo Santis et al. (2009), através do método direto os modelos são utilizados para analisar os efeitos destes componentes no espectro de reflectância. Através de medições realizadas em campo, a aplicação do método direto torna-se efetivo em avaliar a capacidade do modelo em estimar a reflectância espectral do dossel (SANTIS et al., 2009; SCHLERF; ATZBERGER, 2006). Com o método direto também se torna possível a identificação de regiões espectrais que estão em desacordo entre os dados medidos e simulados pelo modelo. Isto auxilia no aperfeiçoamento do modelo e ainda permite selecionar feições espectrais para serem utilizadas na aplicação do modelo.

Desde a década de 1970, modelos de reflectância de dossel, vêm sendo desenvolvidos e aplicados em diferentes lugares e condições diversas (SCHLERF; ATZBERGER, 2006; PINTY et al., 2001; SANTIS et al., 2009; SANTIS; CHUVIECO, 2007; DARVISHZADEH et al., 2008; GEMMELL; VARJO, 1999). Eles operam em diferentes níveis de sofisticação, e são capazes de representar efeitos unidimensionais ou tridimensionais, a custos computacionais bem diferenciados.

Existem quatro categorias de modelos de reflectância de dossel, distinguidos em (GOEL, 1988):



- Modelos de meio túrbido: aqui os elementos da vegetação são tratados como pequenas partículas espalhadoras e absorvedoras com propriedades ópticas determinadas, distribuídas aleatoriamente em camadas horizontais e orientadas em determinadas direções. O dossel é tratado como uma camada uniforme horizontal em que o campo de radiação depende somente da espessura e não de sua extensão horizontal. A arquitetura do dossel é considerada mediante o índice de área foliar e distribuição angular de folhas. Estes modelos omitem quantidades como dimensão de folha, efetiva distância entre as folhas, distribuição aleatória das folhas ao longo da direção horizontal etc. Estes modelos são mais bem sucedidos para dosséis densos e mais uniformes horizontalmente, nos quais os elementos da vegetação são menores em comparação a altura (espessura vertical) do dossel.
- Modelos ópticos geométricos: nestes modelos o dossel é composto por elementos geométricos (cilíndricos, esferas, cones, elipsóides etc) de tamanhos e dimensões determinadas, distribuídos sobre o solo. A interceptação da luz e o sombreamento das saliências são analisados a partir das leis da óptica para determinar as interações do espectro eletromagnético com os parâmetros do dossel, ou seja, determinar a reflectância do dossel. Ainda em alguns modelos são utilizada as características da transmitância dos objetos a fim de inferir melhor sobre a interação do espectro eletromagnético. A grande limitação desses modelos é a não consideração do espalhamento múltiplo da radiação pela vegetação.
- Modelos híbridos: nem sempre os dosséis vegetais apresentam características homogêneas, como na maioria dos dosséis de florestas tropicais, sendo difícil a aplicação de modelos de meio túrbido. Os modelos híbridos combinam a geometria óptica com a transferência radiativa. As formas geométricas representam, por exemplo, as copas das árvores e estas são tratadas como um meio túrbido. Isso torna estes modelos muito eficientes, mas também muito complexos e de alto custo computacional.

- Modelo computacional de simulação: neste tipo de modelo o arranjo e a orientação dos elementos da vegetação são simulados mediante a aplicação de algoritmos computacionais. Cada um destes elementos é dividido em números finitos de áreas. Estes modelos são computacionalmente intensivos, mas tem a vantagem de seguir uma simulação realista do regime de radiação no dossel.

No que se referem às características espaciais dos modelos, estes podem ser unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais. Nos modelos unidimensionais o dossel é assumido horizontalmente homogêneo e infinito, mas verticalmente variável e finito (LIANG, 2004). Nos modelos bidimensionais as variações das características do dossel na horizontal se dão em apenas uma direção. Em contrapartida nos modelos tridimensionais, além das variações na direção vertical, existem variações das características do dossel em duas direções na horizontal (ANTUNES, 1992).

Os modelos de reflectância de dossel se diferem quanto à hipótese empregada para modelar a interação da radiação eletromagnética com a vegetação. Para se tornarem realísticos, os modelos precisam tratar as interações que ocorrem dentro e entre as copas dos dosséis. As características estruturais, o tipo da vegetação, o ângulo zenital e o azimutal solar, entre outros fatores influenciam na atenuação e na distribuição espectral do fluxo radiante refletido pelo dossel (LI; STRAHLER, 1992; ANNANDALE et al., 2004). Sendo assim, a modelagem da interação da radiação eletromagnética com dossel que apresenta densidade de copa de 100% (fechamento) e recobre completamente a superfície impossibilitando que o substrato e/ou solo abaixo sejam visíveis no campo de visada do sensor, não será a mesma modelagem empregada para vegetações, por exemplo, que são orientadas aleatoriamente, ou mesmo culturas agrícolas que são sistematicamente arranjadas em fileiras com determinadas direções (KIMES, 1982; GANIS, 1997; CAMPOS, 2008; ZHAO et al., 2010).

A proposição do modelo *GRART* por Campos (2008) consistiu em aplicar a geometria óptica e transferência radiativa para estudar a reflectância bidirecional em estandes agrícolas onde a presença de aberturas no dossel tem efeitos significativos sobre a quantidade de irradiância que passa diretamente através da copa e a reflectância

direcional do dossel. Assim, o modelo *GRART* utilizado neste trabalho, enquadra-se na categoria dos modelos híbridos que combinam geometria óptica e transferência de radiação.

### **2.3.1 Modelos híbridos - Geometria Óptica (GO) e Transferência de Radiação**

Os modelos híbridos levam em conta a forma distinta que a radiação penetra em dosséis discretos em oposição aos modelos para meio homogêneo. Destinam-se, portanto a tratar a transferência de radiação em dosséis descontínuos onde as copas das árvores encontram-se isoladas tal como culturas em linha, pomares, florestas comerciais plantadas etc.

Nos modelos híbridos assume-se que o dossel é distribuído em sub-dosséis (copas individuais ou alinhadas) representados computacionalmente no espaço tridimensional. Estes sub-dosséis normalmente são assumidos com formatos geométricos regulares como esferóides, elipsóides, cilíndricos, ou cúbicos, assim como também ocorre nos Modelos Geométricos (GO). Mas diferente dos modelos GO, em modelos híbridos a reflectância das frações radiométricas (solo iluminado e sombreado e vegetação iluminada e sombreada) são modeladas por meio da teoria de transferência de radiação em meio discreto (KIMES; KIRCHNER, 1982; NORMAN; WELLES, 1983).

### **2.3.2 O modelo *Geometrically Arbitrary Radiative Transfer (GRART)***

Segundo Campos (2008) há inúmeros modelos idealizados para descrever a anisotropia do Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) da vegetação. Estes incluem desde modelos estatísticos que estabelecem relações empíricas entre os parâmetros do dossel e os dados radiométricos, a modelos com embasamento físico que assumem diferentes hipóteses para tratar a transferência de radiação para um dossel de vegetação.

A cobertura vegetal seja ela caracterizada por monoculturas como a do eucalipto, do café, dos citros, etc; e ainda culturas anuais no início do ciclo fenológico (com estrutura em linha) ou que apresentam distribuição aleatória dos seus indivíduos no terreno como as florestas tropicais, por exemplo, são alvos que refletem radiação de forma

anisotrópica (CAMPOS, 2008). A estimativa de parâmetros biofísicos ou bioquímicos destes dosséis a partir do conhecimento sobre os fatores intrínsecos ao processo de interação entre o dossel e a radiação eletromagnética, requer um modelo que seja capaz de considerar aspectos específicos do local, das condições atmosféricas, da geometria de aquisição e das características ou habilidades do sensor responsável pelo registro dos dados radiométricos.

Campos (2008) levou em consideração estas características e propôs o modelo *Geometrically Arbitrary Radiative Transfer - GRART*, que aproxima a transferência de radiação de um meio homogêneo e contínuo para um meio discreto, aonde a penetração e a interceptação da radiação dependem de fatores geométricos regulares característicos da vegetação. O termo “meio” aqui representa o dossel, ou seja, o meio pelo qual a radiação eletromagnética vai trafegar. O modelo *GRART* contrasta significativamente com os primeiros modelos plano-paralelos propostos. Segundo Campos (2008) existem alguns fatores primordiais para que dosséis agrícolas descontínuos (discretos) não sejam tratados por modelos de transferência radiativa 1D<sup>3</sup>:

- 1) A probabilidade de penetração da radiação no dossel no espaços 3D discreto do dossel não depende somente do eixo vertical, mas também da posição no plano;
- 2) Devido ao arranjo estrutural esparsa das plantas nestes dosséis, o solo (ou substrato) tem maior contribuição na componente de anisotropia da reflexão bidirecional e maior fração de solo estará no campo de visado do sensor;

---

<sup>3</sup> Nos modelos de transferência radiativa 1D, o dossel é horizontalmente homogêneo e infinito mas verticalmente variável e finito, podendo ser o solo ou outra camada de vegetação o limite vertical (LIANG, 2004).

3) Para o cálculo das frações solo e vegetação iluminados e sombreados no campo de visada do sensor é necessário a utilização de um modelo geométrico óptico; e

4) Uma solução analítica que aproxime a transferência de radiação do meio turbido para o meio discreto do estande esparso precisa ser utilizada para o cálculo da contribuição direta e difusa de cada componente radiométrica.

No próximo tópico serão descritas as principais características do modelo *GRART* na modelagem da FRB. Detalhes dos cálculos podem ser encontrados no trabalho Campos (2008).

### **2.3.3 Descrição do modelo *GRART***

No modelo *GRART*, as plantas são assumidas como protuberanças geométricas (hemi-elipsoidais) dispostas regularmente sobre um solo (substrato) contrastante. A FDRB no campo de visada do sensor é modelada pelas contribuições dos espalhamentos único e múltiplo do estande de plantas na direção do sensor. A participação de cada contribuição é avaliada em possíveis trajetórias da radiação, com quatro componentes no campo de visada do sensor.

As plantas podem assumir diferentes formas geométricas com diferentes dimensões e assim ocupar um volume no estande limitado pela superfície da figura geométrica abstraída (Figura 2.6). A descrição geométrica do posicionamento das plantas dentro do estande sobre o solo é arbitrária, podendo variar em ambos os eixos ( $x$  e  $y$ ) ou somente em um (Figura 2.7). Distribuições ecológicas de comunidades naturais (Lognormal, Neyman, Poisson) de plantas também podem ser assumidas nas simulações.

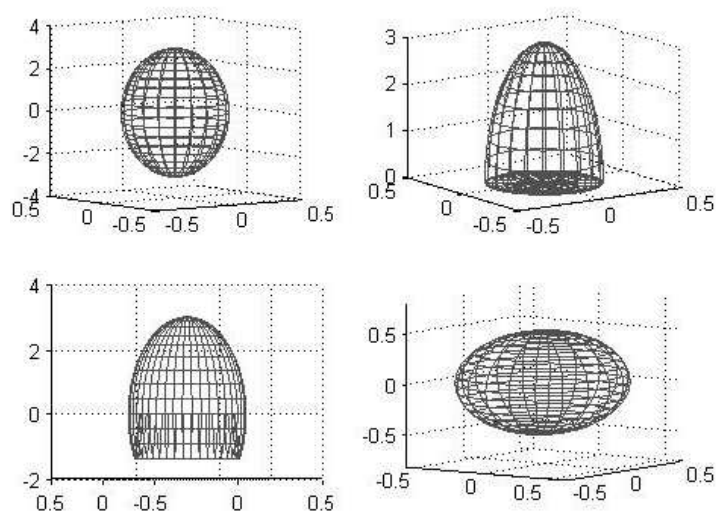


Figura 2.6 - Possíveis geometrias de plantas que podem ser consideradas no modelo.  
 Fonte: Adaptado de Campos (2008).

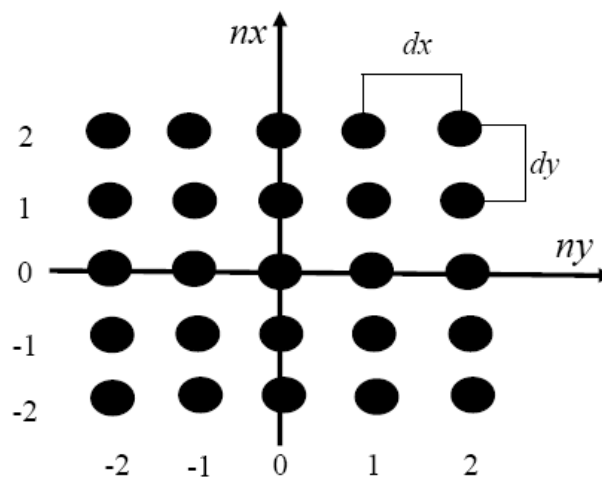


Figura 2.7 - Variação arbitrária das plantas no estande nas posições  $x$  alinhado com a direção Norte-Sul e  $y$  alinhado com a direção Leste-Oeste.  
 Fonte: Adaptada de Campos (2008).

Dependendo da variação arbitrária das plantas nos eixos dentro do dossel, duas estruturas podem ser formadas: a *lattice* e *continuum* (este último denominado de *estrutura em linha*). Quando a variação arbitrária das plantas ocorre em ambos os eixos a estrutura é denominada de *lattice* (Figura 2.8a). Nesta situação, características típicas de cultura em linha não são formadas, pois as plantas não se tocam na direção da linha de plantio, ou seja, não há um *continuum* da vegetação. Para que haja a representação da cultura em linha, ou seja, um *continuum* da vegetação, a variação num dos eixos assume valores elevados (Figura 2.8b).

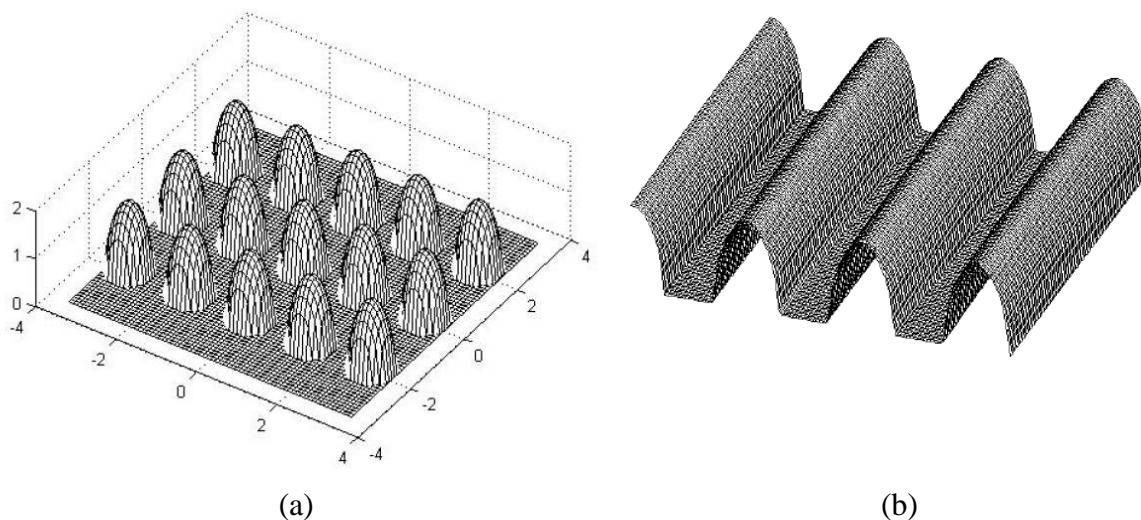


Figura 2.8 - Representação de um estande com estrutura *lattice* (a) e estrutura em linha (b).  
 Fonte: Adaptada de Campos (2008).

O modelo *GRART* diferentemente dos primeiros modelos propostos, modela a penetração da radiação em dosséis esparsos ao considerar a porção da radiação que ocorre nos espaços entre as copas das plantas e a porção da radiação que passa através do dossel sem ser interceptada. Essa abordagem permite modelar a probabilidade da radiação não ser interceptada ao longo de sua trajetória até uma posição de interesse dentro do dossel.

A FDRB da cena é modelada com base na radiação (difusa e direta) incidindo sobre um estande com plantas descontínuas dispostas sobre um solo contrastante (Geométrico óptico). A partir de um dossel contínuo, o espalhamento único (de primeira ordem) e o espalhamento múltiplo são analiticamente aproximados para estandes descontínuos com plantas regularmente arranjadas (Transferência radiativa). O modelo calcula as contribuições dos espalhamentos (único e múltiplo) a partir de quatro frações radiométricas (fração radiométrica da copa iluminada, fração radiométrica do solo iluminado, fração radiométrica da copa sombreada e a fração radiométrica do solo) para possíveis trajetórias (sol-estande-sensor) da radiação em direção ao sensor.

Uma importante capacidade do modelo é permitir que cenas discretas de sensoriamento remoto sejam recriadas computacionalmente por meio do conjunto de parâmetros estruturais, bioquímicos, de iluminação e do sensor. Conseqüentemente, um amplo

domínio (espacial, espectral e bidirecional) pode ser simulado como resultado de um imageamento teórico.

#### **2.4 Efeito da topografia na irradiância**

A topografia condiciona a exposição da superfície nas direções de iluminação e observação e conseqüentemente interfere na radiância medida por sensores (MYNENI et al, 1995). Quando a área de estudo apresenta variações de inclinação e exposição, análises quantitativas de sensoriamento remoto devem ser feitas mediante a consideração do efeito da topografia na distribuição da irradiância (MINAERT, 1941).

Muitas vezes superfícies com cobertura de solo e propriedades biofísicas semelhantes, apresentam diferenças no brilho captado pelo sensor. Isto ocorre em função das diferenças na orientação do terreno que resultam em discrepâncias na irradiância devido ao ângulo de iluminação e conseqüentemente nas diferenças de brilho em função do ângulo de excitância (SOENEN et al., 2005). A interferência fica ainda mais relevante quando se fala em áreas com coberturas florestais, pois o efeito topográfico neste caso altera também a escala do sombreamento e a trajetória da radiação através das copas. Por isso, além das correções atmosféricas faz-se necessária a consideração de correções topográficas quando o terreno considerado é acidentado.

Para suavização destas interferências muitos métodos foram propostos (WEI et al, 2008). Segundo o autor destacam-se a correções pelos cossenos, estatísticas semi-empíricas e a correção de Minnaert. Estes métodos partem do pressuposto de que a geometria do terreno e as árvores são compatíveis. Porém esta suposição não é bem adequada quando há a presença de características geotrópicas das árvores, onde o crescimento é vertical e orientado pelo campo gravitacional, e não é, portanto normal á superfície inclinada como são assumidos nas correções acima. Entretanto, tais amenizações realizadas por estes diferentes métodos por diversos autores são aplicáveis quando a cena em questão apresenta uma topografia acidentada (SILVA; VALERIANO, 2005; ANDRADE et al., 2007; SOARES et al., 2000; SANTIS; CHUVIECO, 2007; SANTIS et al., 2009; SCHLERF et al., 2005).



Ao considerar a iluminação do terreno na coleta das amostras de treinamento para posterior classificação com intuito da identificação das espécies de eucalipto, Canavesi (2008) encontrou maior exatidão do mapeamento em relação á verdade de campo quando comparadas ao resultado da classificação gerada com amostras de treinamento desconsiderando a iluminação do terreno. Além disso, a geometria de iluminação exerceu influência no processo de espacialização do volume de madeira. O erro mediano foi maior quando a iluminação não foi considerada para a coleta das amostras para a geração do modelo.

Brunori et al. (1995) avaliaram o desempenho de duas espécies (*Eucalyptus occidentalis* e *Eucalyptus sargentii*) de eucalipto localizados em Dudaim, deserto de Negev em Israel, os quais se desenvolviam em distintas declividades e orientações de vertentes. O efeito da orientação de vertente e da declividade sobre o crescimento das árvores foi altamente significativo. As árvores que se desenvolviam em declividade média (em solos rasos e com alto teor de sódio) apresentaram menor rendimento do que árvores que se desenvolviam em outras declividades. As árvores localizadas em orientações de vertentes voltadas para o norte apresentaram melhor desempenho do que aquelas voltadas para oeste e sul. Após discussão baseada em evidências microclimáticas do local, os autores concluíram que o desempenho melhor das árvores localizadas em orientações de vertente voltadas para o norte foram devido à menor quantidade de luz direta do sol que reduz o estresse causado por temperaturas extremas, reduzindo os níveis de evapotranspiração, e criando melhores condições para o crescimento da árvore.

## **2.5 A cultura do eucalipto**

Possuindo cerca de 600 espécies adaptadas em diversas condições de solo e clima, o eucalipto é uma árvore de ocorrência natural na Austrália (MORA; GARCIA, 2000). As árvores das espécies conhecidas são tipicamente formadoras de florestas altas que atingem alturas que variam de 30 a 50m e de florestas abertas com árvores menores com alturas entre 10 e 25 m.

No Brasil, as primeiras mudas foram plantadas no Rio Grande do Sul em meados do século XIX. A área plantada com a cultura do eucalipto no Brasil superou em 1973, um milhão de hectares, substituindo muitas áreas de matas nativas, graças a um Programa de incentivo fiscal lançado pelo Governo Federal em meados de 1966, que tinha como fins de atender a demanda crescente de madeira nos processos industriais nas regiões Sul e Sudeste do país. Entretanto, esta expansão acelerada e desordenada da cultura não foi acompanhada por desenvolvimento técnico científico, causando danos para o meio ambiente e baixíssima produtividade da cultura, acarretando também danos econômicos para os investidores. Em contrapartida, atualmente no cenário mundial, o eucalipto no Brasil, é seis vezes mais produtivo e possui um custo três vezes menor do que as outras árvores utilizadas para produção de celulose (SCOLFORO, 2008). Destaca-se também que o eucalipto quando manejado corretamente em condições favoráveis de solo e clima pode produzir mais de 800 m<sup>3</sup>/ha de madeira aos 21 anos, após 3 cortes, ou seja, vinte vezes mais do que a exploração da mata nativa (MORA; GARCIA, 2000).

Atualmente, a preocupação com a preservação das matas nativas restantes no planeta e a recuperação de áreas degradadas são assuntos de destaque e importância mundial, devido às ameaças que podem ser provocadas pelas mudanças climáticas globais. Por isso, muitos eucaliptocultores motivados a evitar os efeitos negativos da monocultura e permitir que o processo de reflorestamento seja um aliado ao combate as mudanças do clima, adequaram-se as técnicas de manejo almejando a produção ecologicamente responsável (SCOLFORO, 2008). Como exemplo destas técnicas de manejo, pode-se citar a forma pela qual são definidos os espaçamentos entre as árvores nas florestas de eucalipto. De acordo com Paiva et al. (2008) este dimensionamento dos espaçamentos entre as plantas é em função da espécie, do grau de melhoramento, da fertilidade do solo, do clima e do objetivo do plantio, bem como o sistema de condução da floresta que visam o melhor desenvolvimento das plantas objetivando ainda maior produtividade. Além disso, estes espaçamentos adotados visam a preservação e a conservação do solo impedindo que os dosséis de eucaliptos sejam demasiadamente densos permitindo maior penetração da luz solar e possibilitando o surgimento de sub-

bosques, gramíneas e plantas nativas que protegerão o solo de erosão impedindo sua degradação (SCOLFORO, 2008).

Atualmente plantios de eucalipto cobrem mais de 19 milhões de hectares em todo o mundo (FORRESTER, et al. no prelo), sendo a principal opção para reflorestamento em virtude de seu crescimento acelerado, vigor e adaptação a diferentes habitats. A polêmica que gira em torno das plantações e do reflorestamento florestal é demasiada. Isto porque, como dito acima, são plantios de espécie de crescimento rápido que inevitavelmente necessitam de alta demanda por nutrientes e água apresentando alto potencial para o esgotamento destes recursos. Por isso, foram provocados questionamentos sobre a sustentabilidade da silvicultura de plantações de eucalipto em vários países e contextos. Entretanto, as espécies de eucalipto desempenham papel importante em nível mundial por satisfazerem a crescente demanda da matéria-prima proveniente destas árvores (FORRESTER et al., no prelo).

Destacam-se assim, de acordo com Mora e Garcia (2000), algumas utilidades das árvores de eucalipto: óleos essenciais (fármacos, produtos de higiene, limpeza e alimentos); produtos apícolas (mel, própolis, geléia real); celulose (diversos papéis, filamentos para pneus, acetato para filmes, ésteres para tintas, cápsulas para medicamentos); madeira serrada (móveis, brinquedos, madeiras para construção civil); postes e moirões, laminados; carvão e lenha.

A eficiência, a produtividade, os manejos adequados dos plantios de eucalipto são de extrema importância para a conservação do meio ambiente e para atuação das empresas no mercado, principalmente quando é evidente a crescente demanda pela matéria-prima proveniente dos plantios de eucaliptos. Neste caso, a necessidade do conhecimento da variabilidade dos parâmetros biofísicos de uma cobertura florestal, como a cultura do eucalipto, é essencial para a aquisição de informações da vitalidade destes plantios e ainda são de extrema importância e requeridos em modelos de produtividade e inventário florestal.



### 3 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em plantios florestais de eucalipto pertencentes à Empresa FIBRIA. Estes plantios estão situados em área localizada ao norte do município de Capão Bonito, denominada Unidade Florestal de Capão Bonito (Figura 3.1 – circundada pelo retângulo preto na imagem), compreendida aproximadamente entre as latitudes 23° 46' 30'' e 24° 1' 26'' Sul e as longitudes 48° 15' 4'' e 48° 30' 2'' Oeste. O município de Capão Bonito se encontra ao sul do Estado de São Paulo, a aproximadamente 222 km da cidade de São Paulo e é pertencente a Zona Fisiográfica de Paranapiacaba.

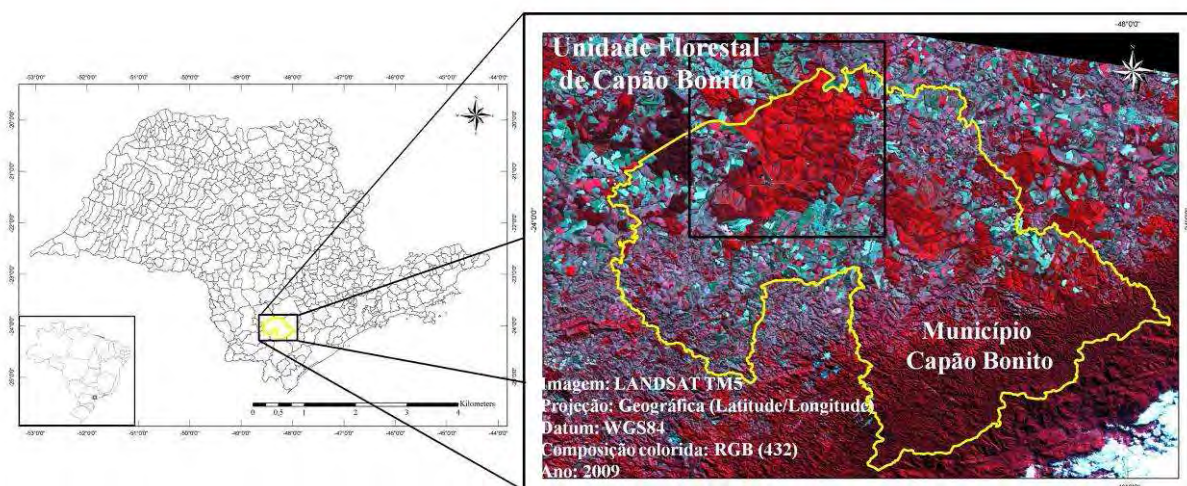


Figura 3.1 - Localização geográfica da Unidade Florestal de Capão Bonito.

Segundo o mapeamento geomorfológico do Estado de São Paulo realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1981), a região do município de Capão Bonito está localizada na Depressão Periférica Paulista, na Zona do Paranapanema. Predomina-se na região, o relevo constituído por colinas de topos convexos e tabulares. A altitude predominante varia entre 600 a 700 m e as declividades entre 10 e 20%.

Segundo Setzer (1966) o município de Capão Bonito apresenta os climas Cfa e Cfb. O clima Cfa destaca-se por apresentar o verão quente, com a temperatura média do mês mais quente, normalmente janeiro, acima de 22°C, e ainda por não apresentar o inverno tão frio, este clima pode ser denominado de “clima subtropical”. Em contrapartida, o

clima Cfb destaca-se por apresentar a temperatura média do mês mais quente abaixo de 22°C, com um verão mais brando e ainda com um inverno mais frio. Ambos os climas se destacam por não apresentarem estação seca durante o ano, apresentando um total de chuva no mês mais seco do ano acima de 30 mm.

Segundo o Mapeamento Pedológico do Estado de São Paulo (OLIVEIRA, 1999), na região da área do estudo compreendida pelo retângulo em vermelho na Figura 3.2, predominam-se de acordo com o 1º nível categórico de classificação, duas classes de solos: LATOSSOLOS e ARGISSOLOS. Estendendo a classificação até o terceiro nível hierárquico (Grande Grupo) predominam na área associações: Latossolo-Vermelho distrófico, com textura argilosa, relevo suave ondulado e Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, com textura média/argilosa e arenosa/média e relevo ondulado. Ao nordeste da área, destaca-se o Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, com textura média/argilosa e argilosa, com relevo ondulado e forte ondulado. Ainda, destaca-se uma pequena parcela ao sul da área com Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, com textura argilosa, relevo ondulado e associado com Argissolo Vermelho-Amarelo, também Distrófico, com textura média argilosa, relevo ondulado e forte ondulado (Figura 3.2).

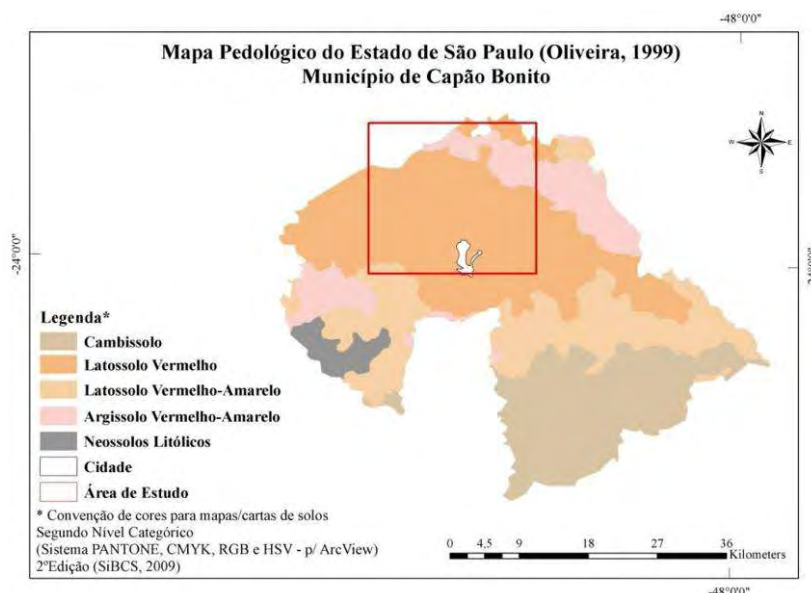


Figura 3.2 - Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: Município de Capão Bonito.  
Fonte: Adaptado de Oliveira (1999) digitalizado por Ramos et. al, (2007).

Além da variabilidade de solos, outros fatores contribuem para a variabilidade espaço-espectral do substrato. Em plantios florestais de eucalipto o solo se apresenta coberto por: “serrapilheira”, sub-bosques, vegetação rasteira, que naturalmente protegem o solo da irradiação solar ou de erosão por chuvas torrenciais.

O município de Capão Bonito, de acordo com o mapa de vegetação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2004), encontra-se em uma área considerada de tensão ecológica. Estas áreas recebem esta denominação, pois são locais onde ocorrem o contato entre dois ou mais tipos de vegetação, justapondo-se ou interpenetrando-se. Atualmente, de acordo com este mapeamento, o município de Capão Bonito não apresenta cobertura vegetal natural. A área de tensão ecológica com suas respectivas coberturas naturais foi substituída pelas atividades agrárias.

Entretanto, segundo o trabalho desenvolvido pela S.O.S. Mata Atlântica, denominado de Atlas de Remanescentes Florestais da Mata Atlântica (2009), o município de Capão Bonito apresenta somente 25% da vegetação original pertencente ao bioma mata atlântica. E também, nos municípios de Capão Bonito e Buri, segundo o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 2006), existe uma Unidade de Conservação Federal, chamada de Floresta Nacional de Capão Bonito. Localizada ao noroeste do município (Figura 3.3), a área agrega uma cobertura florestal de espécies predominantes nativas e tem como objetivo básico o uso múltiplo sustentável dos recursos florestais e da pesquisa científica, contando com uma área de 4.784,00ha. Na região do município, mais especificamente ao sudeste, também estão presentes uma parcela da Área de Proteção Ambiental da Serra do Mar.

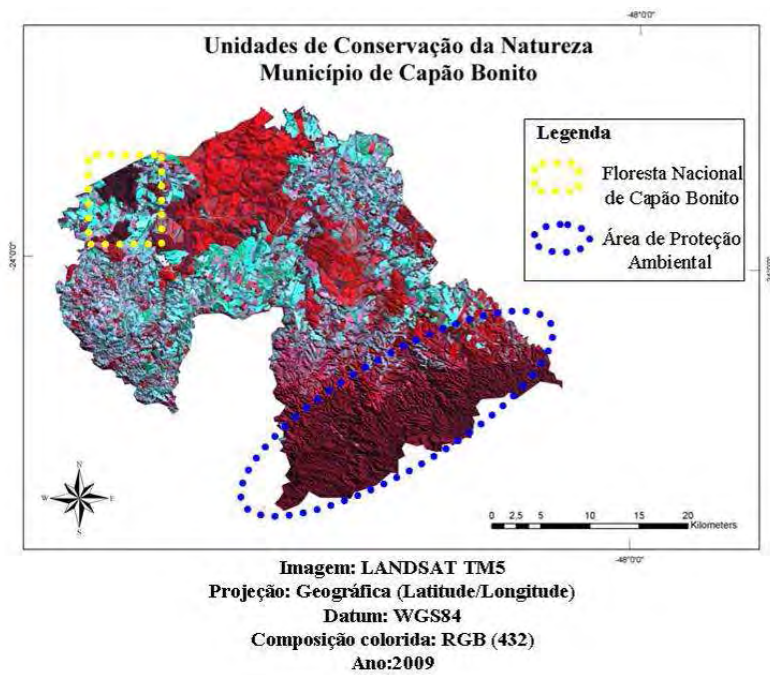


Figura 3.3 - Unidades de Conservação no município de Capão Bonito.



#### **4 MATERIAL E MÉTODOS**

Esta pesquisa foi fundamentada em trabalho de campo visando a coleta de dados dendrométricos e de densidade de cobertura de copas em plantios de eucalipto localizados na Unidade Florestal de Capão Bonito. Estes dados foram utilizados para o estabelecimento de relações empíricas com dados radiométricos extraídos de imagens orbitais do sensor TM/Landsat5 referentes a duas datas de passagens, com defasagem de aproximadamente um mês em relação ao trabalho de campo. Foram também utilizados na comparação entre a caracterização espectral dos plantios realizada por meio dos dados orbitais do sensor TM/Landsat5 com aqueles simulados pelo modelo *GRART*. A Figura 4.1 resume a metodologia empregada no trabalho. As etapas indicadas e circundadas pelos retângulos em distintas cores serão descritas a seguir.

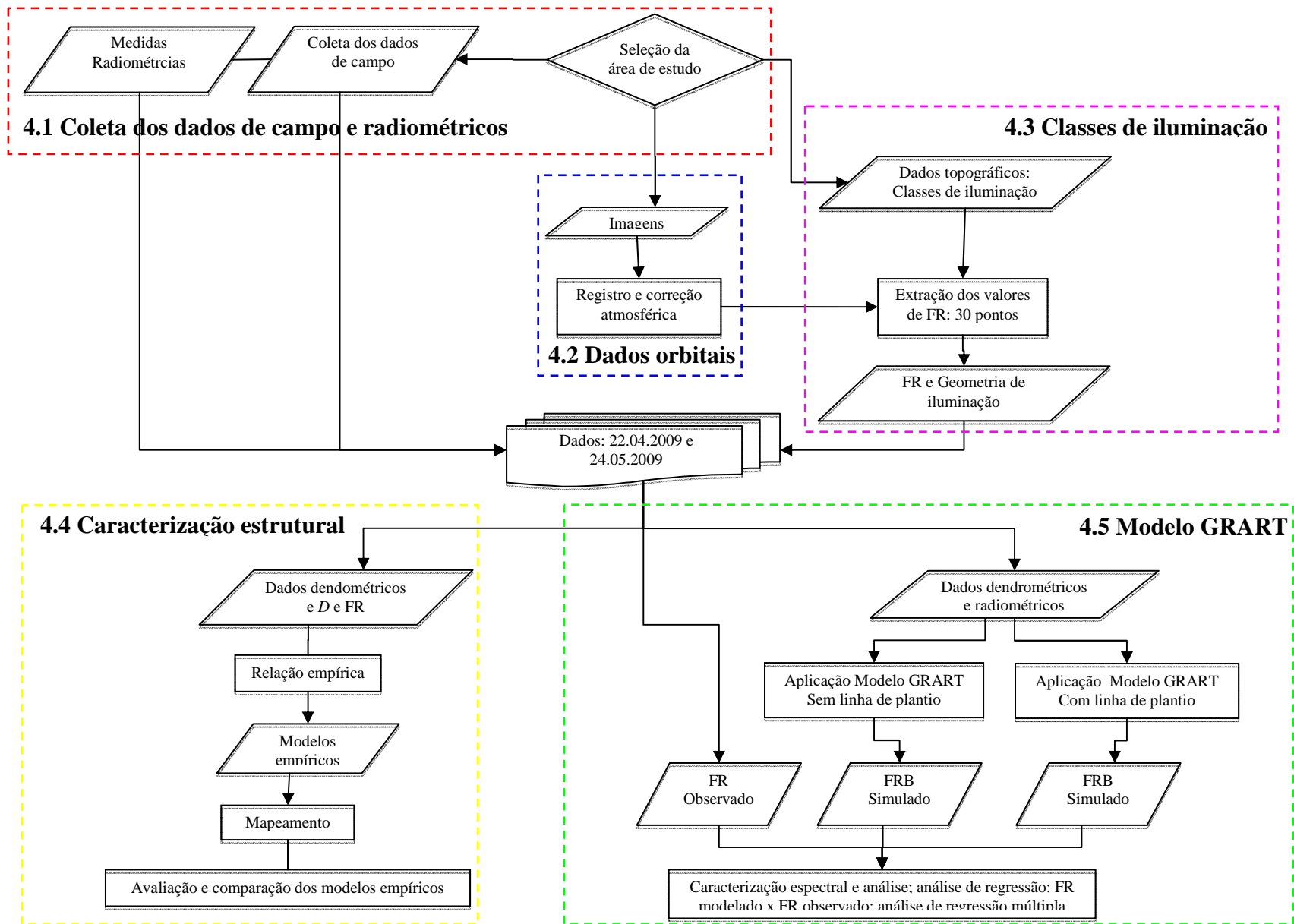


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia.

#### 4.1 Seleção da área de estudo e coleta de dados de campo

Para a seleção da área de estudo foram levadas em consideração a existência de plantios de eucalipto em diferentes estágios de desenvolvimento (idade). Uma vez identificada a Unidade Florestal de Capão Bonito da empresa FIBRIA, foi realizado o trabalho de campo entre os dias 05 e 08 de maio de 2009. Foram visitados 30 talhões (parcelas) com plantios de eucalipto em diferentes idades e composições florísticas, buscando com isso abranger a maior amplitude possível com relação à idade no ciclo produtivo do plantio, que é de 7 anos para corte. Com relação à composição florística, entre as 30 parcelas visitadas foram encontradas 7 espécies diferentes denominadas aqui neste trabalho por: espécie 1 (E1), espécie 2 (E2), espécie 3 (E3), espécie 4 (E4), espécie 5 (E5), espécie 6 (E6) e espécie 7 (E7).

Em cada uma destas 30 parcelas visitadas em campo, a amostragem dos parâmetros dendrométricos foi realizada medindo-se 10 árvores subsequentes, localizadas em uma mesma linha de plantio (Figura 4.2), sendo arbitrária a escolha da primeira árvore. As coordenadas geográficas da primeira árvore de cada parcela foram registradas mediante a utilização de um aparelho *GPS* (*Global Positioning System*).

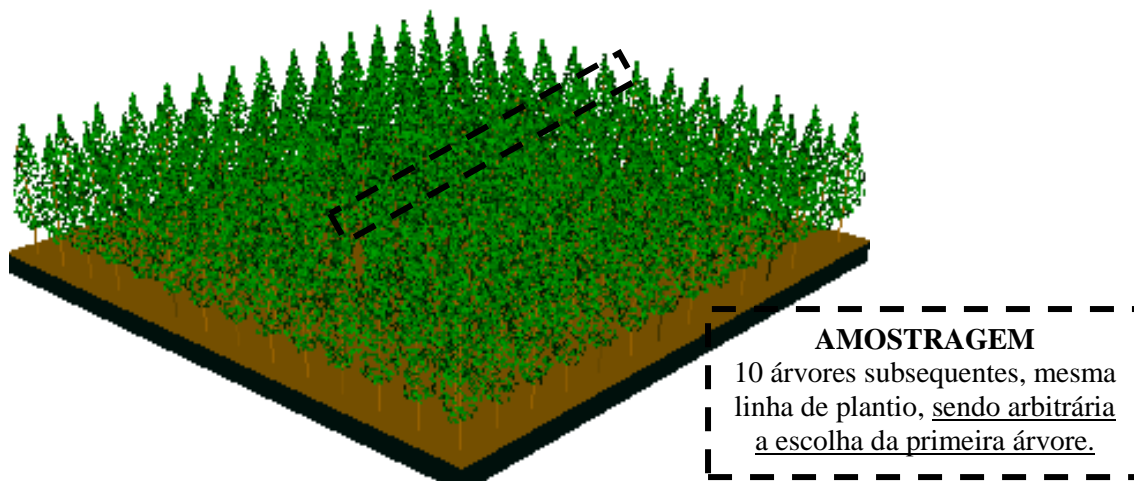


Figura 4.2 - Exemplo da amostragem dos parâmetros realizada em 10 árvores subsequentes, em uma mesma linha de plantio, sendo arbitrária a escolha da primeira árvore.

De cada uma das 10 árvores representantes de cada parcela foram medidos o Diâmetro à Altura do Peito (*DAP*), a Altura total da árvore (*H*), a Altura do tronco/comercial (*H<sub>t</sub>*) e o Raio da Copa (*R<sub>c</sub>*).

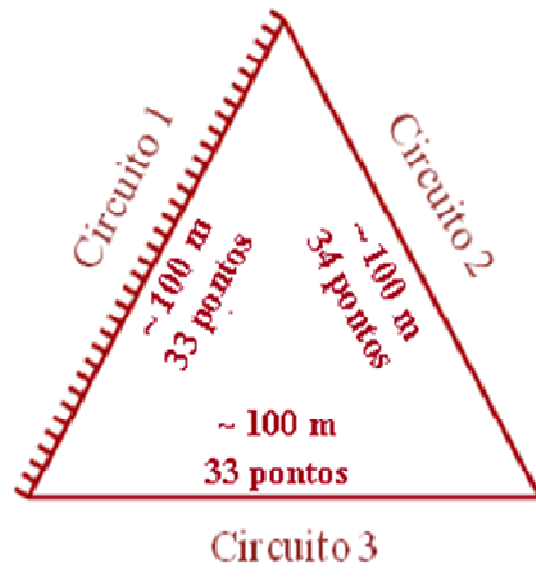
As medidas de *DAP* foram feitas mediante a utilização de fita diamétrica, enquanto que as estimativas de *H* e de *Ht* eram feitas mediante a utilização de Hipsômetro de Bitterlich utilizando a escala de 20m de distância como referência. A partir das diferenças entre os valores de *H* e de *Ht*, foram estimados os valores da Altura da Copa (*Hc*).

As médias desses parâmetros foram determinadas tomando como base os valores das 10 árvores amostradas. Estes valores médios foram considerados representantes de todas as árvores que compunham o universo de cada talhão, dado que todas as plantas de um talhão qualquer visitado apresentava a mesma idade, a mesma espécie, o mesmo tratamento, o mesmo manejo. Além destes dados, foram coletadas também em cada parcela, a Densidade de cobertura do dossel (*D*), amostras de solo e amostras de serrapilheira.

Os valores de *D* foram estimados mediante a utilização de um Densitômetro, conforme descrito por Stumpf (1993) e empregado por Souza (2009). Os dados de *D* serviram para estimar a densidade (em percentagem) da cobertura das copas dos dosséis. Dentro da parcela, a amostragem para a estimativa da *D* foi realizada percorrendo um circuito no formato de um triângulo. A leitura das medidas foi feita a cada 3 metros, com o densitômetro voltado “para cima”, anotando se o ponto amostral interceptava a copa ou não. Em cada lado do triângulo foram percorridos aproximadamente 100 m, totalizando uma amostragem de 33 pontos em dois lados do triângulo e 34 no terceiro e último lado. A Figura 4.3a ilustra a utilização do Densitômetro no interior do dossel e a Figura 4.3b demonstra os circuitos percorridos no interior de cada talhão em formato de triângulo. O ponto de partida para as leituras coincidiu com o mesmo local da primeira árvore escolhida aleatoriamente para amostragem dos parâmetros biofísicos, de modo que o final das leituras com o densitômetro coincidissem com o mesmo ponto inicial. A estimativa final da densidade de cobertura do dossel corresponde à contagem dos pontos afirmativos dividido pela quantidade de pontos totais amostrados. Por exemplo, em uma parcela 75 pontos correspondem à presença de elementos de copa e 25 pontos correspondem à ausência desses elementos, logo a porcentagem da densidade da cobertura do dossel seria de 75%.



(a)



(b)

Figura 4.3 - Aquisição das medições da Densidade de cobertura do dossel utilizando o densitômetro, segundo Stumpf (1993) (a); Formato do circuito percorrido dentro de cada talhão (b).

Fonte: Adaptado de Stumpf (1993).

As amostras de solo e as amostras de serrapilheira foram coletadas considerando os dois primeiros centímetros da camada inicial do solo. As amostras adquiridas foram acondicionadas em sacos plásticos, e ainda foram etiquetadas e identificadas com os números das parcelas visitadas para realização das medições radiométricas.

Após a finalização das coletas dos dados dendrométricos, no último talhão amostrado foram coletadas folhas de árvores de plantios com menos de um ano de idade para a medição da Reflectância Direcional Hemisférica (FRDH): parâmetro este requerido pelo modelo *GRART*. Foram escolhidas folhas novas, folhas intermediárias e folhas mais maduras. A seleção das folhas foi arbitrária dentro de cada classe de estágio de desenvolvimento mencionado, e os parâmetros utilizados para distinção da maturidade foi visual e arbitrário. Essa simplificação foi necessária em função da impossibilidade de se coletar folhas representativas de cada talhão. É necessário, portanto, aceitar que esse parâmetro deve introduzir incerteza na parametrização do modelo, uma vez que é esperada variação do FRDH das folhas com idade, espécie e posição do talhão na paisagem.

Além da coleta dos dados dendrométricos e estruturais dos plantios realizada dentro da Unidade Florestal de Capão Bonito em cada uma das parcelas visitadas, a empresa FIBRIA disponibilizou dados cadastrais referentes a estes talhões, como o espaçamento entre as árvores, classe de solo, as espécies, idade da planta (ano de plantio).

#### 4.1.1 Medidas Radiométricas

As medições radiométricas das amostras de folhas coletadas foram realizadas em seguida à coleta das mesmas em campo em um laboratório improvisado nas instalações da unidade da empresa. Para a realização de tais medições foi utilizado o espectrorradiômetro SPECTRON SE-590, atuando na amplitude espectral compreendida entre 400 a 1100nm, e tendo acoplada uma esfera integradora LI-COR 1800, que permitiu a determinação dos Fatores de Reflectância Direcional Hemisférico (FRDH) e dos Fatores de Transmitância Direcional Hemisférica (FTDH) da face ventral das folhas (Figura 4.4). De cada folha foram determinados 10 espectros. O espectro representativo médio dos três tipos de folhas (folhas novas, folhas maduras e folhas mais velhas) foi obtido por meio da média aritmética destes 10 espectros.



Figura 4.4 - Medições radiométricas coletadas das folhas utilizando o espectrorradiômetro SPECTRON SE-590 acoplado à esfera integradora LI-COR 1800.

As medições radiométricas das amostras de solo e das amostras de serrapilheira foram realizadas no LARAD (Laboratório de Radiometria) da Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em São José dos Campos, imediatamente à chegada da equipe proveniente do campo. Vale ressaltar que essa foi uma alternativa apresentada frente à dificuldade de se medir a reflectância do

substrato no campo onde as medições teriam que ser feitas embaixo das copas das árvores. Assumiu-se, portanto que a incerteza oriunda da variação espacial da reflectância do substrato não pode ser tratada com métodos alternativos (CAMPOS, 2008) que pressupõem a possibilidade de se coletar espectros em diferentes posições do substrato.

Para a realização das medições utilizou-se o espectroradiômetro Fieldspec®PRO, atuando na amplitude espectral compreendida entre 350 a 2100nm. As condições de geometria de aquisição estavam de acordo com a Figura 4.5, com ângulo de iluminação de 60° e uma distância de 5,5 cm entre o sensor e o alvo.

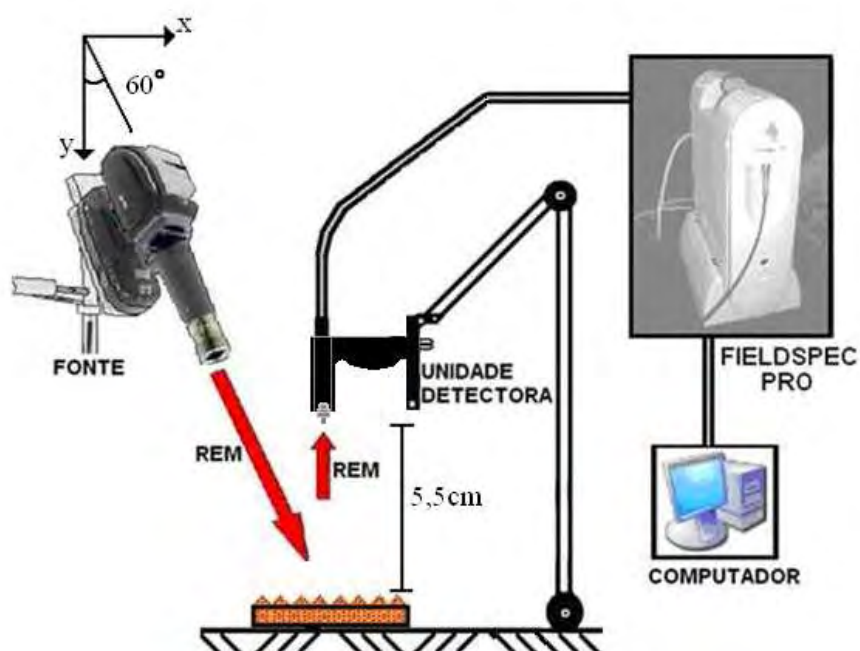


Figura 4.5 - Condições de geometria de aquisição para as medições radiométricas de solo e serrapilheira.

As amostras de solo foram colocadas em placas de Petri de 14 centímetros de diâmetro para a realização das medições (Figura 4.6a). Para contornar a interferência nas medições e no comportamento da resposta espectral do solo provocada possivelmente pelo vidro da placa de Petri, uma cartolina de cor preta foi recortada no formato de um quadrado com dimensões de aproximadamente 20x20cm, e em seguida, uma circunferência de raio de aproximadamente 13 cm foi recortada tomando como referência o centro deste quadrado. Esta foi colocada em cima da placa de Petri e as

medições foram iniciadas. Primeiramente foi realizada uma medição da placa de referência SPECTRALON, em seguida foram tomadas as medições das amostras, e, por conseguinte outra medição da placa de referência foi realizada novamente. De cada amostra de solo foram coletadas 3 medições radiométricas. O espectro representativo médio das amostras de solo foi obtido por meio da média aritmética destes três espectros.

Devido à quantidade e dimensão dos elementos que formam as amostras de serrapilheira, na sua grande maioria são folhas e galhos, e ainda por tentar tornar realística a medição considerando-se o aspecto destes elementos em campo, as amostras de serrapilheiras foram dispostas em cima de um pano preto tentando a reprodução do posicionamento do material segundo a realidade em campo (Figura 4.6b). Primeiramente, utilizando a mesma metodologia das medições anteriores, foi realizada a medição da placa de referência SPECTRALON e em seguida começaram as medições das amostras, e também como nas medições anteriores, as medições foram finalizadas com a medição da placa de referência. De cada amostra de serrapilheira foram realizadas também 3 medições radiométricas. O espectro representativo de cada amostra de serrapilheira foi obtido por meio da média aritmética destes três espectros.



Figura 4.6 - Amostras de solo (a) e amostras de serrapilheira (b).

## 4.2 Dados Orbitais

A fim de obter informações da interação da radiação com dosséis de eucalipto foram selecionadas para este estudo imagens do sensor TM/Landsat5 referentes a duas datas



de passagem do satélite sobre a região. O objetivo foi o de extrair os dados radiométricos das duas imagens, os quais foram utilizados no estabelecimento das relações entre eles e os dados dendrométricos e de densidade de cobertura coletados em campo. Além disso, estes dados foram utilizados também como referência para avaliação do modelo *GRART* na simulação dos valores de FRB dos dosséis de eucalipto.

#### 4.2.1 Imagens do sensor TM/Landsat5

As imagens selecionadas neste trabalho foram referentes à órbita/ponto 220/77 em seis bandas espectrais que abrangem as regiões do visível (Bandas 1, 2 e 3), infravermelho próximo (Banda 4) e infravermelho médio (Bandas 5 e 7). Foram selecionadas duas imagens em duas datas diferentes, quais sejam: 22.04.2009 e 24.05.2009, e que se encontravam mais próximo possível das datas de coleta dos dados de campo. Na tabela 4.1 são apresentadas as características geométricas e de iluminação das duas imagens.

Tabela 4.1 - Características da geometria de iluminação e visada das duas imagens utilizadas.

<b>Imagem</b>	<b>Ângulo zenital de visada</b>	<b>Ângulo de elevação solar</b>	<b>Azimuth solar</b>
<b>Imagem 22.04.2009</b>	0°	41,1706°	44,9668°
<b>Imagem 24.05.2009</b>	0°	34,822°	37,5926°

#### 4.2.2 Registro das imagens e correção atmosférica

O georreferenciamento de ambas as imagens foi realizado utilizando como base uma imagem do sensor ETM+/Landsat disponível no site denominado “Global Land Cover Facility” (<http://glcf.umiacs.umd.edu/data/>). O processo foi realizado no aplicativo ENVI 4.2 utilizando polinômio de 1° grau. Foram selecionados 12 pontos de controle distinguíveis visualmente nas duas imagens, tendo sido alcançado o erro total de aproximadamente 0,4 pixel. A reamostragem dos pixels foi feita pelo método do vizinho mais próximo, o qual mantém o valor original de cada pixel. As imagens georreferenciadas foram então exportadas no formato GEOTIFF e introduzidas em

banco de dados no aplicativo SPRING 4.3.3 (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas) (CAMARA et al., 1996) para posterior manipulação.

Após a importação as imagens foram então convertidas para valores de reflectância aparente. Para esta conversão foi utilizado o algoritmo LEGAL do aplicativo SPRING 4.3.3. Mediante a aplicação das equações 4.1 e 4.2 abaixo, os números digitais (ND) das imagens das duas datas em questão foram então convertidos para valores de Reflectância aparente.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{E_{sun_{\lambda}} \cdot \cos(\theta_s)} \quad (4.1)$$

Em que:

$\rho_{\lambda}$  = Reflectância aparente;

$L_{\lambda}$  = Radiância no topo da atmosfera na faixa espectral  $\lambda$ ;

$d$  = distância Terra-Sol em unidades astronômicas;

$E_{sun_{\lambda}}$  = Irradiância solar no topo da atmosfera na faixa espectral  $\lambda$ ;

$\theta_s$  = ângulo zenital solar no horário de aquisição da imagem.

Os valores de  $L_{\lambda}$  foram determinados mediante a aplicação da equação 4.2.

$$L_{\lambda} = \left( \frac{L_{\max_{\lambda}} - L_{\min_{\lambda}}}{QCALMAX} \right) QCAL \quad (4.2)$$

Em que:

$L_{\lambda}$  = Radiância no topo da atmosfera na faixa espectral  $\lambda$ ;

$L_{\max_{\lambda}}$  = Radiância máxima quando  $QCAL = QCALMAX$ ;

$L_{\min_{\lambda}}$  = Radiância mínima quando  $QCAL = 0$ ;

$QCAL$  = Valores de números digitais referentes e proporcionais a  $L_{\lambda}$ ;

$QCALMAX$  = Valor máximo de número digital quando  $L_{\lambda} = Lmax_{\lambda}$ .

Os valores de  $Lmax_{\lambda}$  e de  $Lmin_{\lambda}$  foram extraídos de Chander et al. (2009) (Tabela 4.2) segundo as datas das imagens utilizadas.

Tabela 4.2 - Valores de  $Lmax_{\lambda}$  e de  $Lmin_{\lambda}$  utilizados na equação para o cálculo da radiância no topo da atmosfera na faixa espectral  $\lambda$ .

<b>Radiância espectral, <math>Lmin_{\lambda}</math> e <math>Lmax_{\lambda}</math> em <math>W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)</math></b>				
<b>Data do Processamento: a partir de 2 de abril de 2007</b>				
<b>Banda</b>	<b>Data de Aquisição</b>	<b><math>Lmin_{\lambda}</math></b>	<b><math>Lmax_{\lambda}(LUT07)</math></b>	<b><math>1/G_{rescale}(LUT07)</math></b>
<b>1</b>	<b>1 de mar de 1984 – 31 de dez de 1991</b>	<b>-1,52</b>	<b>169</b>	<b>1,50</b>
	Janeiro 1, 1992 - Presente	-1,52	193	1,31
<b>2</b>	<b>1 de mar de 1984 – 31 de dez de 1991</b>	<b>-2,84</b>	<b>333</b>	<b>0,76</b>
	1 de jan de 1992 - Presente	-2,84	365	0,69
<b>3</b>	1 de mar de 1992 - Presente	-1,17	264	0,96
<b>4</b>	1 de mar de 1992 - Presente	-1,51	221	1,15
<b>5</b>	1 de mar de 1992 - Presente	-0,37	30,2	8,34
<b>6</b>	1 de mar de 1992 - Presente	1,2378	15,303	18,13
<b>7</b>	1 de mar de 1992 - Presente	-0.15	16,5	15,32

Fonte: Adaptado de Chander et al. (2009).

As imagens convertidas para valores de reflectância aparente foram então submetidas ao procedimento de correção atmosférica mediante a aplicação do modelo *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)* de transferência radiativa (VERMOTE et al., 1997) visando sua conversão para valores de Fatores de reflectância de superfície (aqui designados apenas por FR).

Os parâmetros utilizados para a correção atmosférica das imagens foram: modelo de atmosfera tropical, modelo de aerossóis continental, visibilidade de 50 km, e altitude média de 700 m, além dos dados individuais de cada imagem como a data de aquisição, tamanho da imagem, sensor, ângulo de elevação do sol, plataforma.

Vale ainda salientar que se optou por converter os números digitais das imagens para valores de FR via correção atmosférica de forma independente para as duas datas, não tendo sido adotado qualquer procedimento de normalização radiométrica (HALL et al., 1991) visando compatibilizar radiometricamente os dados orbitais nas duas passagens. Isso porque o objetivo foi avaliar os resultados partindo do princípio de que se existir o

interesse em estimar parâmetros biofísicos de dosséis de eucalipto a partir de dados radiométricos e de modelos empíricos e/ou físicos, dificilmente se servirão de duas imagens orbitais. Assim, a intenção foi avaliar as diferenças entre as estimativas que foram então conduzidas de forma independente.

### **4.3 Considerando a influência da geometria de iluminação na disposição do terreno**

Neste trabalho, apesar da área de estudo localizar-se numa região de topografia suave-ondulada, o terreno do local não se apresenta completamente plana. Além disso, como os valores de FRB simulados pelo modelo são determinados desconsiderando os efeitos topográficos, e estes seriam então comparados com os dados de FR extraídos das imagens que são afetadas por tais efeitos, foi necessária a aplicação de um procedimento para avaliar as possíveis interferências causadas pela disposição do terreno em relação à irradiância solar. Para isso optou-se pela realização de uma análise para a identificação e a avaliação das condições de iluminação do terreno, principalmente as condições das parcelas em campo, no momento de aquisição de ambas as imagens. Para tal propósito levou-se em consideração à posição solar em ambas as datas, a declividade do local e a orientação das vertentes.

A partir de dados topográficos da área de estudo gerados por Valeriano (2004), utilizando como base dados SRTM (do inglês, *Shuttle Radar Topography Mission*), foram adquiridas variáveis básicas locais (Unidade Florestal de Capão Bonito), como declividade do terreno, orientação das vertentes ou imagem azimute (Figura 4.7a e 4.7b, respectivamente) (VALERIANO, 2005).

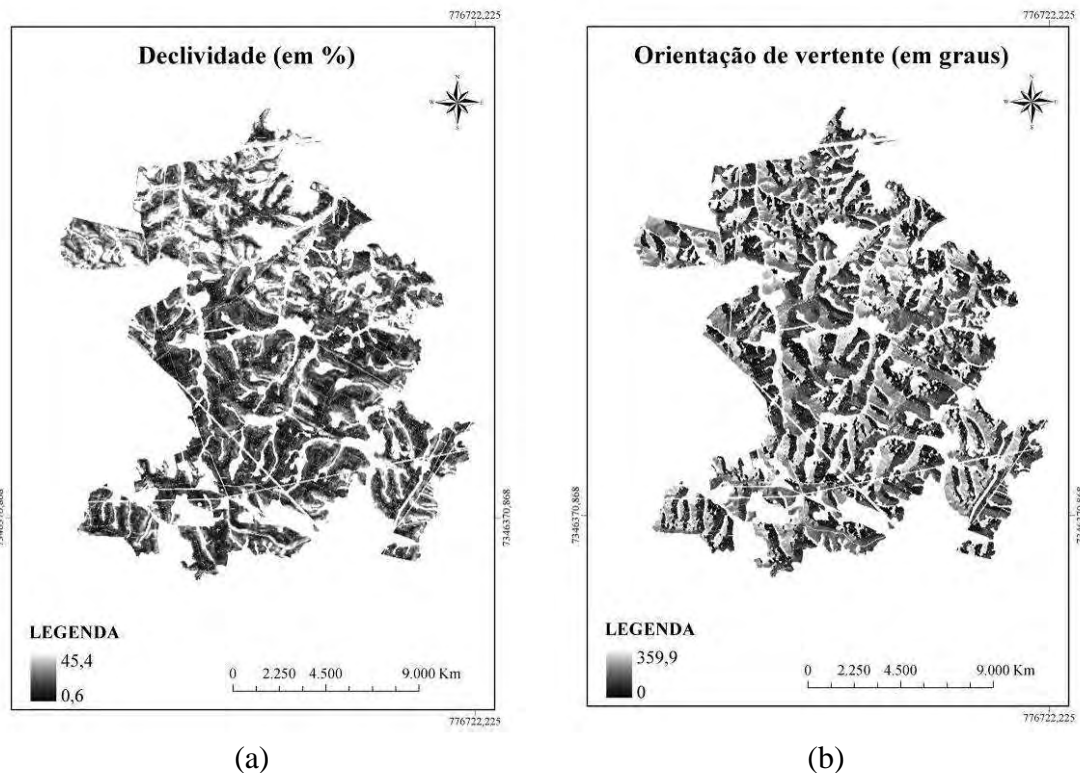


Figura 4.7 - Produtos dos dados SRTM: declividade (a) e orientação das vertentes (b) do limite da Unidade Florestal de Capão Bonito.  
 Fonte: Adaptado de Valeriano (2005).

Com tais informações, calculou-se o “Fator de iluminação” (Equação 4.3) (VALERIANO, 2006) para a identificação das condições de iluminação dos locais das coletas dos dados de campo. Para tanto, considerou-se os dados de aquisição (zênite e azimute solar) das duas imagens do sensor TM/Landsat5 correspondentes as duas datas mencionadas (22.04.2009 e 24.05.2009). O procedimento foi realizado com a ferramenta matemática de bandas (do inglês, *Band Math*) do aplicativo ENVI 4.2 na qual a Equação 4.3 foi inserida para a geração da imagem “Fator de iluminação”. Em seguida, com o aplicativo ArcGIS 9.3 e por meio do processo de reclassificação da imagem, foram definidas “classes de iluminação” que possivelmente o terreno estava recebendo no momento de aquisição da cena.

Pela equação 4.3 a radiância medida pelo sensor é proporcional ao cosseno do ângulo de incidência  $\cos(\theta_s)$ , que é o ângulo entre a normal a superfície e o vetor solar.

$$\cos(\theta_s) = \cos(\theta_s) \times \cos(\theta_t) + \sin(\theta_s) \times \cos(\theta_t) \times \cos(\psi_s - \psi_t) \quad (4.3)$$

Em que:

$rt$  e  $rs$  são vetores direcionais, terreno e iluminação respectivamente

$\theta_s$  é o ângulo zenital solar

$\theta_t$  é a declividade

$\psi_s$  é o ângulo azimutal solar

$\psi_t$  é a imagem azimute/orientação da vertente

Na equação 4.3, o ângulo zenital solar e o azimute solar não variam uma vez que os valores são correspondentes às geometrias de iluminação e visada da aquisição das imagens. A partir disso, decidiu-se definir as classes de iluminação observando os valores máximos e os valores mínimos dos parâmetros que variam no cálculo da equação, como a declividade e a orientação das vertentes. A partir da observação desta variação, combinações foram feitas com estes valores para análise da amplitude das classes. Para isso foram considerados os dados máximos e mínimos de declividade e de orientação de vertente da área de estudo. Para a classificação da área de estudo em classes de declividade foi utilizada como base a classificação da Embrapa, 1999. As classes encontradas na região foram: plana, suave ondulada, ondulada, forte ondulada e montanhosa. A imagem orientação das vertentes foi dividida em quatro classes sendo as vertentes orientadas para o norte mais iluminadas. As classes definidas foram: NE – SE (nordeste-sudeste); SE-SO (sudeste-sudoeste); SO-NO (sudoeste-noroeste); NO-NE (noroeste-nordeste). A partir das classes de declividade e das classes de orientação das vertentes as combinações foram estabelecidas (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Combinações realizadas considerando a orientação das vertentes e a declividade do terreno.

<b>Possíveis combinações</b>
1. Orientação NO – NE com classe plana, suave ondulada, forte ondulada e montanhosa;
2. Orientação NE – SE com classe plana, suave ondulada, forte ondulada e montanhosa;
3. Orientação SE –SO com classe plana, suave ondulada, forte ondulada e montanhosa;
4. Orientação SO – NO com classe plana, suave ondulada, forte ondulada e montanhosa;

Assim, as classes de iluminação foram definidas da seguinte forma:

- Classe - iluminado (Figura 4.8a): plantios localizados em regiões planas aonde a interferência da vertente é nula, e a radiação estaria chegando de maneira uniforme;
- Classe - pouco iluminado (Figura 4.8b): plantios localizados em regiões destacadas com vertentes opostas à direção de iluminação solar, com terreno inclinado, recebendo desta forma apenas a radiação difusa;
- Classe - muito iluminado (Figura 4.8c): plantios localizados em regiões com vertentes voltadas á Norte com relevo inclinado, recebendo assim a radiação direta;

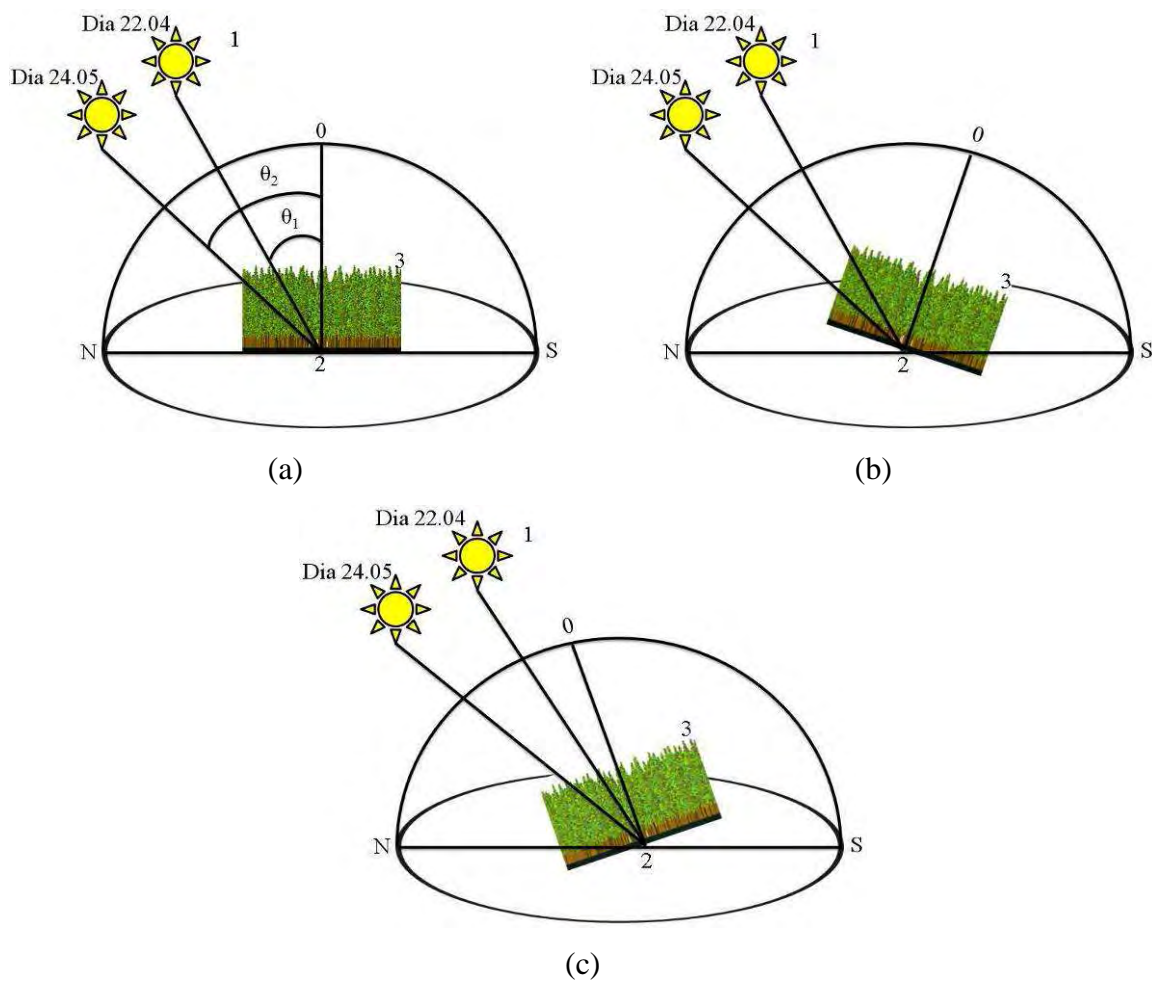


Figura 4.8 - Representação dos elementos considerados para definição das classes de iluminação: posição solar nas datas de aquisição da imagem (1), do relevo (2) e orientação das vertentes (3).

A partir do mapeamento das classes de iluminação gerado para as duas imagens, foram identificadas para cada parcela, as classes de iluminação, ou seja, foi possível identificar as condições de iluminação de cada parcela em campo no momento da passagem do satélite. Isto serviu para auxiliar a extração dos valores de FR das imagens de cada parcela. A extração dos valores de FR de cada parcela foi realizada levando em consideração a coordenada registrada em campo e ainda os pixels que apresentassem a mesma condição de iluminação. O procedimento detalhado será descrito a seguir.



#### **4.3.1 Extração dos valores de fator de reflectância das imagens**

Após as devidas conversões dos NDs das imagens em valores de FR, e do mapeamento gerado das classes de iluminação para as duas imagens, foram identificadas nas imagens e no mapa das classes de iluminação as coordenadas das parcelas amostradas em campo, com o objetivo de extrair os valores de FR de cada parcela visitada em campo. Em decorrência da localização de algumas parcelas próximas as bordas dos talhões, e com o objetivo de minimizar a influência dos pixels vizinhos representativos de outros alvos nos pixels amostrados em campo, foi necessário o estabelecimento de um critério para essa extração. Ainda, levou-se em consideração a informação das classes de iluminação a partir do mapeamento gerado, com o objetivo de selecionar pixels nas mesmas condições de iluminação do terreno no momento da passagem do satélite.

Para as parcelas que não se encontravam localizadas nas bordas dos talhões, os valores de FR foram extraídos de ambas as imagens em cada faixa espectral utilizando as coordenadas registradas em campo, assumindo como referência sempre que possível a média aritmética de uma matriz composta por 3 x 3 elementos pertencentes a mesma classe de iluminação, sendo o elemento central desta matriz o correspondente ao pixel central da coordenada registrada. Para as parcelas que se encontravam localizadas nas bordas dos talhões, o critério adotado para a extração dos valores de FR foi semelhante ao anterior, porém ao invés de considerar os valores de FR dos 9 pixels representantes da matriz 3x3 no cálculo da média aritmética, os valores de FR dos pixels que apresentavam influência das bordas não foram considerados. O procedimento para a extração dos valores de FR de cada parcela de ambas as imagens foi feito mediante a inspeção visual das parcelas identificadas nas imagens e nos mapas de classes de iluminação.

Convém ainda salientar que a parcela 13, localizava-se em setores da fazenda aonde os talhões se encontravam em processo de colheita na semana da realização do trabalho de campo. Logo, esta parcela na imagem do dia 24.05.2009 se encontrava na área aonde o plantio já havia sido colhido. Desta forma o valor de FR extraído desta parcela não foi utilizado em algumas etapas deste trabalho.

Valores médios dos FR extraídos das 29 parcelas das duas imagens foram então associados com os dados dendrométricos por meio de modelos empíricos. Além disso, estes valores foram também considerados como dados de referência na comparação com os valores de FR simulados pelos modelos. A descrição destes procedimentos está nos itens 4.5 e 4.6, respectivamente.

Além disso, a partir dos valores de FR extraídos das 30 parcelas de cada imagem foi possível caracterizar espectralmente os dosséis florestais de eucalipto. Para isso as 30 parcelas visitadas em campo foram agrupadas segundo sua composição florística (espécie) e de cada espécie (agrupamento) foram escolhidas as parcelas onde os plantios de eucalipto estavam se desenvolvendo no mesmo espaçamento e a mesma classe de solo. Com este agrupamento pretendeu-se selecionar plantios que se desenvolviam nas mesmas condições ambientais, partindo da hipótese de que plantios da mesma espécie que estejam se desenvolvendo em condições ambientais similares apresentam desenvolvimento vegetativo semelhante.

#### **4.4 Caracterização estrutural: definição dos modelos de regressão**

Os valores FR médios extraídos das imagens, referentes aos pixels das 29 parcelas amostradas em campo, em cada faixa espectral de cada imagem (em cada data), excluindo-se a parcela n°. 13 que na imagem do dia 24.05.2009, encontravam-se em talhões que haviam sido colhidos, foram associados aos dados dendrométricos e ao valor de  $D$  mediante o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), como sugerido por Mello et al. (2008) (Equação 4.4). Tal aplicação teve como objetivo avaliar, ao menos empiricamente, quais os graus de relação entre as variáveis dendrométricas,  $D$  e radiométricas.

$$r = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{\text{Var}(x) \times \text{Var}(y)}} \quad (4.4)$$

Em que:

$x$  são os valores radiométricos extraídos das imagens nas seis faixas espectrais;

y são os valores dos dados dendrométricos e  $D$ .

As maiores correlações foram consideradas no estabelecimento de modelos de regressão linear (Equação 4.5) os quais tiveram como variáveis dependentes as dendrométricas e  $D$ , e como variáveis independentes, as radiométricas extraídas das imagens orbitais. O objetivo do estabelecimento destes modelos foi estimar valores das variáveis dendrométricas e  $D$  a partir dos valores de FR extraídos das imagens TM/Landsat5, permitindo então a geração de mapas temáticos contendo classes arbitrariamente estabelecidas das variáveis dependentes. Este procedimento foi adotado para as imagens das duas datas.

$$\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_i \quad (4.5)$$

Onde:

$\hat{Y}_i$  é a variável dependente, neste caso, as variáveis dendrométricas;

$X_i$  é a variável independente, neste caso, as variáveis radiométricas extraídas das imagens e que apresentaram melhores correlações com os dados dendrométricos;

$\beta_0$  e  $\beta_1$  são os parâmetros da regressão linear;

Para a determinação de cada modelo, 2/3 das parcelas (dados dendrométricos e  $D$ ) visitadas em campo (20, de um total de 29 parcelas) foram selecionados aleatoriamente para serem utilizados nos procedimentos de ajuste dos modelos. Os dados das 9 parcelas restantes foram utilizados posteriormente no processo de avaliação dos modelos gerados.

Devido à limitação na quantidade de dados, esse procedimento foi repetido 10.000 vezes, sempre com sorteios aleatórios e independentes, utilizando-se o aplicativo R (*R Development Core Team*, 2009), como indicado por Peternelli e Mello (2007). Foram então gerados 10.000 modelos para cada dado dendrométrico e  $D$ , para ambas as datas a partir de 20 variáveis dependentes (dados dendrométricos e  $D$ ) e independentes (dados radiométricos) selecionadas sempre aleatoriamente. Vale destacar que as vinte parcelas

escolhidas aleatoriamente para o ajuste de cada modelo em uma data foram as mesmas utilizadas para a geração dos modelos na segunda data.

Entre os 10.000 modelos obtidos, para cada variável dendrométrica e  $D$  e para cada data, aquele que apresentou o  $R^2$  mais frequente, entre as 10.000 equações ajustadas, foi utilizado para estimar as variáveis dendrométricas e  $D$  e assim gerar os mapas temáticos para cada data de forma independente.

O mapeamento foi elaborado no aplicativo ArcGIS 9.3 utilizando a ferramenta *Raster calculator* onde a equação de regressão escolhida para cada variável dendrométrica e estrutural foi inserida. A imagem do FR que apresentou maior correlação entre os dados dendrométricos e estruturais foi utilizada no cálculo, neste caso como variável independente. Este procedimento foi aplicado para as imagens das duas datas.

#### 4.4.1 Avaliação e comparação dos modelos de regressão

Para avaliar estatisticamente as possíveis diferenças entre as habilidades preditivas dos modelos relacionados às duas datas de imageamento utilizadas foi aplicado um teste de hipótese de proporção baseado em uma distribuição Gaussiana (representada por uma normal padrão  $Z$ ) (Equação 4.6). O objetivo do teste foi averiguar se existia diferença significativa entre a predição dos valores dendrométricos gerados a partir da aplicação dos modelos ajustados para a data de 22.04.2009 ou gerados a partir da aplicação dos modelos ajustados para data de 24.05.2009.

$$z_{calculado} = \frac{\hat{p} - p}{\sqrt{\frac{pq}{n}}} \quad (4.6)$$

Em que:

$\hat{p}$  é a proporção do número de vezes em que o  $R^2$  de abril foi maior ou igual a  $R^2$  de maio;

$p$  é o valor de proporção adotada para o teste de hipótese, ou seja, o valor de 0,5 o qual se supõem que os modelos ajustados para as ambas as imagens tem a mesma “habilidade” no ajuste;

$q$  é o valor da proporção contrária a adotada para o teste, ou seja, os modelos ajustados para as ambas as imagens não tem a mesma “habilidade” no ajuste; e

$n$  é o número total de observações.

Para isso optou-se pela análise do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de todos os 10.000 modelos ajustados para cada variável dendrométrica e  $D$  e para cada data. Assim, pela contagem de vezes em que o  $R^2$  obtido no ajuste da regressão para uma variável na data de abril era maior que o  $R^2$  obtido para a data de maio foi possível conduzir o teste, realizado sob a hipótese de que, se ambos os modelos tivessem a mesma “habilidade” de predição, então a proporção de vezes em que o  $R^2$  relacionado à imagem de abril foi maior que ao  $R^2$  relacionado à imagem de maio deveria ser igual a 0,5. O teste de proporção com as devidas hipóteses foi:

1)  $H_0$ :  $p = 0,5$  (50% das vezes o  $R^2$  dos modelos ajustados utilizando a imagem de abril foi melhor e 50% das vezes o  $R^2$  dos modelos ajustados utilizando a imagem de maio foi melhor, ou seja, os modelos ajustados para a ambas as imagens tem a mesma “habilidade” de predição);

2)  $H_1$ :  $p > 0,5$  (proporção maior que 50% indica que a imagem de abril apresenta maior “habilidade” no ajuste do modelo).

Adotando um nível de significância de 0,05 a hipótese  $H_0$  é rejeitada quando a estatística do teste ( $z_{calculado}$ ) for maior que o valor tabelado da distribuição ao nível de significância estabelecido ( $z_{crítico} = 1,645$ ).

Outro procedimento estatístico foi aplicado visando avaliar os modelos de regressão ajustados para as duas datas, quanto às suas consistências em relação à capacidade de predição. Os valores das 9 parcelas não utilizados no processo de ajuste do modelo foram então utilizados de modo que fosse possível comparar diretamente os valores

estimados pelo modelo e os valores observados em campo. O objetivo foi verificar se os 10.000 modelos ajustados para cada variável e para cada data apresentam consistência em estimar os parâmetros dendrométricos quando adotado um novo conjunto de dados. Segundo Kutner et al. (2005), uma das melhores formas de medir a real capacidade de predição de um modelo de regressão é utilizando-o para prever cada novo conjunto de dados e em seguida realizar o cálculo do Erro Médio Quadrático de Predição (*MSPR*, do inglês: *Mean Square Prediction Error*) (Equação 4.7). Este erro (*MSPR*) baseia-se na somatória do quadrado da diferença entre os valores das variáveis dendrométricas observados em campo na parcela  $i$  designado para a validação e os valores das variáveis dendrométricas estimadas pelos modelos a partir do valor de FR da parcela  $i$  designado a validação.

$$MSPR = \frac{\sum_{i=1}^{n=9} (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n} \quad (4.7)$$

Em que:

$Y_i$  é o valor da variável dendrométrica observado em campo na parcela  $i$  designado para a validação;

$\hat{Y}_i$  é o valor da variável dendrométrica estimada pelo modelo a partir do valor de FR da parcela  $i$  designado a validação;

$n$  é a quantidade de variável utilizada no processo de validação.

A avaliação do *MSPR* é feita em comparação com o Erro Médio Quadrático (*MSE*, do inglês: *Mean Square Error*) (Equação 4.8). O *MSE* é a somatória do quadrado da diferença entre os dados utilizados para gerar o ajuste do modelo e os valores ajustados na linha do modelo de regressão dividido pelos graus de liberdade perdidos para a estimativa dos parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$ . O erro médio quadrático (*MSE*) corresponde ao desvio dos dados observados  $Y_i$  em torno da linha de regressão ajustada (Figura 4.9). Desta maneira, a avaliação se dá então sobre a comparação entre o *MSPR*, associado às predições (utilizando as 9 parcelas) e o *MSE*, associado ao ajuste do modelo (utilizando

as 20 parcelas): se o valor obtido do *MSPR* for menor que o *MSE*, isso indica que a capacidade preditiva do modelo não é adequada; se o valor de *MSPR* for próximo ao valor de *MSE*, o modelo não é tendencioso e ajusta-se bem aos novos dados; e ainda quando o valor de *MSPR* for superior ao *MSE* indica que o modelo poderá ter boas previsões futuras, utilizando, por exemplo, para uma nova série de dados (KUTNER et al., 2005).

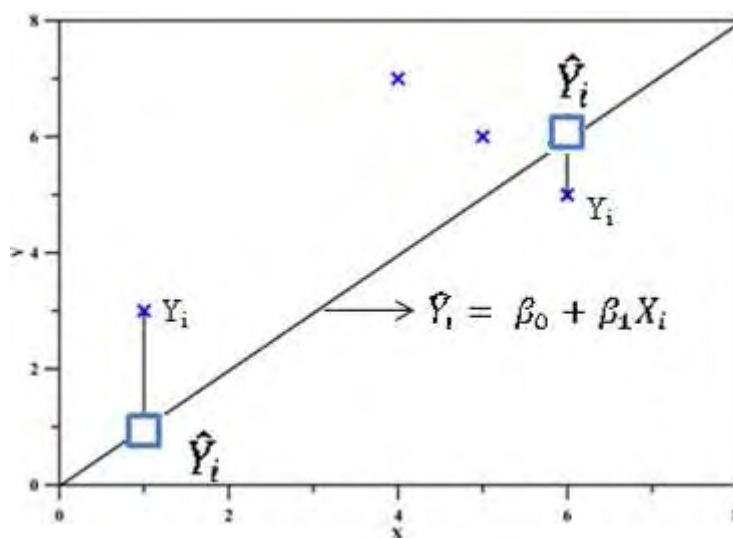


Figura 4.9 - Desvio dos dados observados  $Y_i$  em torno da linha de regressão ajustada.  
Fonte: Adaptado e modificado de Kutner et al. (2005).

$$MSE = \frac{SSE}{n-2} = \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2} \quad (4.8)$$

Em que:

*SSE* é o quadrado da soma dos erros (do inglês, *Error sum of squares*);

$Y_i$  são os valores observados das 19 variáveis dndométricas neste caso utilizadas no ajuste do modelo;

$\hat{Y}_i$  são os parâmetros estimados das variáveis dndométricas neste caso para o ajuste da regressão;

$n-2$  são os graus de liberdade perdidos para a estimativa dos parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$ .

A comparação entre o *MSPR* e o *MSE* foi realizada pela média das diferenças percentuais (Equação 4.9) para os 10.000 pares de modelos ajustados para cada variável dendrométrica e *D*.

$$Diferença = \frac{(MSPR - MSE)}{MSE} \quad (4.9)$$

Quando essa diferença relativa resulta em um valor próximo de 0 indica que eles apresentam similaridade e o modelo não é tendencioso; quando resulta em um valor maior que 1, então *MSPR* é superior a *MSE*, indicando boa predição futura do modelo (KUTNER et al., 2005).

#### **4.5 Aplicação do modelo de transferência radiativa *GRART***

Para aplicação do modelo *GRART* na simulação dos valores de FRB dos plantios de eucalipto, os conjuntos de parâmetros dendrométricos (*Hc*, *Rc* e espaçamento) e radiométricos (propriedade óptica de folha e de substrato) foram usados como dados de entrada e estão descritos nos itens 4.1 e 4.1.1. O modelo foi avaliado na geometria de aquisição das duas imagens. Nas simulações, os dados macroestruturais (espaçamentos e métricas de copas) são utilizados na geração da cena em ambiente computacional (Figura 2.6 a 2.8). Em seguida, o modelo faz uso dos parâmetros microestruturais (densidade de folhagem, distribuição angular de folhas) e ópticos para modelar a FDRB dos estandes de plantas. As frações de radiação direta e difusa (modeladas pela função de transferência de radiação na atmosfera do modelo) foram obtidas com o mesmo conjunto de parâmetros aplicados para a correção das imagens com o modelo *6S*. Destaca-se aqui que o modelo de transferência (BIRD, 1984) implementado no modelo *GRART* já foi validado contra o modelo *6S*.

Dada a dificuldade de se medir e avaliar estatisticamente a qualidade das medições em fitometria (Ross, 1981), torna-se necessário apontar e contornar problemas de incertezas que aparecem na parametrização dos modelos de transferência radiativa. Por exemplo, como não foi possível contar com imagens de alta resolução de todos os talhões estudados, a estimativa da direção da linha de plantio foi feita com incerteza variável. Para mitigar essa incerteza, também foram feitas simulações em que se assumiu



distribuição aleatória de plantas no estande. Desta forma, nessa simulação a orientação da linha de plantio foi negligenciada e apenas a densidade de plantas em função dos espaçamentos foi considerada. Esse tipo de simulação é afim aos modelos GO para comunidades naturais de plantas (HUEMMRICH, 2001).

O modelo *GRART* aceita que a direção da linha de plantio seja informada por meio da coordenada de dois pontos (Ponto 1 e Ponto 2) coletados ao longo da direção da linha de plantio. Assim, a reta paralela à direção da linha de plantio (identificada em imagens de alta resolução quando disponíveis) e o seu coeficiente angular foram obtidos pela alocação de dois pontos sobre as imagens de alta resolução do “Google Earth”. A Figura 4.10 mostra um exemplo do procedimento, neste caso as coordenadas obtidas dos dois pontos na direção da linha de plantio estão localizados na parcela 6. Devido à falta de cobertura com imagens de alta resolução em algumas regiões da área de estudo, a direção da linha de plantio em alguns pontos foi de difícil visualização, o que gerou incerteza e motivou a realização de simulações em que essa informação pode ser negligenciada.

É evidente que as datas das imagens de alta e média resolução espacial disponibilizadas no produto da Google não correspondiam as datas da coleta dos dados de campo utilizados neste trabalho. Porém, as locações das linhas de plantio realizadas em culturas desenvolvidas em linha como o eucalipto é determinada depois de diversos estudos focando as melhores maneiras de aproveitamento da radiação solar, do escoamento da água, entre outras. Segundo Paiva et al. (2008) as linhas de plantio são orientadas, sempre que possível, na direção leste-oeste. Assim uma vez determinada à linha de plantio naquele talhão, dificilmente esta locação será mudada.



Figura 4.10 - Imagens de alta resolução disponibilizadas no aplicativo “Google Earth” e utilizadas para coleta das coordenadas de dois pontos dentro de cada talhão para informação da direção da linha de plantio.

Fonte: Adaptado do “Google Earth” (2010).

De todos os dados necessários para aplicação do modelo *GRART*, alguns deles não foram coletados em campo. Os dados de índice de área foliar (IAF), que são altamente relacionados com os parâmetros da estrutura do dossel, foram coletados na literatura. De acordo com Xavier et al. (2002), os valores médios deste índice encontrados em cinco clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden com idade variando de 1 a 7 anos, é de 2,86. Segundo os autores, as relações entre este índice e as idades dos plantios foram distintas entre os clones, por isso, neste caso, optou-se por adotar o valor médio destacado pelos autores. A partir destes valores de IAF foi possível estimar a densidade de folhagem. Outro parâmetro que não foi medido em campo é a distribuição angular de folhas. Para este estudo foi assumida a distribuição angular das folhas uniformemente.

Como resultado final, o modelo simulou os valores de FRB no intervalo espectral de 400 a 950nm. Este intervalo foi assim estabelecido devido a problemas na sensibilidade

do espectrorradiômetro em questão (SPECTRON SE-590) na região espectral acima de 950 nm.

#### 4.5.1 Avaliação das simulações do modelo *GRART*

A partir dos valores médios dos FRs extraídos das imagens do sensor TM/Landsat5 de ambas as datas, 22.04.2009 e 24.05.2009, em cada faixa espectral, e de cada ponto foram feitas comparações com os dados simulados pelo modelo *GRART*.

As análises e comparações foram realizadas para as bandas do visível (1, 2 e 3) e infravermelho próximo (4), intervalo espectral em que os dados foram simulados pelo modelo. Ainda explorando uma função implementada no modelo, os espectros simulados foram simulados para as bandas do sensor TM/Landsat5 por meio do processo de convolução espectral (Equação 4.10).

$$FRB_b = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} FRB(\lambda) f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f(\lambda) d\lambda} \quad (4.10)$$

Em que:

$FRB_b$  é a reflectância espectral efetiva após a convolução;

$FRB\lambda$  é a reflectância espectral modelada no intervalo espectral da banda ( $\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$ );

$f(\lambda)d\lambda$  é a função de resposta do sensor normalizada no intervalo espectral da banda (Figura 4.11).

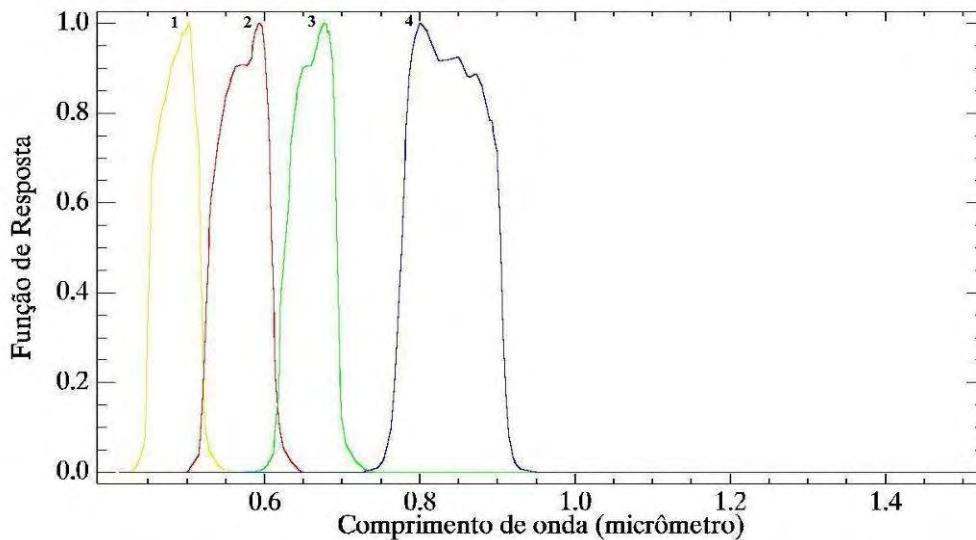


Figura 4.11 - Funções filtro de resposta do sensor TM/Landsat5. Os números identificam as funções filtro de cada Banda (1, 2, 3, 4) respectivamente.  
 Fonte: Biblioteca espectral de funções filtro ENVI 4.2.

A partir dos espectros simulados e já convoluídos para as bandas do sensor TM/Landsat5 as comparações entre estes valores e os valores de FR observados foram feitas de duas maneiras: por meio da análise visual e por meio da análise estatística entre os dados.

Primeiramente, por meio de gráficos que mostram os espectros observados e simulados em cada faixa espectral foi realizada análise comparativa visual baseada na caracterização espectral dos dosséis de eucalipto. Esta análise teve como objetivo observar se os espectros simulados dos talhões em estudo em cada faixa espectral apresentavam a mesma dinâmica na caracterização espectral observada por meio dos valores observados e extraídos de cada parcela das imagens.

Com objetivo de avaliar o desempenho global do modelo foi realizada a comparação quantitativa através de uma análise estatística entre os valores simulados e os dados extraídos de cada parcela das imagens. A análise estatística fundamentou-se em duas etapas. A primeira etapa consistiu na comparação entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores de FRB simulados pelo modelo. Para esta comparação foi aplicada a análise de regressão linear simples com o objetivo de avaliar a relação entre os dados observados e os simulados pelo modelo pela análise do coeficiente de determinação  $R^2$ .

Além desta análise comparativa foi de interesse identificar quais dos parâmetros estruturais utilizados como dados de entrada no modelo estariam mais correlacionados ao resultado da diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e FRB simulados pelo modelo em todas as faixas espectrais.

Para o estabelecimento desta relação foi aplicada a análise de regressão linear múltipla (Equação 4.11). A variável dependente ( $Y$ ) neste caso foi obtida por meio da diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores de FRB simulados. As variáveis independentes ( $x_i$ ) neste caso são os valores dos dados estruturais que serviram como dados de entrada do modelo, são eles: altura da copa ( $Hc$ ), raio da copa ( $Rc$ ) e espaçamento.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (4.11)$$

Em que:

$Y$  é a variável dependente neste caso: a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores de FRB simulados;

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  são as variáveis independentes, neste caso: altura da copa ( $Hc$ ), raio da copa ( $Rc$ ), espaçamento;

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$  são os parâmetros da regressão linear múltipla.

Para a análise da regressão múltipla foi utilizado o aplicativo *SPSS 17.0*. O método para seleção das variáveis para o ajuste do modelo foi *stepwise*, com o seguinte critério: probabilidade de  $F$  para inclusão de 0,05 e 0,1 para exclusão. O método *stepwise* desenvolve uma sequência de escolhas das variáveis dependentes para ajuste do modelo de modo automático, de modo que em cada etapa o método adiciona ou exclui uma variável  $x$  automaticamente a fim de obter as melhores variáveis para ajuste do modelo (KUTNER et al., 2005). Enfatiza-se que todas as análises destacadas acima foram realizadas para os resultados obtidos nas duas datas (22.04.2009 e 24.05.2009) por meio da aplicação do modelo considerando e desconsiderando a orientação das linhas de plantio.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Dados coletados em campo

As parcelas visitadas em campo foram separadas por espécie com as respectivas informações cadastrais (como idade, solo, espaçamento) disponibilizadas pela empresa. Ao total foram visitadas 2 parcelas da espécie E1, 5 da espécie E2, 10 da espécie E3, 3 da espécie E4, 4 das espécies E5, 4 da espécie E6 e 2 da espécie E7 (Tabela 5.1). A espécie 3 destaca-se pelo maior número de parcelas amostradas e ainda pela maior variabilidade com relação as idades dos plantios. De acordo com os dados cadastrais disponibilizados pela empresa, os plantios florestais visitados em campo estão se desenvolvendo nos solos: LV1- Latossolo Vermelho Distrófico típico, A moderado, textura muito argilosa, relevo plano a suavemente ondulado, LV2 - Latossolo Vermelho Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, relevo plano a suavemente ondulado; LV3 - Latossolo Vermelho Distrófico típico, A moderado, textura média, relevo plano a suavemente ondulado; CXBD2 Cambissolo Háplico, Distrófico, latossólico, A moderado, textura argilosa, relevo ondulado a fortemente ondulado (Tabela 5.1)<sup>4</sup>.

Ainda por meio da Tabela 5.1 pode-se perceber que entre as 30 parcelas visitadas em campo, as parcelas que apresentavam plantios em torno de 6 anos de idade foram as mais frequentes e, portanto, plantios dessa idade foram os mais intensamente amostrados. Em contrapartida, parcelas com plantios de 7, 8 e 9 anos foram menos frequentes e, portanto, menos intensamente amostrados. Esta menor representatividade está relacionada com o processo de colheita dos plantios que é efetuado com maior

---

<sup>4</sup> As siglas aqui utilizadas para descrição dos solos não estão de acordo com Oliveira (1999). Foram definidas e disponibilizadas pela empresa FIBRIA.

frequência quando as árvores dos talhões atingem estas idades. A maior parte dos talhões que apresentavam plantios mais velhos no período da realização do trabalho de campo já havia sido colhido ou localizava-se em regiões que se encontravam no processo de colheita. Por normas estabelecidas pela empresa, com a finalidade de preservar a segurança dos funcionários e dos visitantes, a permanência nestes locais era restrita. As únicas três parcelas que foram passíveis de visitação com plantios mais velhos (idades 7, 8 e 9 anos) foram as parcelas 13, 17 e 18 que apresentam características particulares que serão descritas no decorrer deste subitem.

Tabela 5.1 - Idade e espécies dos 30 talhões visitados em campo.

Parcelas	Idade ano(s)	Espécie	Espaçamento	Solo
1	6	E1	3,00 x 1,50	LV2
2	6	E1	3,00 x 1,50	LV2
3	6	E2	3,00 x 2,00	LV2
15	4	E2	3,00 x 2,00	LV2
20	1	E2	3,00 x 2,00	LV3
21	1	E2	3,00 x 2,00	LV2
28	5	E2	3,00 x 2,00	LV1
4	6	E3	3,00 x 2,00	LV2
5	2	E3	3,00 x 2,00	LV2
6	2	E3	3,00 x 2,00	LV2
9	3	E3	3,00 x 2,00	LV2
10	3	E3	3,00 x 2,00	LV3
11	6	E3	3,00 x 2,00	CXBD2
17	8	E3	3,00 x 3,00	LV2
19	1	E3	3,00 x 2,00	LV2
23	2	E3	3,00 x 2,00	CXBD2
30	5	E3	3,00 x 2,00	LV3
7	6	E4	3,00 x 2,00	LV2
12	6	E4	3,00 x 2,00	LV3
16	4	E4	3,00 x 2,00	LV2
8	5	E5	3,00 x 2,00	LV2
18	9	E5	3,00 x 3,00	LV2
24	2	E5	3,00 x 2,00	LV2
27	3	E5	3,00 x 2,00	LV2
13	7	E6	3,00 x 2,00	LV3
25	3	E6	3,00 x 2,00	LV2
26	3	E6	3,00 x 2,00	LV1
29	4	E6	3,00 x 2,00	CXBD2/LV2
14	3	E7	3,00 x 2,00	LV2
22	2	E7	3,00 x 2,00	LV2

Nas Figuras 5.1a, 5.1b, 5.1c, 5.1d, 5.1e e 5.1f são apresentados os dados dendrométricos médios de *DAP*, *H*, *Ht*, *D*, *Rc* e *Hc*, respectivamente. Estes dados médios são



representativos das 10 árvores amostradas em cada parcela visitada e variam basicamente em função da idade dos plantios.

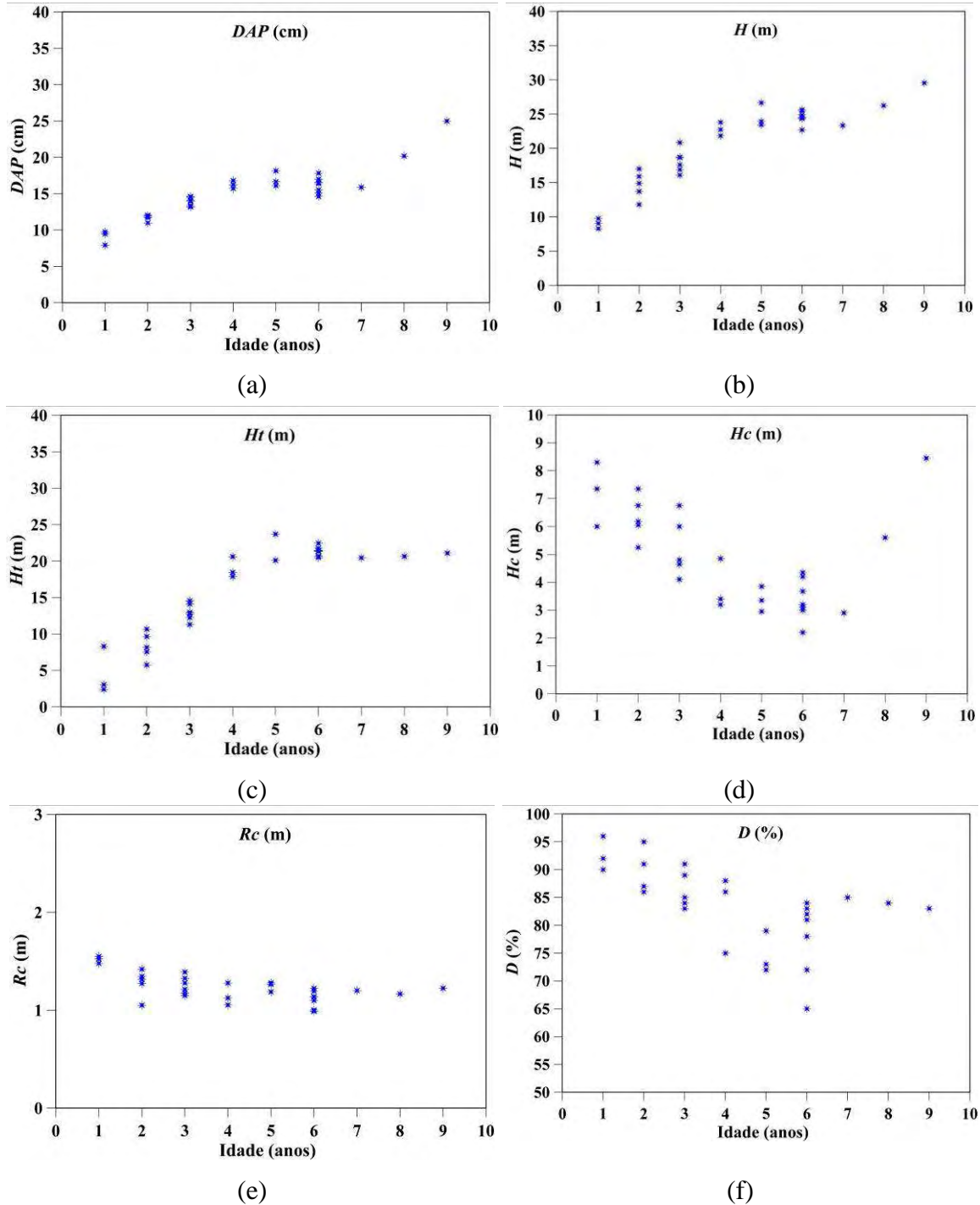


Figura 5.1 - Variação dos parâmetros biofísicos coletados em campo em função da idade, Diâmetro à Altura do Peito (a), Altura total (b), Altura Comercial (c), Altura da Copa (d), Raio da Copa (e) e Densidade da Cobertura do dossel (f).

De acordo com os gráficos apresentados na Figura 5.1,  $DAP$ ,  $H$  e  $Ht$  (Figuras 5.1a, 5.1b, 5.1c) apresentaram relação diretamente proporcional com a idade dos plantios, ou seja, quanto mais velhos os plantios, maiores foram seus valores. Em contrapartida, os valores de  $D$ ,  $Rc$  e  $Hc$  (Figuras 5.1d, 5.1e, 5.1f) apresentaram relação inversa, ou seja, quanto mais velhos os plantios, menores foram os valores destes parâmetros.

Estas relações eram esperadas, pois em plantios mais novos, a biomassa foliar é elevada e como consequência há maior densidade nas partes aéreas do dossel, ao contrário dos plantios mais velhos, nos quais se espera diminuição da biomassa foliar e maior abertura entre as copas (CANAVESI, 2008). Estas observações podem ser visualizadas nas Figuras 5.2a e 5.2b que ilustram as linhas de plantio e as copas de dois talhões que se distinguem pela idade. Na Figura 5.2a destaca-se um talhão no qual as árvores estão com 1 ano de idade e na Figura 5.2b as árvores se encontram com mais de 6 anos de idade. A partir da observação das duas figuras nota-se que em plantios mais velhos ocorrem às maiores aberturas entre as copas do que em plantios mais jovens. Consequentemente, a radiação consegue penetrar mais facilmente nestes dosséis, acarretando a participação de outros elementos localizados no seu interior, competindo então com a biomassa foliar. Além disso, percebe-se que a medida que os plantios envelhecem, há aumento em  $H$ , acompanhado de aumento no  $DAP$ , diminuição de  $Hc$  e diminuição da biomassa foliar.

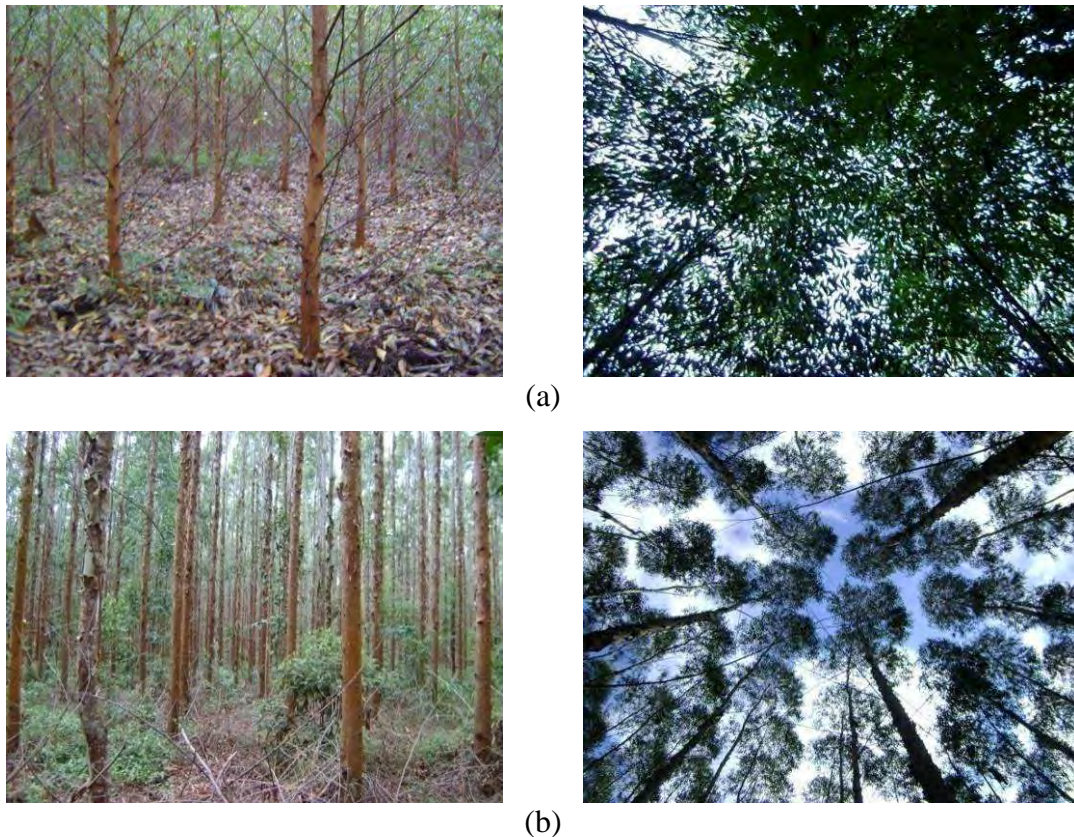


Figura 5.2 - Fotografias das linhas de plantio e abertura da copa em plantações com 1 ano de idade (a); e em plantações com mais de seis anos de idade.

Pelos gráficos apresentados pela Figura 5.1d e 5.1f nota-se que os valores de  $D$  e de  $Hc$  aumentaram com a idade ao invés de diminuir nas parcelas 17 e 18. Esta aparente inconsistência pode estar relacionada a alguns fatores ambientais ocorridos na área, como por exemplo, a geada e também com as práticas de manejo empregadas nestes talhões, principalmente o desbaste seletivo ou sistemático, as quais acabam alterando as características biofísicas/estruturais dos dosséis em relação àqueles sobre os quais não são aplicadas tais técnicas de manejo. No processo de desbaste seletivo ou sistemático os talhões são submetidos a procedimento de retirada de árvores, sendo um aos sete anos de idade, quando se retira em torno de 50% das árvores do talhão para a produção de papel, deixando o restante para a produção de tora que será cortada entre os 12 e 14 anos, dependendo das necessidades e das oportunidades locais de mercado. O objetivo desta atividade é a remoção de árvores com menor desenvolvimento, buscando desta forma, favorecer o crescimento daquelas remanescentes.

Nas parcelas 17 e 18, ocupadas por plantios mais antigos, metade do total de árvores já havia sido retirada quando da realização do trabalho de campo. O procedimento de exploração adotado, segundo os funcionários da empresa, foi o desbaste sistemático. Com a retirada das árvores, as remanescentes tiveram maior espaço para se desenvolver, com aumento do espaçamento entre as linhas de plantio e a diminuição da competição por água, nutrientes e luz (PAIVA et al., 2008). Como apenas nestas duas parcelas foi adotada a técnica de desbaste, acredita-se que este fato explique a existência de maiores valores de *DAP*, maiores alturas (total e de copa); maiores *Rc* e maiores *D* (CHAVES et al., 2007). As árvores quando são plantadas em espaçamentos amplos apresentam copas maiores, galhos mais grossos, maior conicidade do tronco e alcançam maiores diâmetros em idades mais jovens quando comparado com árvores plantadas em menores espaçamentos (PAIVA et al, 2008 ).

A relação dos dados dendrométricos e *D* coletados em campo representativos das 10 árvores amostradas em cada uma das 30 parcelas bem como os dados cadastrais disponibilizados pela empresa FIBRIA de cada parcela visitada são apresentados no Apêndice C.

## **5.2 Medidas radiométricas: folhas e serrapilheira**

Sabe-se que em dosséis agrícolas discretos, como é caso de plantios de eucalipto, a reflexão bidirecional dos solos interfere na energia captada pelo sensor sendo de extrema importância, principalmente nas geometrias em que o substrato está diretamente iluminado e observado. Entretanto, apesar da realização das medições radiométricas das amostras de solos, os espectros gerados não foram utilizados nas simulações computacionais do modelo *GRART*, pois o solo em talhões de eucalipto se apresenta coberto por camadas de folhas, galhos, ramos entre outros (serrapilheira), e vegetação de sub-bosque.

Conforme observado em campo, a cobertura do solo varia em composição e a quantidade de acordo com a idade do plantio, com a localização topográfica do talhão, com os fatores ambientais, entre outros. Verificou-se em campo que em todos os talhões

o solo encontrava-se recoberto (Figura 5.3). Porém, uma variação sazonal na composição do substrato também é esperada.

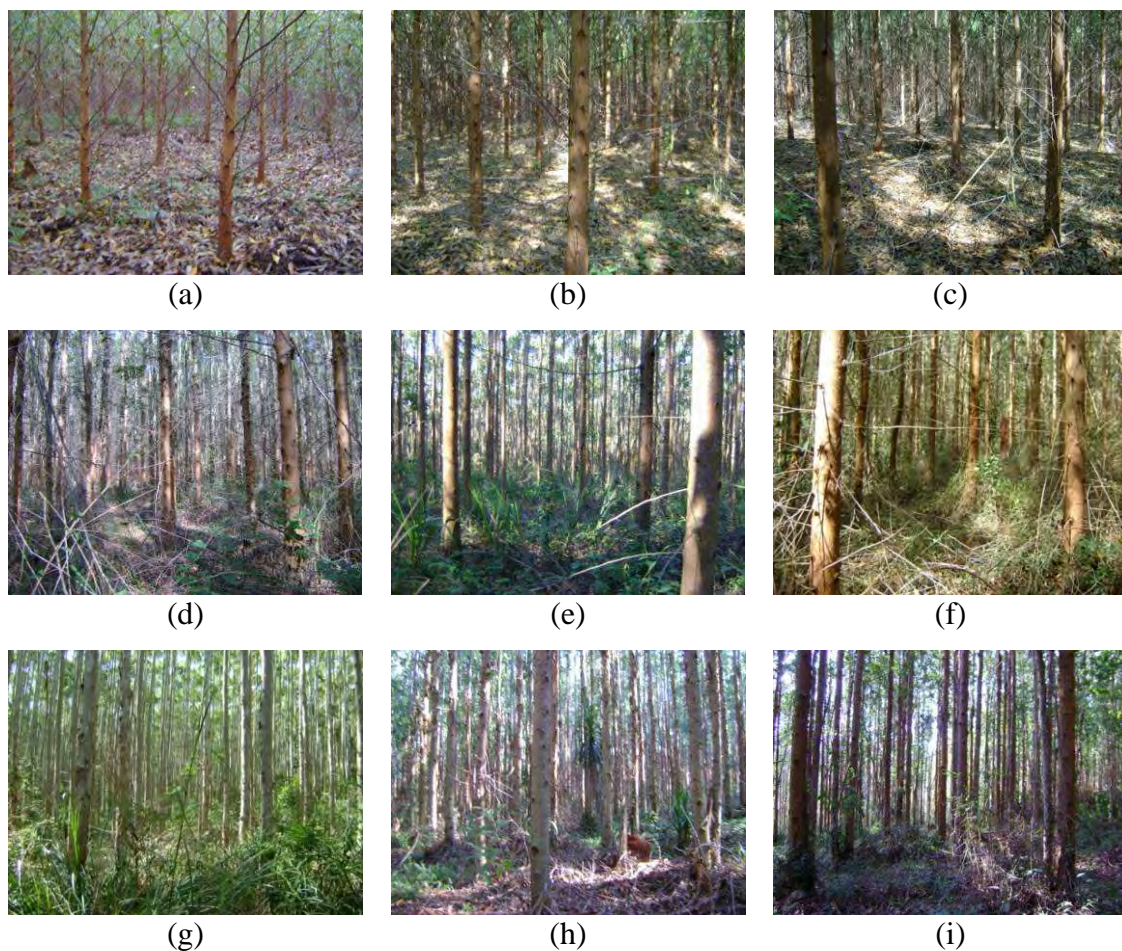


Figura 5.3 - Exemplos da variação dos materiais orgânicos que cobrem o solo variando de acordo com as características ambientais e idade dos talhões, nesta ordem, 1 ano (a), 2 anos (b), 3 anos (c), 4 anos (d), 5 anos (e), 6 anos (f), 7 anos (g), 8 anos (h) e 9 anos (i).

Desta forma, as medições radiométricas realizadas com as amostras de serrapilheira se tornaram mais relevantes na simulação dos valores de reflectância dos dosséis através do modelo *GRART*. A Figura 5.4 apresenta os valores de FRDH resultantes das médias dos espectros das 30 amostras de serrapilheira obtidos a partir do espectroradiômetro Fieldspec®PRO, os quais foram empregados nas simulações computacionais do modelo *GRART*.

Similarmente, a Figura 5.5 apresenta os valores de FRDH, de FTDH e absorptância resultantes da média dos espectros de três tipos de folhas obtidos com a esfera integradora LI-COR 1800 acoplada ao espectrorradiômetro SPECTRON SE-590, os quais foram empregados nas simulações computacionais do modelo *GRART*. A absorptância foi obtida por meio do cálculo  $\text{Absorptância} = 1 - (\text{FRDH} + \text{FTDH})$ . Por meio do gráfico (Figura 5.5) percebe-se que as folhas são transparentes na região espectral do infravermelho próximo. Em contrapartida, menos transparentes nas regiões espectrais do azul e do vermelho onde a absorptância das folhas se destaca. Os espectros de ambas as amostras de folha e de serrapilheira estão apresentadas na mesma amplitude espectral que o modelo simulou os dados de FRB, ou seja, entre 400 e 950 nm.

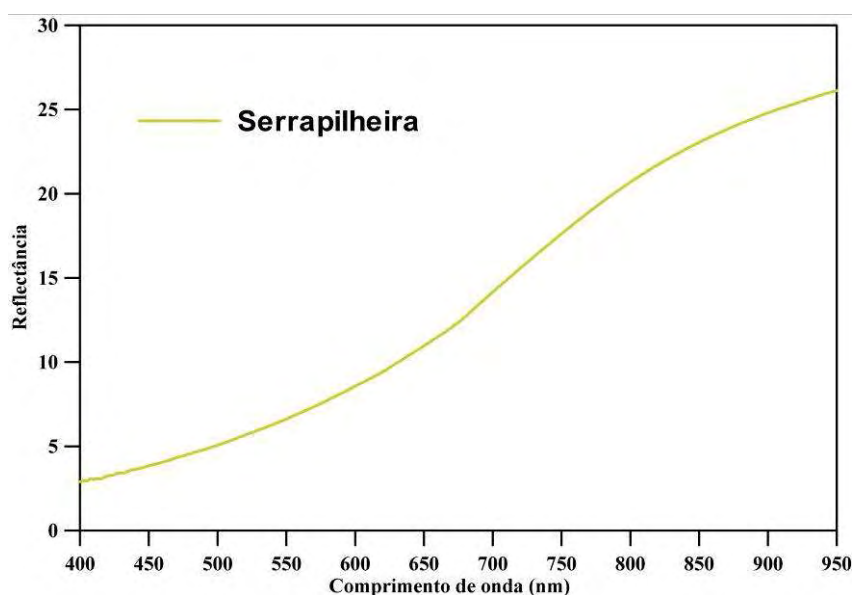


Figura 5.4 - Valores FRDH médios obtidos a partir das 30 amostras de serrapilheira os quais foram empregados nas simulações computacionais.

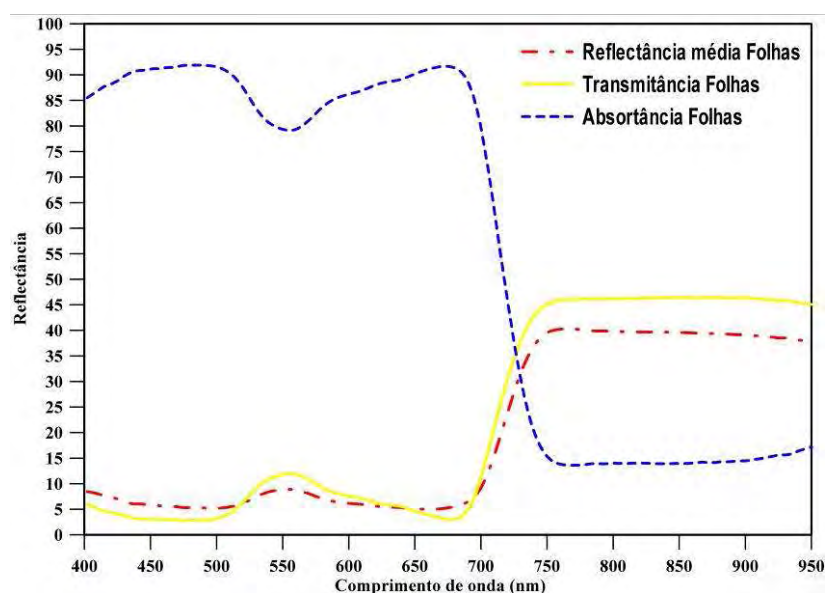
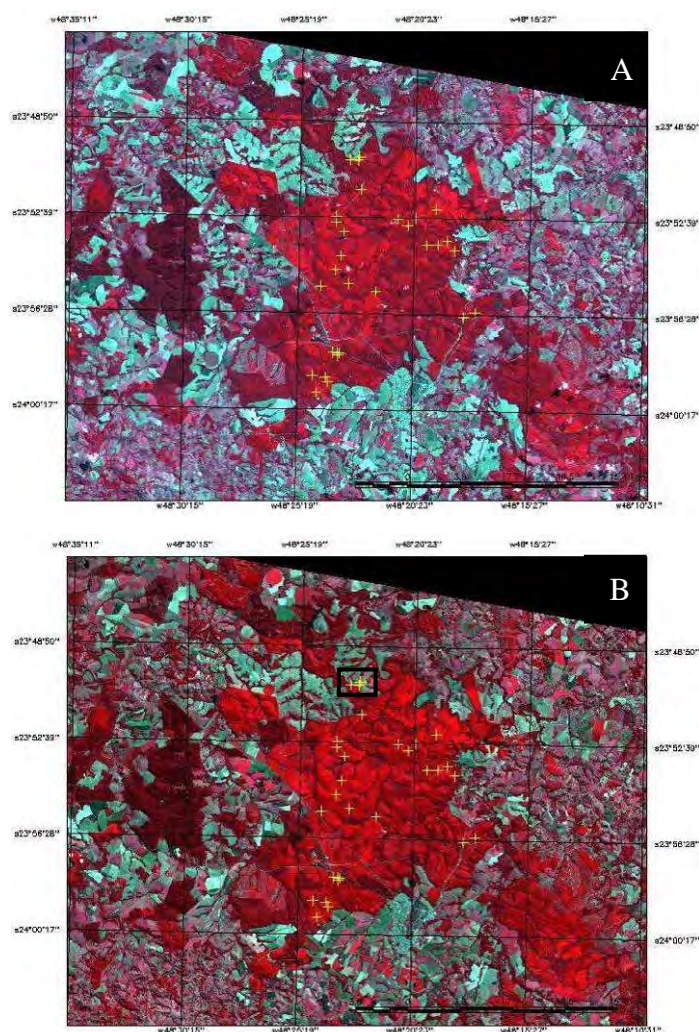


Figura 5.5 - Valores FRDH, FTDH e absortância médios obtidos a partir dos três tipos de folhas os quais foram empregados nas simulações computacionais.

### 5.3 Imagens Orbitais: localização espacial das parcelas coletadas em campo

As imagens correspondentes aos dias 22.04.2009 e 24.05.2009 que foram utilizadas no estudo estão apresentadas nas Figuras 5.6A e 5.6B, respectivamente. Após os devidos processamentos das imagens, as coordenadas das parcelas visitadas em campo, foram localizadas sobre elas com o objetivo de precisar a localização espacial das mesmas no interior de cada talhão para posterior extração dos valores de FR.



**Imagem: TM/Landsat 5**  
**Projeção: Geográfica (Latitude/Longitude)**  
**Datum: WGS84**  
**Composição colorida: RGB (432)**  
**Ano: 2009**

**Legenda:**  
+ Parcelas coletadas em campo.  
 Parcela 13 localizada em plantios colhidos.

Figura 5.6 - Imagens correspondentes aos dias 22.04.2009 (A) e 24.05.2009 (B) corrigidas radiometricamente e geometricamente do sensor TM/Landsat5 que foram utilizadas no trabalho.

Analisando a distribuição espacial das 30 parcelas nas duas imagens, nota-se que algumas delas localizaram-se em bordas dos talhões. Entre estas parcelas destacam-se as parcelas 11, 12, 13, 20, 21 e 29. Além disso, a parcela 13 localizou-se no talhão inserido no setor da Unidade Florestal de Capão Bonito que se encontrava em processo de colheita na semana da realização do trabalho de campo. Desta forma, a localização desta parcela, que correspondia a um dossel em pleno desenvolvimento vegetativo na imagem



do dia 22.04.2009, na imagem do dia 24.05.2009, dezesseis dias após o trabalho de campo, apresentava-se com solo exposto/substrato exposto (Figura 5.6B). A partir desta constatação, os valores do FR extraídos desta parcela não foram considerados na aplicação dos modelos empíricos gerados para ambas as datas. Porém, na análise comparativa entre os valores de FRB simulados pelo modelo e os valores observados nas imagens, a comparação para esta parcela foi realizada somente para os valores extraídos da imagem do dia 22.04.2009.

#### **5.4 Classes de fator de iluminação e extração dos valores de fator de reflectância das imagens**

Para o cálculo da equação do fator de iluminação para as imagens do sensor TM TM/Landsat5 dos dias 22.04.2009 e 24.05.2009, os dados utilizados estão apresentados na Tabela 5.2, considerando o horário e a geometria de aquisição das imagens:

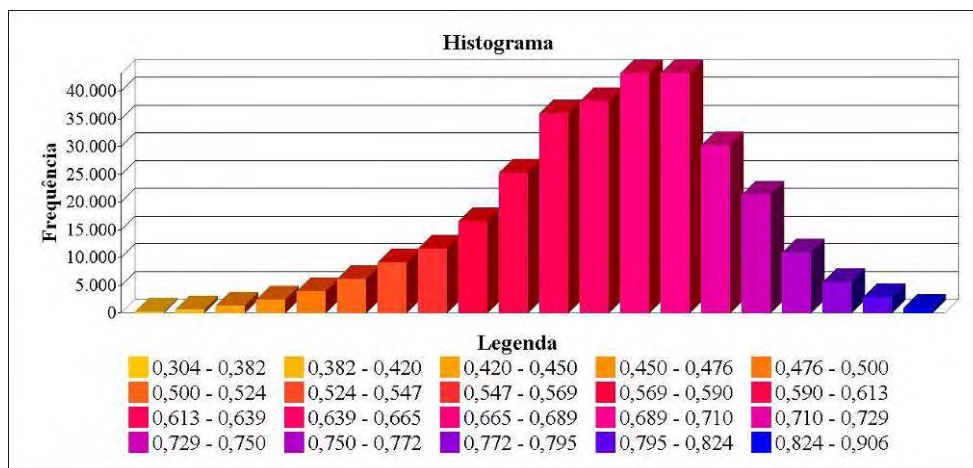
Tabela 5.2 - Dados que representam a geometria de visada e iluminação das duas passagens do satélite.

<b>Dados</b>	<b>Valor imagem dia</b>	
	<b>22.04.2009</b>	<b>24.05.2009</b>
<b><math>\theta_s</math> é o ângulo zenital</b>	48,8294°	55,178°
<b><math>\theta_t</math> é a declividade</b>	Imagem TOPODATA	Imagem TOPODATA
<b><math>\psi_s</math> é o azimute solar</b>	44,9668°	37,5926°
<b><math>\psi_t</math> é a orientação da vertente</b>	Imagem TOPODATA	Imagem TOPODATA

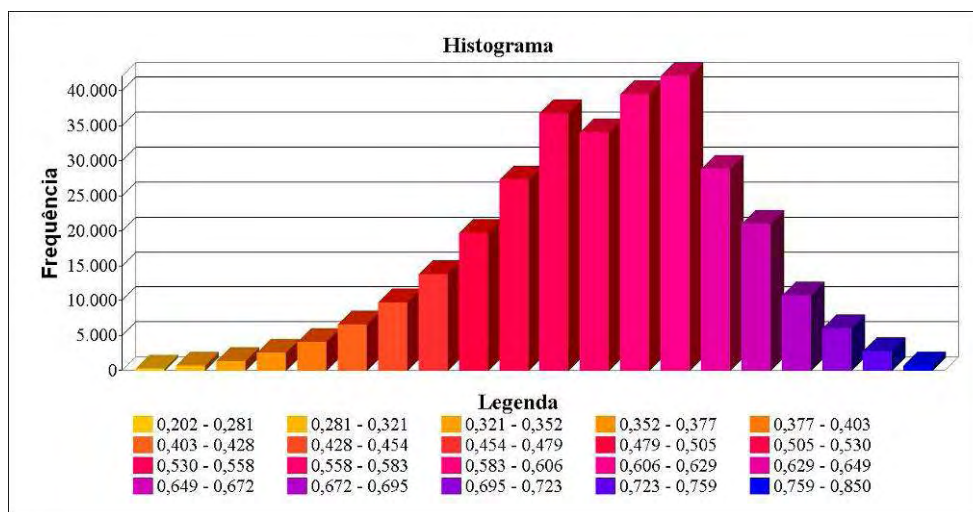
Os valores obtidos por meio do cálculo da equação do fator de iluminação para os dias 22.04.2009 e 24.05.2009 estão ilustrados nas Figuras 5.7a e 5.7b, respectivamente. Os resultados obtidos a partir da equação 4.3 variam entre 0 e 1. Os valores próximos a zero, correspondem a locais opostos ao Sol, ou seja, correspondem aos pixels com pouca iluminação. Em contrapartida, os valores próximos a 1 correspondem a locais que se encontram voltados para o Sol, correspondendo a pixels mais iluminados.

A variação das três classes definidas por meio das combinações (valores máximos e mínimos que variaram na equação) para a imagem do dia 22.04.2009 e 24.05.2009 foram, respectivamente: classe pouco iluminada 0,304 a 0,63 e 0,202 a 0,54; classe

iluminada 0,63 a 0,69 e 0,54 a 0,61 e para classe muito iluminada 0,69 a 0,9 e 0,61 a 0,85. As Figuras 5.8a e 5.8b mostram os mapas das classes de iluminação para as duas imagens, 22.04.2009 e 24.05.2009, respectivamente e com as parcelas visitadas em campo.

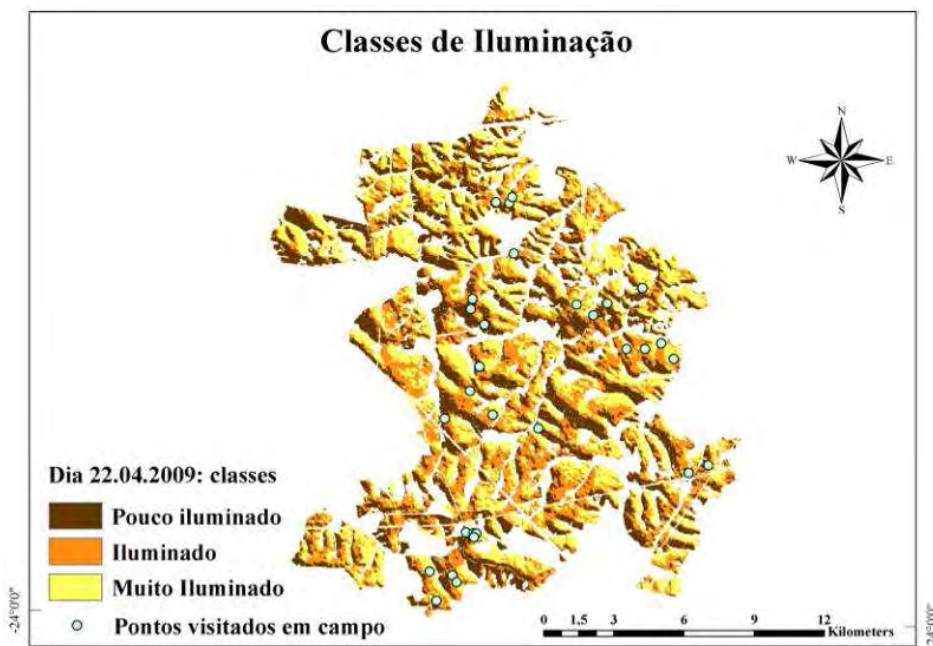


(a)

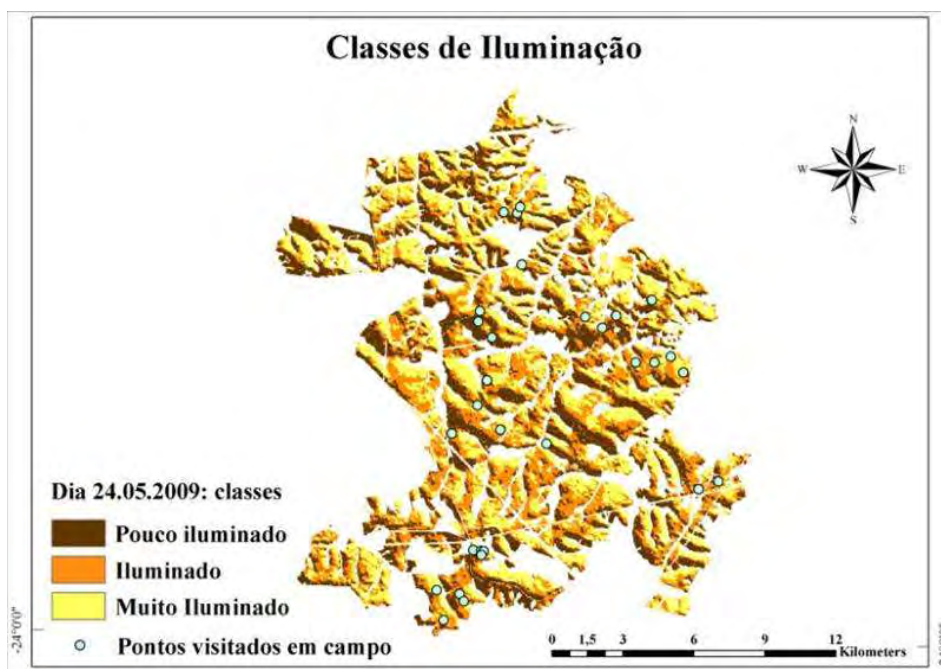


(b)

Figura 5.7 - Histograma dos valores obtidos por meio do cálculo da equação do fator de iluminação para imagem do dia 22.04.2009 (a) e para imagem do dia 24.05.2009.



(a)



(b)

Figura 5.8 - Classes de iluminação referentes à imagem do dia (a) 22.04.2009 e (b) 24.05.2009. As classes de iluminação ao longo das duas datas permaneceram iguais para as 30 parcelas visitadas em campo (Figuras 5.7a e 5.7b), e são apresentadas na Tabela 5.3. Estas condições de iluminação do terreno no momento da passagem do satélite foram consideradas na extração dos valores de FR de cada parcela em ambas as imagens, que

foi realizada mediante a utilização das coordenadas registradas em campo, assumindo como referência sempre que possível a média aritmética de uma matriz composta por 3 x 3 elementos pertencentes a mesma classe de iluminação. Os valores de FR médios extraídos de cada parcela, em cada faixa espectral foram considerados como representativos da reflectância do dossel.

Os valores de FR extraídos de ambas as imagens, nas seis faixas espectrais e das 30 parcelas encontram-se destacadas no Apêndice D deste documento.

Tabela 5.3 - Classes de iluminação para cada parcela visitada em campo.

<b>Parcela</b>	<b>Idade ano (s)</b>	<b>Espécie</b>	<b>Espaçamento</b>	<b>Solo</b>	<b>Classe de iluminação para ambas imagens</b>
<b>1</b>	6	E1	3,00 x 1,50	LV2	Iluminado
<b>2</b>	6	E1	3,00 x 1,50	LV2	Muito Iluminado
<b>3</b>	6	E2	3,00 x 2,00	LV2	Muito Iluminado
<b>4</b>	4	E3	3,00 x 2,00	LV2	Muito Iluminado
<b>5</b>	1	E3	3,00 x 2,00	LV2	Muito Iluminado
<b>6</b>	1	E3	3,00 x 2,00	LV2	Iluminado
<b>7</b>	5	E4	3,00 x 2,00	LV2	Muito Iluminado
<b>8</b>	6	E5	3,00 x 2,00	LV2	Muito Iluminado
<b>9</b>	2	E3	3,00 x 2,00	LV2	Iluminado
<b>10</b>	2	E3	3,00 x 2,00	LV3	Iluminado
<b>11</b>	3	E3	3,00 x 2,00	CXBD2	Iluminado
<b>12</b>	3	E4	3,00 x 2,00	LV3	Pouco Iluminado
<b>13</b>	6	E6	3,00 x 2,00	LV3	Muito Iluminado
<b>14</b>	8	E7	3,00 x 2,00	LV2	Pouco Iluminado
<b>15</b>	1	E2	3,00 x 2,00	LV2	Muito Iluminado
<b>16</b>	2	E4	3,00 x 2,00	LV2	Iluminado
<b>17</b>	5	E3	3,00 x 3,00	LV2	Iluminado
<b>18</b>	6	E5	3,00 x 3,00	LV2	Iluminado
<b>19</b>	6	E3	3,00 x 2,00	LV2	Iluminado
<b>20</b>	4	E2	3,00 x 2,00	LV3	Muito Iluminado
<b>21</b>	5	E2	3,00 x 2,00	LV2	Muito Iluminado
<b>22</b>	9	E7	3,00 x 2,00	LV2	Muito Iluminado
<b>23</b>	2	E3	3,00 x 2,00	CXBD2	Muito Iluminado
<b>24</b>	3	E5	3,00 x 2,00	LV2	Pouco Iluminado
<b>25</b>	7	E6	3,00 x 2,00	LV2	Pouco Iluminado
<b>26</b>	3	E6	3,00 x 2,00	LV1	Pouco Iluminado
<b>27</b>	3	E5	3,00 x 2,00	LV2	Iluminado
<b>28</b>	4	E2	3,00 x 2,00	LV1	Pouco Iluminado
<b>29</b>	3	E6	3,00 x 2,00	CXBD2/LV2	Iluminado
<b>30</b>	2	E3	3,00 x 2,00	LV3	Muito Iluminado

#### 5.4.1 Caracterização espectral dos dosséis florestais a partir dos dados radiométricos TM/Lansat 5

Como mencionado anteriormente, os valores de FR médios extraídos de cada parcela, em cada faixa espectral são considerados resultado do processo de interação da radiação eletromagnética com os plantios de eucalipto que compunham aquele talhão em estudo.

Para a caracterização espectral dos dosséis florestais de eucalipto as parcelas visitadas em campo foram agrupadas segundo composição florística como mostrado no primeiro item 5.1 deste capítulo (Tabela 5.1). Entretanto, de cada espécie foram selecionadas apenas parcelas onde as árvores dos talhões estavam plantadas com o mesmo espaçamento e se desenvolvendo no mesmo solo. A Tabela 5.4 mostra as parcelas que satisfizeram as características de interesse e foram selecionadas para a caracterização espectral dos dosséis de eucalipto.

Tabela 5.4 - Parcelas selecionadas para a caracterização espectral dos dosséis de eucalipto.

<b>Espécie</b>	<b>Parcelas</b>	<b>Espaçamento</b>	<b>Solo</b>
<b>E1</b>	1 e 2	3,00 x 1,50	LV2
<b>E2</b>	3, 15 e 21	3,00 x 2,00	LV2
<b>E3</b>	4, 5, 6, 9 e 19	3,00 x 2,00	LV2
<b>E3</b>	10 e 30	3,00 x 2,00	LV3
<b>E3</b>	11 e 23	3,00 x 2,00	CXBD2
<b>E4</b>	7 e 16	3,00 x 2,00	LV2
<b>E5</b>	8, 24 e 27	3,00 x 2,00	LV2
<b>E7</b>	14 e 22	3,00 x 2,00	LV2

A partir dos valores do FR extraídos de cada faixa espectral das parcelas que atenderam as características de interesse (árvores plantadas com o mesmo espaçamento e se desenvolvendo no mesmo tipo de solo) (Tabela 5.4) foram obtidos os gráficos apresentados nas Figuras 5.9a, 5.9b, 5.9c, 5.9d, 5.9e, 5.9f. O objetivo, quando possível foi analisar a dinâmica espectral dos dosséis de eucalipto que se desenvolvem nas mesmas condições de solo e espaçamento, mas em diferentes idades, e em diferentes condições de iluminação quando possível.

As Figura 5.9a e 5.9b apresentam os espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 e 24.04.2009, respectivamente, das parcelas pertencentes à espécie 1 e que

atenderam as características de interesse, quais sejam: árvores dos talhões plantadas com o mesmo espaçamento e se desenvolvendo no mesmo tipo de solo. Os plantios das duas parcelas pertencentes a espécie 1 (Figura 5.9a e 5.9b) tem a mesma idade, porém estão em condições de iluminação diferenciada. Analogamente, as Figuras 5.9c, 5.9d, 5.9e e 5.9f apresentam os espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 e 24.04.2009, respectivamente, de cada faixa espectral, porém referentes as parcelas pertencentes à espécie 3 e 5, e que satisfizeram também as características de interesse as quais são possuir árvores plantadas com o mesmo espaçamento e se desenvolvendo no mesmo tipo de solo. Tanto os plantios das parcelas pertencentes a espécie 3 quanto os plantios das parcelas pertencentes a espécie 5 não possuem a mesma idade e estão em condições de iluminação diferenciada.

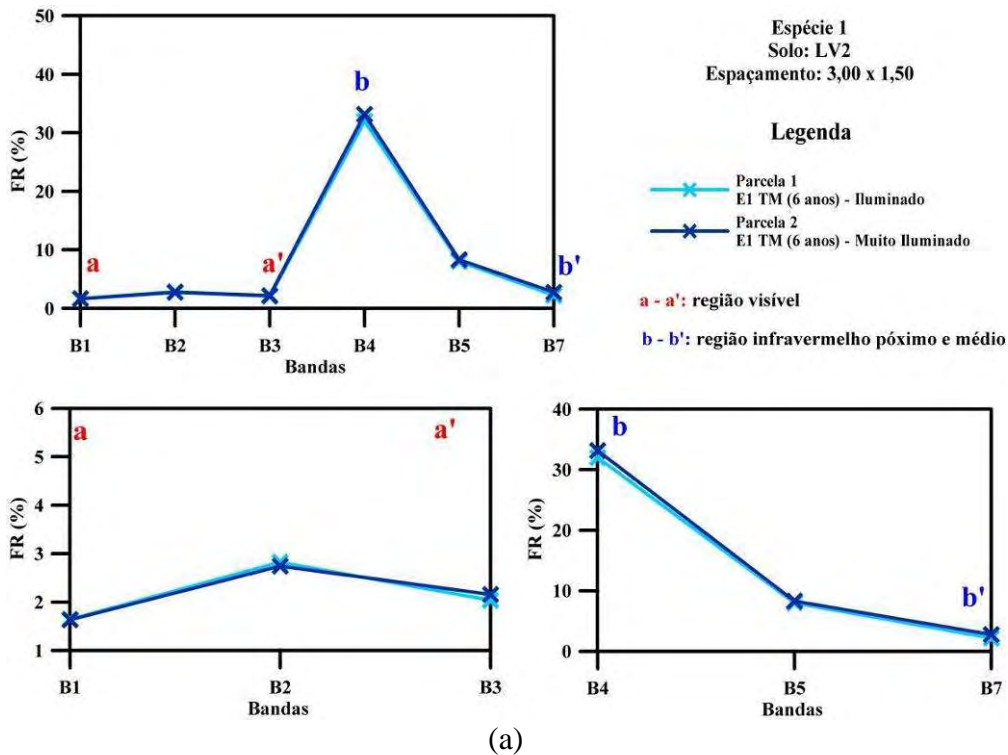


Figura 5.9 - Espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 espécie 1(a); espécie 3(c) e espécie 5(e); espectros médios extraídos das imagens do dia 24.05.2009 espécie 1(b); espécie 3(d); espécie 5(f). (Continua)

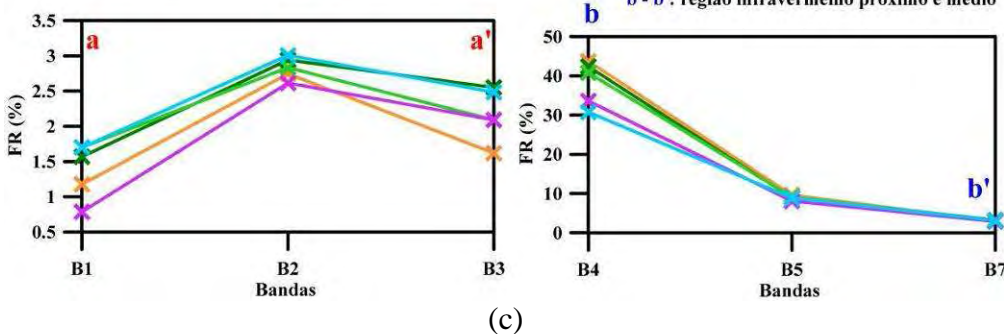
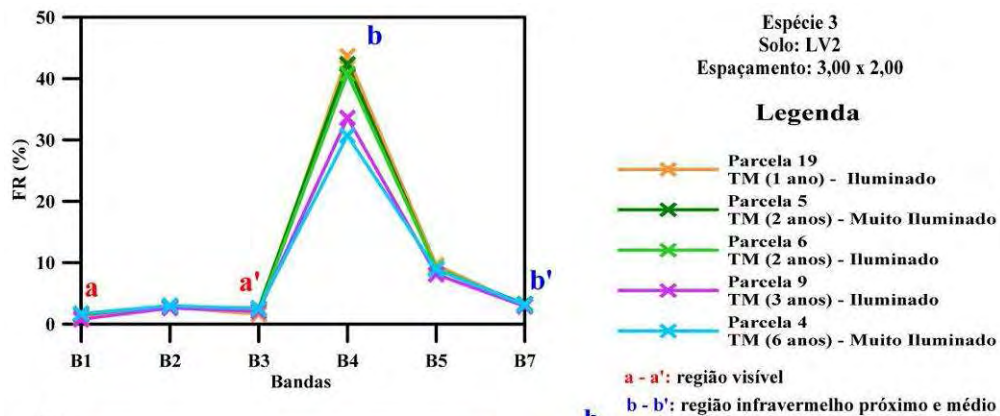
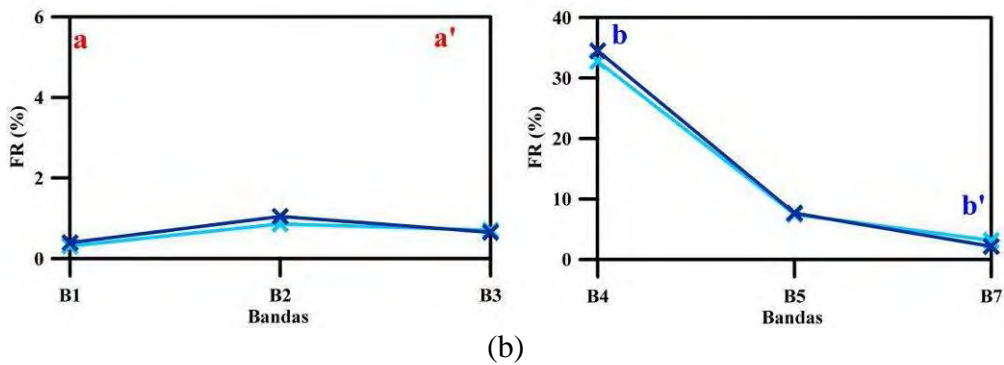
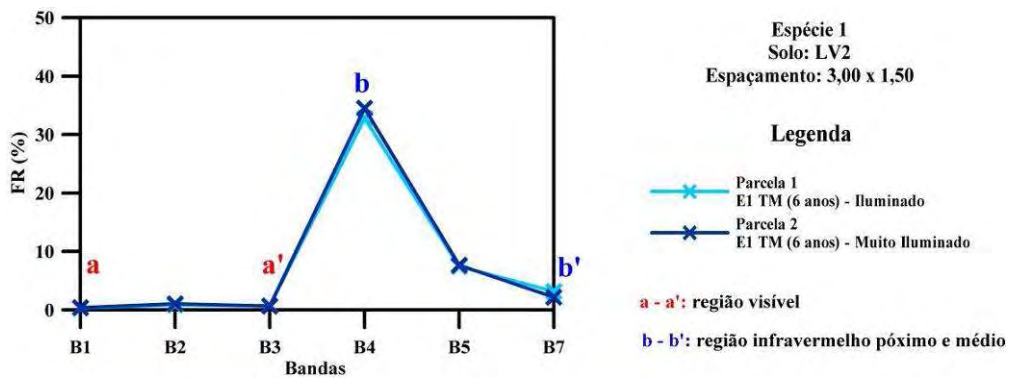
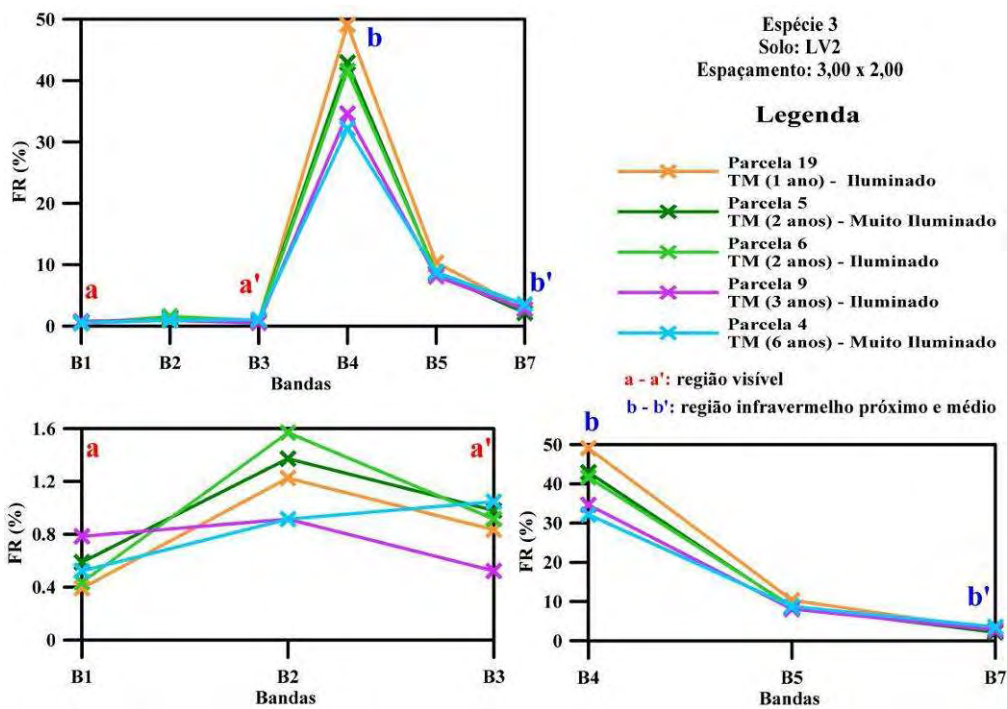
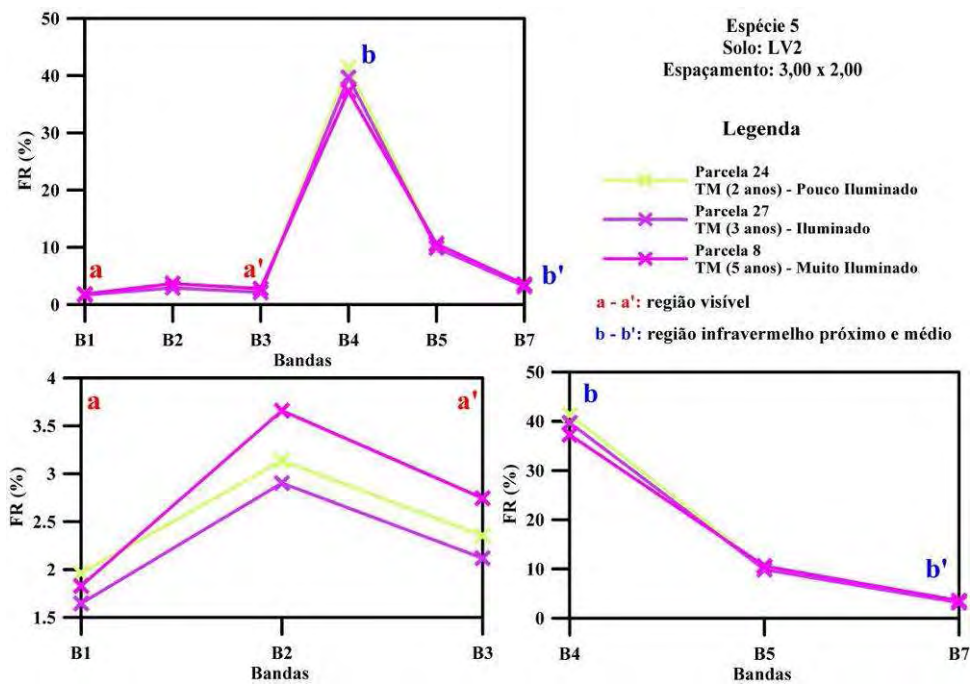


Figura 5.9 - Espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 espécie 1(a); espécie 3(c) e espécie 5(e); espectros médios extraídos das imagens do dia 24.05.2009 espécie 1(b); espécie 3(d); espécie 5(f). (Continua)



(d)



(e)

Figura 5.9 - Espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 espécie 1(a); espécie 3(c) e espécie 5(e); espectros médios extraídos das imagens do dia 24.05.2009 espécie 1(b); espécie 3(d); espécie 5(f). (Continua)



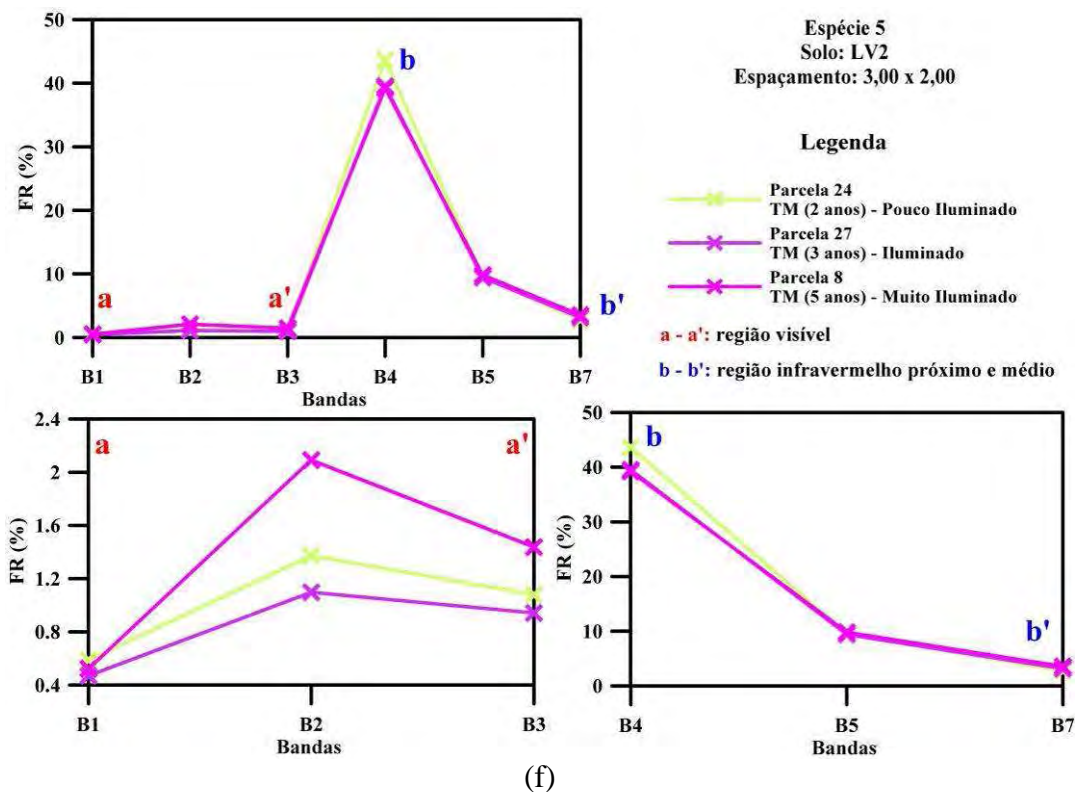


Figura 5.9 - Espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 espécie 1(a); espécie 3(c) e espécie 5(e); espectros médios extraídos das imagens do dia 24.05.2009 espécie 1(b); espécie 3(d); espécie 5(f). (Conclusão)

A partir destes gráficos foi possível constatar que os plantios mais jovens apresentaram maior reflectância na região do infravermelho próximo em relação aos plantios mais velhos. Tal evidência já era esperada, pois quando os plantios são mais jovens há maior concentração de biomassa foliar e maior adensamento das copas e, conseqüentemente, maior brilho nessa região espectral. Quando os plantios ficam mais velhos observa-se o oposto, ou seja, diminuição do brilho na região espectral do infravermelho próximo, devido à redução da biomassa foliar e maior abertura das copas e conseqüentemente maior participação na reflectância do dossel de outros elementos como solo, galhos, troncos, folhas secas. Somando-se a isso, dosséis mais velhos produzem mais sombras nas porções mais superiores, diminuindo também os valores do FR na região do infravermelho próximo. Estas evidências foram também encontradas por Canavesi (2008) ao estudar 5 espécies do gênero *Eucalyptus* em diferentes idades. Li e Strahler (1992) estudaram o efeito do sombreamento e da forma da copa nos valores de FRB de três tipos de vegetação (coníferas, savanas e tipo de arbusto). Os autores verificaram

que, em adição as condições de geometria de iluminação e visada, as modificações nos valores de FRB provocados pelo sombreamento estão relacionados ainda à densidade das copas e de seus formatos.

Para a região do visível não foi possível verificar a mesma evidência. Ou seja, na região do visível os plantios florestais de eucalipto não seguiram uma ordenação consistente quanto a idade como foi verificada na região do infravermelho próximo. Percebe-se pelos gráficos (Figuras 5.9) que não é possível verificar uma constatação nesta região espectral como foi feita para a região do infravermelho próximo.

Outra observação relevante ao analisar os gráficos das Figuras 5.9a e 5.9b, 5.9c e 5.9d e 5.9e e 5.9f é que talhões com a mesma idade e que estão se desenvolvendo nas mesmas condições de solo e de espaçamento, porém em condições de iluminação do terreno diferenciadas, como por exemplo, as parcelas 1 e 2 da espécie 1 e as parcelas 5 e 6 da espécie 3, apresentaram diferenças nos valores de FR na região do infravermelho próximo. Ou seja, as parcelas que apresentaram plantios em condições de melhor iluminação, apresentaram também maior brilho na região espectral do infravermelho próximo. Tais observações corroboram com os resultados alcançados por Canavesi (2008), que ao considerar as classes de iluminação para a coleta de amostras de treinamento, conseguiu distinguir melhor as espécies do gênero *Eucalyptus* spp. na classificação digital de dosséis.

Estas análises foram feitas para os valores de FR extraídos das duas datas 22.04.2009 e 24.05.2009, para os demais agrupamentos em que as árvores estivessem plantadas com o mesmo espaçamento e se desenvolvem no mesmo tipo de solo. Entre as sete espécies consideradas neste estudo, as parcelas da espécie 6 foram as únicas que não se encaixaram nestas características, ou seja, as árvores das espécies 6 se desenvolviam no mesmo espaçamento, são da mesma espécie, porém se desenvolviam em solos diferenciados (Tabela 5.1). Por isso este tipo de análise não coube com os talhões representativos da espécie 6.

Os gráficos das demais espécies para as duas datas encontram-se destacadas no Apêndice E deste documento.

## 5.5 Modelos empíricos: mapeamento

A partir então dos dados apresentados nos Apêndices C e D foram determinados os coeficientes de correlação ( $r$ ) entre as variáveis dendrométricas e  $D$  e os valores de FR para as duas datas, cujos resultados encontram-se apresentados na Tabela 5.5. Observando os valores de  $r$  apresentados na Tabela 5.5, verifica-se que os valores mais significativos foram determinados para os valores de FR da Banda 4 em ambas as datas.

Tabela 5.5 – Coeficientes de correlação ( $r$ ) entre variáveis dendrométricas e estruturais e os valores de FR.

Variáveis	Coeficientes de correlação significativos para $p < 0,05$ assinalados em negrito (N=29)					
	FR_B1	FR_B2	FR_B3	FR_B4	FR_B5	FR_B7
<b>Dia 22.04</b>						
<i>DAP</i>	0,03	0,13	0,13	<b>-0,70</b>	-0,28	0,00
<i>H</i>	0,06	0,18	0,21	<b>-0,79</b>	-0,28	-0,01
<i>Ht</i>	0,12	0,24	0,27	<b>-0,72</b>	-0,18	0,04
<i>Hc</i>	-0,28	-0,32	-0,34	<b>0,45</b>	0,09	-0,08
<i>Rc</i>	0,07	-0,03	-0,19	<b>0,61</b>	0,41	0,09
<i>Densitômetro</i>	-0,01	-0,04	-0,06	<b>0,63</b>	0,17	0,08
<b>Dia 24.05</b>						
<i>DAP</i>	-0,03	0,08	-0,12	<b>-0,67</b>	-0,32	-0,02
<i>H</i>	-0,07	0,14	-0,10	<b>-0,74</b>	-0,31	0,07
<i>Ht</i>	-0,15	0,24	-0,04	<b>-0,69</b>	-0,25	0,17
<i>Hc</i>	0,37	-0,45	-0,27	<b>0,32</b>	0,06	-0,32
<i>Rc</i>	-0,11	-0,17	0,09	<b>0,57</b>	0,30	0,01
<i>Densitômetro</i>	0,12	0,09	0,00	<b>0,61</b>	0,30	-0,15

Os valores negativos de  $r$  para as relações entre os valores de FR da Banda 4 e  $DAP$ ,  $H$  e  $Ht$  eram esperados (Tabela 5.5), uma vez que plantios mais velhos devem produzir mais sombras no topo do dossel, diminuindo então os valores de FR (CANAVESI; PONZONI, 2007). Tal relação torna-se direta quando são relacionados  $Hc$ ,  $Rc$  e as medidas do Densitômetro com os valores de FR, ou seja, quanto maior a quantidade de folhas no topo do dossel espera-se maiores valores FR (KUMAR, 1974; GOEL, 1988; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

O caráter anisotrópico dos dosséis, a falta de controle sobre outras variáveis que condicionam o campo de radiação (densidade de folhagem, propriedade óptica de folhas, entre outros) e as possíveis imperfeições no procedimento de correção atmosférica nas imagens das duas datas, dificultam o estabelecimento da correlação

entre os dados de reflectância e os dados coletados em campo. Apesar disso, observou-se que houve consistência nos valores de correlação que foram superiores (ou inferiores dependendo se a relação é inversa ou direta) nas relações estabelecidas entre os dados estruturais e os radiométricos em ambas as passagens (Tabela 5.5). Esse resultado foi consistente com aquele encontrado por Ponzoni et al. (in press) quando no estudo de correlações entre biomassa aérea de formações florestais na região da Floresta Nacional do Tapajós (Pará) e dados radiométricos e multi-angulares do sensor CHRIS/PROBA.

A variável *DAP* e aquelas relacionadas à altura do dossel apresentaram os maiores valores dos coeficientes de correlação. Considerando que a reflectância espectral de dosséis vegetais é fortemente influenciada pelas folhas (reflexão) e pela quantidade delas (KUMAR, 1974; GOEL, 1988; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007), acredita-se que as maiores correlações encontradas para as variáveis relacionadas à altura do dossel sejam explicadas pelas também fortes relações entre essa altura e as dimensões da copa, incluindo quantidade de folhas (normalmente relações inversas).

Para as relações que apresentaram os maiores valores de  $r$  foram estabelecidos então os modelos de regressão linear tendo como variáveis dependentes as dendrométricas e  $D$  e como variáveis independentes, as espectrais. Para a geração dos mapas temáticos, foi escolhido entre os 10.000 modelos gerados para cada data e para cada variável dendrométrica e  $D$ , aquele que apresentou o  $R^2$  mais frequente. Para verificação e seleção do  $R^2$  mais freqüente para cada data e para cada variável dendrométrica e  $D$ , histogramas foram elaborados a fim de auxiliar nesta análise e escolha. Os histogramas estão apresentados juntamente com as Figuras 5.11 e identificados por “A”. Para facilitar as discussões sobre os mapas temáticos elaborados, foi elaborado outro mapa temático a partir de dados fornecidos pela empresa referente à distribuição espacial das idades dos plantios, o qual se encontra apresentado na Figura 5.10.

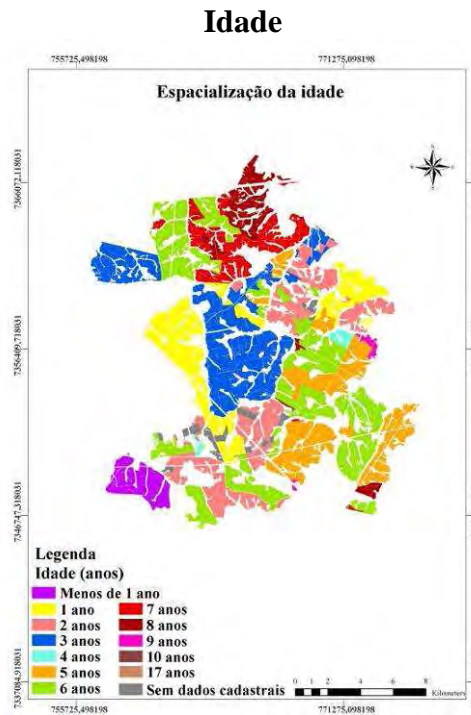
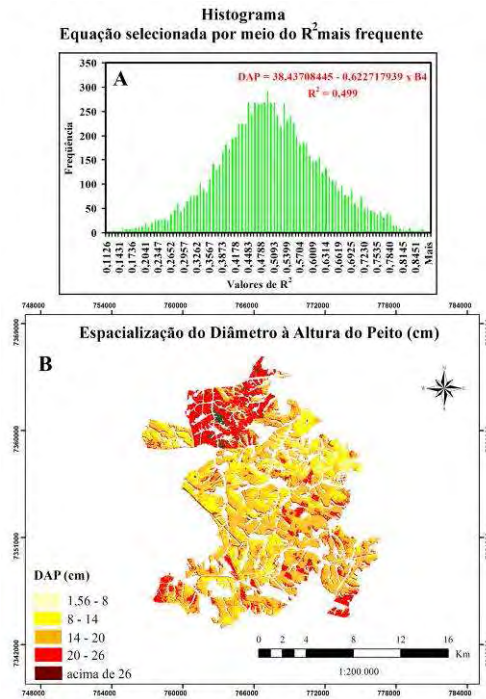


Figura 5.10 - Distribuição espacial da idade dos plantios florestais de eucalipto na Unidade Florestal de Capão Bonito na época da realização do trabalho de campo.

As Figuras 5.11 (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, l, m) apresentam os mapas temáticos elaborados a partir dos modelos que apresentaram o  $R^2$  mais frequente entre os 10.000 modelos gerados, para as duas datas das imagens TM/Landsat5 (22.04 e 24.05), referentes às variáveis  $DAP$ ,  $H$ ,  $Ht$ ,  $Hc$ ,  $Rc$  e  $D$ .

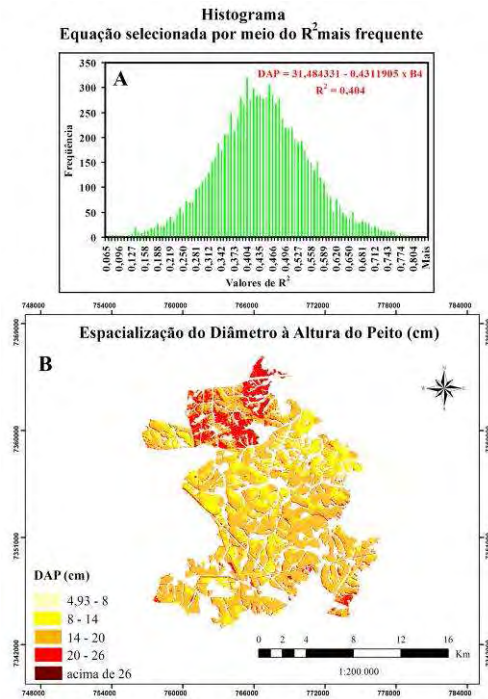
Mediante a análise dos mapas temáticos gerados e em relação àquele referente à distribuição espacial das idades dos plantios (Figura 5.10) na época da coleta de dados em campo, percebe-se que, de maneira geral, houve coerência no mapeamento destas variáveis dendrométricas e de  $D$ . Ou seja, observa-se que os parâmetros dendrométricos como  $DAP$ ,  $H$  e  $Ht$  apresentam os menores valores nos plantios mais jovens e que os parâmetros  $Hc$ ,  $Rc$  e  $D$  apresentam nesses plantios valores mais elevados em relação aos plantios mais velhos. Tal resultado reforça o que foi mencionado no subitem 5.1, que plantios mais jovens apresentam maior biomassa foliar, portanto, maiores valores de  $Hc$ ,  $Rc$  e  $D$ . Em contrapartida percebe-se que os mesmos parâmetros ( $DAP$ ,  $H$ ,  $Ht$ ) apresentaram os maiores valores em regiões onde os plantios mais velhos estão localizados e os parâmetros  $Hc$ ,  $Rc$  e  $D$  apresentam para estes plantios os menores valores.

**Dia 22.04.2009**

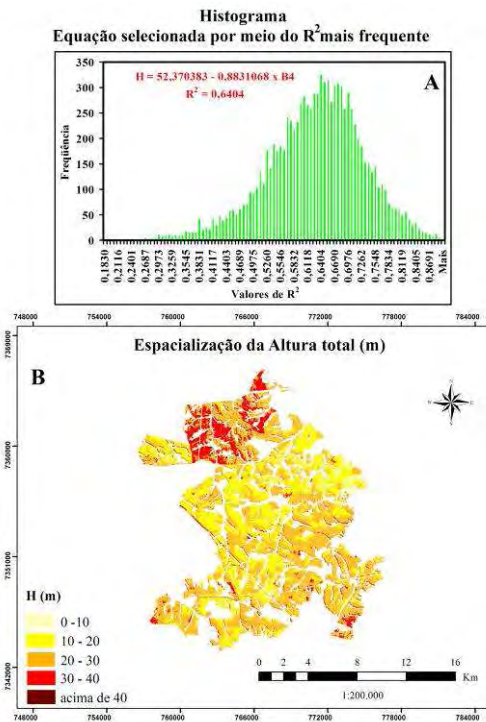


(a)

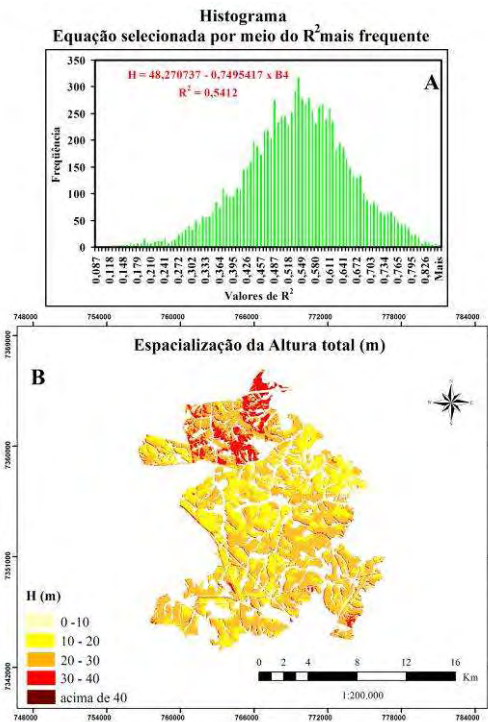
**Dia 24.05.2009**



(b)



(c)

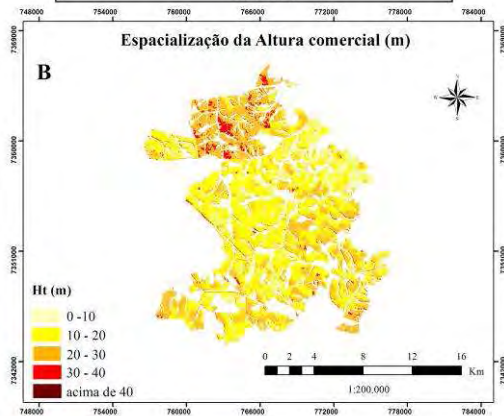
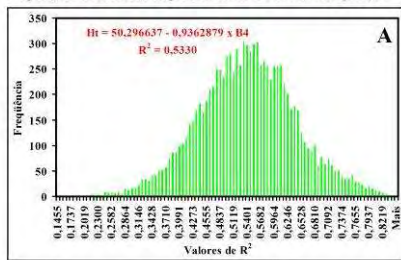


(d)

Figura 5.11 – Mapas temáticos relativos à distribuição espacial de parâmetros dendrométricos e estruturais elaborados a partir do estabelecimento de modelos de regressão linear.(Continua)

**Dia 22.04.2009**

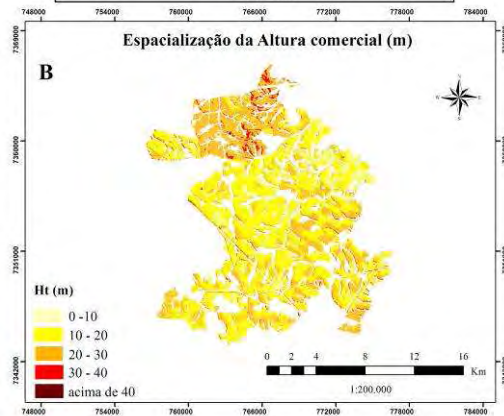
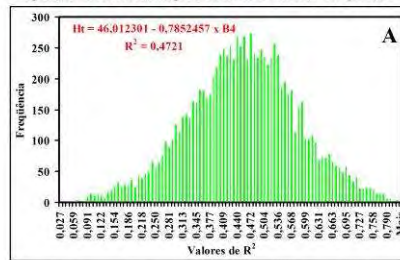
**Histograma**  
Equação selecionada por meio do R<sup>2</sup> mais frequente



(e)

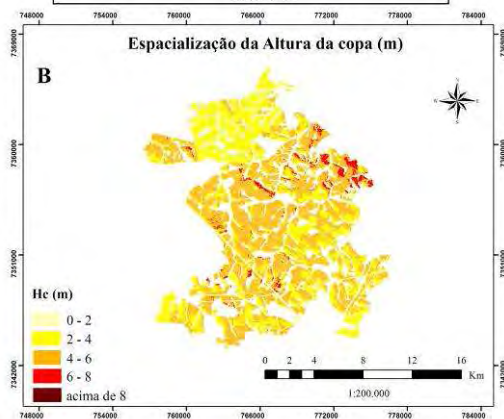
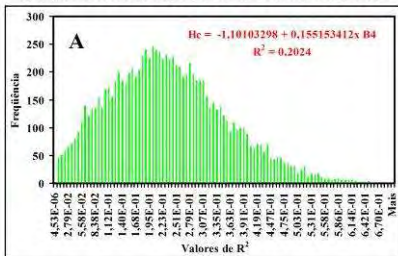
**Dia 24.05.2009**

**Histograma**  
Equação selecionada por meio do R<sup>2</sup> mais frequente



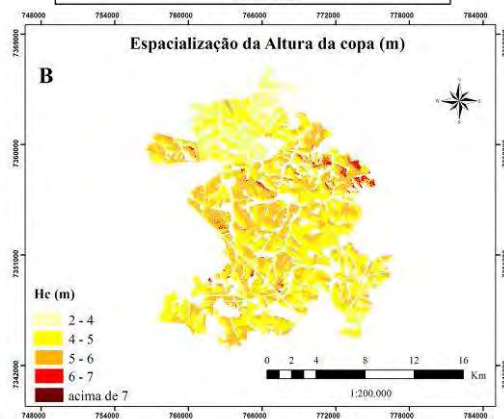
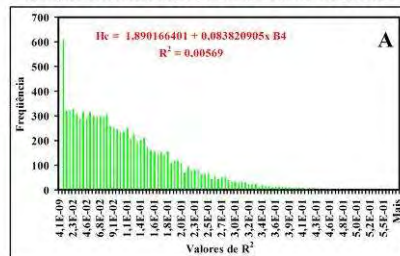
(f)

**Histograma**  
Equação selecionada por meio do R<sup>2</sup> mais frequente



(g)

**Histograma**  
Equação selecionada por meio do R<sup>2</sup> mais frequente

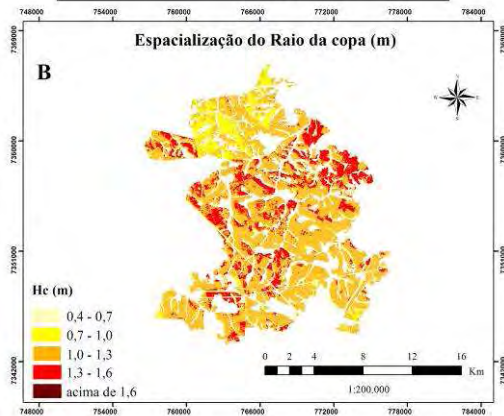
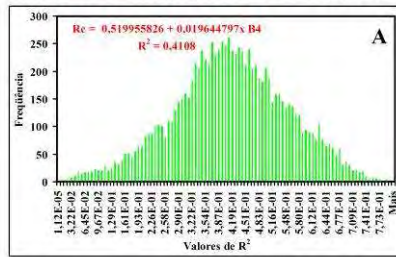


(h)

Figura 5.11 – Mapas temáticos relativos à distribuição espacial de parâmetros dendrométricos e estruturais elaborados a partir do estabelecimento de modelos de regressão linear.(Continua)

**Dia 22.04.2009**

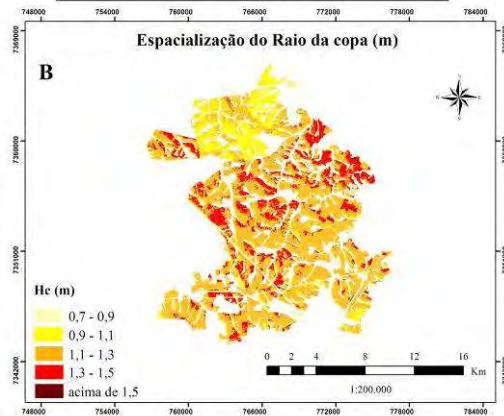
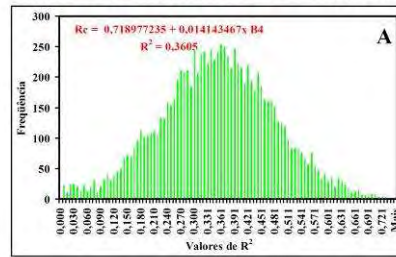
**Histograma**  
Equação selecionada por meio do R<sup>2</sup> mais frequente



(i)

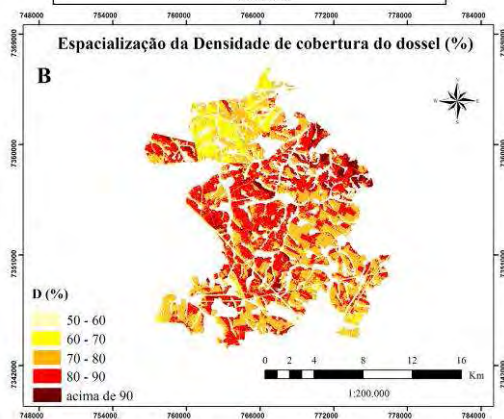
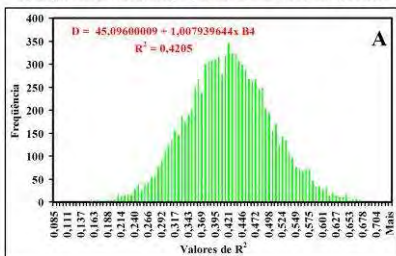
**Dia 24.05.2009**

**Histograma**  
Equação selecionada por meio do R<sup>2</sup> mais frequente



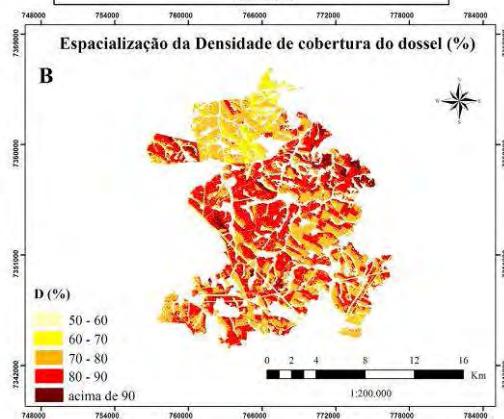
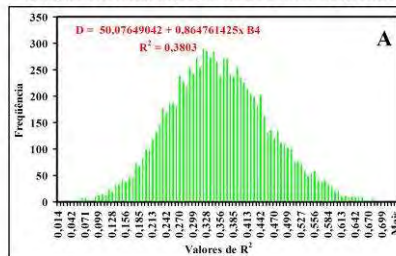
(j)

**Histograma**  
Equação selecionada por meio do R<sup>2</sup> mais frequente



(l)

**Histograma**  
Equação selecionada por meio do R<sup>2</sup> mais frequente



(m)

Figura 5.11 – Mapas temáticos relativos à distribuição espacial de parâmetros dendrométricos e estruturais elaborados a partir do estabelecimento de modelos de regressão linear. (Conclusão)



### 5.5.1 Análise da consistência dos resultados nas diferentes datas

Comparando visualmente os mapas temáticos elaborados a partir dos dados das duas datas (datas) (Figuras 5.11a, 5.11b, 5.11c, 5.11d, 5.11e, 5.11f, 5.11g, 5.11h, 5.11i, 5.11j, 5.11l, 5.11m), constatar-se-á que os mapas foram similares em ambas as datas, indicando consistência nas relações estabelecidas, mesmo considerando número relativamente pequeno de amostras (20) para o estabelecimento dos modelos.

Apesar desta similaridade, o teste de proporção aplicado mostrou que a imagem do dia 22.04.2009 apresentou maior “habilidade” no ajuste dos modelos. Tal fato pode ser analisado pelos dados contidos na Tabela 5.6, na qual se percebe que para todos os parâmetros o valor do teste “ $Z_{\text{calculado}}$ ” foi superior ao valor do “ $Z_{\text{crítico}}$ ”. Com isso, conclui-se que para 5% de significância, como o valor do teste “ $Z_{\text{calculado}}$ ” foi superior ao valor do “ $Z_{\text{crítico}}$ ” (valor de 1,645), rejeita-se  $H_0$ , ou seja, os modelos ajustados para ambas as imagens não apresentaram a mesma “habilidade” de ajuste, sendo os dados da imagem do dia 22.04.2009 mais adequados para o estabelecimento das relações pretendidas.

Tabela 5.6 - Valores calculados para o teste z.

<b>Parâmetro</b>	<b><math>Z_{\text{calculado}}</math></b>
<i>DAP</i>	83,04
<i>H</i>	99,42
<i>Ht</i>	93,64
<i>Hc</i>	98,32
<i>Rc</i>	78,2
<i>D</i>	87,2

Apesar dos modelos ajustados com os dados da imagem do dia 22.04.2009 serem estatisticamente superiores aos ajustes dos modelos da imagem do dia 24.04.2009, optou-se pela validação dos resultados para as duas datas. Assim, para esta etapa foi considerado os dados das restantes 9 parcelas.

Analisando a média da diferença entre os valores *MSPR* e *MSE* (Tabela 5.7), percebe-se que os valores indicaram que na média os erros foram similares e por isso os modelos ajustados apresentaram desempenho satisfatório de predição das variáveis na validação. Para as variáveis *H*, *Ht* e *Hc* a similaridade dos erros foi maior.

Tabela 5.7 - Média da diferença entre os valores MSPR e MSE calculados para os 10.000 ajustes para cada imagem.

<b>Parâmetros</b>	<b>Diferença dia 22</b>	<b>Diferença dia 24</b>
<i>DAP</i>	0,68	0,52
<i>H</i>	0,25	0,25
<i>Ht</i>	0,25	0,22
<i>Hc</i>	0,26	0,25
<i>Rc</i>	0,29	0,25
<i>D</i>	0,30	0,32

Observa-se então que nessa abordagem empírica a escolha/adoção espontânea ou não de uma data específica para a coleta de dados orbitais, implicaria no estabelecimento de modelos específicos com graus de precisão variáveis nas estimativas das variáveis estruturais dos dosséis. Entretanto nota-se que, apesar dos modelos ajustados com os dados da imagem do dia 22.04.2009 serem estatisticamente superiores aos ajustes dos modelos da imagem do dia 24.04.2009, no processo de validação notou-se que os modelos ajustados para as duas datas apresentam desempenho satisfatório na predição das variáveis a partir de um novo conjunto de dados utilizados para validação.

### **5.6 Aplicação do modelo *GRART***

Para aplicação do modelo *GRART* conjuntos de parâmetros estruturais medidos nas 30 parcelas alocadas dentro dos talhões foram utilizados para avaliar o desempenho do modelo *GRART* em simular o FRB dos dosséis de eucalipto (Tabela 5.8).

Tabela 5.8 – Parâmetros dendrométricos medidos nas parcelas alocadas nos dosséis de eucalipto, dados cadastrais fornecidos pela empresa e dados coletados na literatura.

Parcela	Hc (m)	Rc (m)	dy (m)	dx (m)	IAF	Ponto 1 (x,y)		Ponto 2 (x,y)	
1	3,68	1,00	3,00	1,50	2,86	764804,78	7346935,15	764989,87	7347154,01
2	3,10	1,10	3,00	1,50	2,86	764804,78	7346935,15	764989,87	7347154,01
3	4,35	1,14	3,00	2,00	2,86	765354,68	7346871,73	765482,16	7346972,81
4	4,20	1,20	3,00	2,00	2,86	764799,71	7346615,07	765195,00	7346635,17
5	6,75	1,05	3,00	2,00	2,86	764254,95	7344869,73	764590,98	7344900,78
6	6,15	1,27	3,00	2,00	2,86	764254,95	7344869,73	764590,98	7344900,78
7	3,00	1,22	3,00	2,00	2,86	763548,00	7344203,01	763391,46	7344088,29
8	3,35	1,19	3,00	2,00	2,86	763331,86	7345354,35	763453,71	7345212,66
9	6,75	1,18	3,00	2,00	2,86	763934,29	7352013,53	764096,45	7351967,46
10	4,10	1,21	3,00	2,00	2,86	765920,53	7352161,02	765953,82	7351742,65
11	3,20	1,14	3,00	2,00	2,86	765892,69	7360971,73	766057,01	7361160,50
12	2,20	0,99	3,00	2,00	2,86	766489,73	7361008,44	766732,52	7361351,52
13	2,90	1,20	3,00	2,00	2,86	766916,37	7361018,10	767233,39	7361408,13
14	4,80	1,15	3,00	2,00	2,86	765397,73	7354103,09	765695,58	7354169,63
15	4,85	1,05	3,00	2,00	2,86	771711,66	7354884,52	771900,35	7354773,82
16	3,20	1,13	3,00	2,00	2,86	772566,05	7354904,08	772996,03	7354665,02
17	5,60	1,17	3,00	3,00	2,86	773188,91	7354656,13	773769,43	7354370,47
18	8,45	1,23	3,00	3,00	2,86	773091,02	7354956,93	773298,69	7355130,32
19	7,35	1,53	3,00	2,00	2,86	770397,90	7356193,37	770492,03	7356396,95
20	8,30	1,55	3,00	2,00	2,86	770865,10	7356816,03	770979,08	7356538,96
21	6,00	1,48	3,00	2,00	2,86	772210,75	7357507,38	772466,79	7357392,94
22	6,05	1,42	3,00	2,00	2,86	769649,72	7356678,74	769689,43	7356818,69
23	7,35	1,32	3,00	2,00	2,86	766633,17	7358627,29	766983,22	7358969,31
24	5,25	1,35	3,00	2,00	2,86	765211,66	7356862,74	765189,33	7356987,22
25	4,65	1,28	3,00	2,00	2,86	765139,48	7356325,02	765409,86	7356403,77
26	4,65	1,39	3,00	2,00	2,86	765644,02	7355838,85	766049,54	7355969,90
27	6,00	1,33	3,00	2,00	2,86	764878,45	7353078,58	764833,01	7353330,94
28	2,95	1,28	3,00	2,00	2,86	767936,67	7351494,32	768511,27	7351198,20
29	3,40	1,28	3,00	2,00	2,86	774523,62	7349544,58	774667,44	7349799,84
30	3,85	1,27	3,00	2,00	2,86	775344,65	7349610,14	775512,14	7349844,62

A avaliação dos valores de FRB simulados pelo modelo restringiu-se ao intervalo de útil (400 a 950 nm) de medição da reflectância de folhas feita com o espectrorradiômetro SPECTRON SE-590. Como consequência, as análises foram feitas para as bandas do visível (1, 2 e 3) e infravermelho próximo (4) dos espectros simulados e convoluídos do sensor TM/Landsat5. Foi possível primeiramente verificar e analisar se a caracterização espectral simulada pelo modelo apresenta o mesmo comportamento tomando-se como base a caracterização espectral observada nos dados extraídos das imagens. Para isto, os espectros dos dados simulados foram adicionados aos gráficos que apresentavam os espectros médios extraídos das imagens (nas parcelas).

A caracterização espectral dos dados simulados foi verificada para as duas datas. Além disso, os resultados desta parte do trabalho serão apresentados a seguir de duas maneiras: primeiro, serão apresentados os gráficos comparativos entre os espectros

médios observados e os espectros resultantes das simulações considerando a orientação das linhas de plantio (Subitem 5.6.1) para as duas datas, em seguida será apresentado o mesmo conteúdo, porém com os espectros resultantes das simulações desconsiderando a orientação das linhas de plantio (5.6.2).

Assim como foi feita para a caracterização espectral, as análises estatísticas aplicadas com os dados serão apresentadas de duas formas: primeiramente consideram-se e comparam-se os dados simulados para as duas datas com a consideração da orientação das linhas de plantio (5.6.3) e em seguida desconsiderando-se a orientação das linhas de plantio (5.6.4). Além destas duas análises estatísticas, os resultados provenientes da regressão múltipla serão apresentados na sequência.

### **5.6.1 Considerando a orientação das linhas de plantio: caracterização espectral**

Com base na caracterização espectral dos dosséis de eucalipto descrita no item 5.4.1 deste capítulo focou-se em observar se os valores de FRB simulados pelo modelo apresentariam o mesmo comportamento observado com os dados de reflectância extraídos de ambas as imagens.

Os gráficos 5.12a, 5.12c, 5.12e mostram as comparações entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 e os espectros médios simulados pelo modelo para esta data, considerando a orientação das linhas de plantio para as espécies 1, 3 e 5 respectivamente. Analogamente os gráficos 5.12b, 5.12d, 5.12f mostram as comparações entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 24.04.2009 e os espectros médios simulados pelo modelo para esta data, considerando a orientação das linhas de plantio para as espécies 1, 3 e 5 respectivamente.

Diante da escala dos gráficos no eixo y (valores de FR), a observação entre os espectros simulados e os espectros observados na faixa espectral do visível estava prejudicada, optando-se então pela construção de outro gráfico no qual foi aplicado “zoom” para a visualização de detalhes desta região espectral. Os gráficos para visualização dos detalhes nesta região espectral estão destacados pelas letras **a-a'** nas Figuras 5.12a, 5.12b, 5.12c, 5.12d, 5.12e, 5.12f.

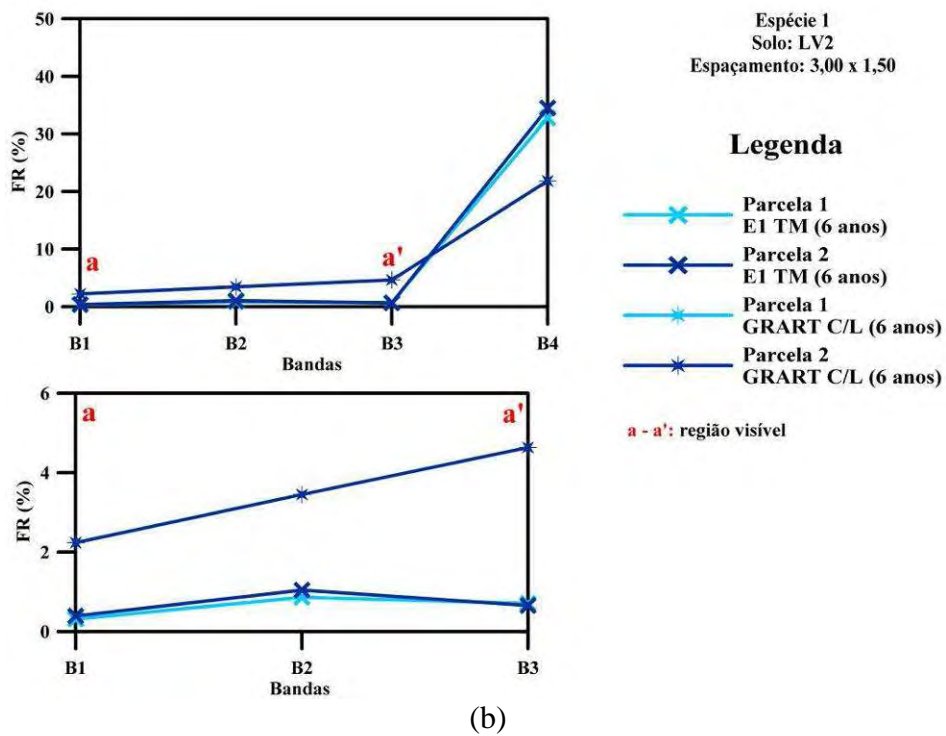
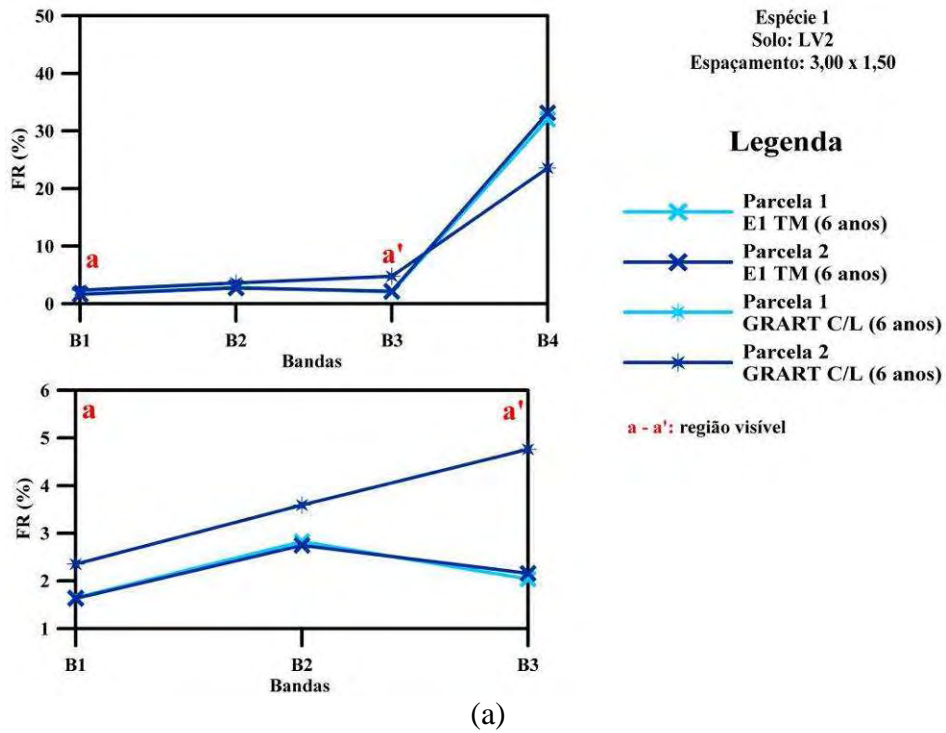
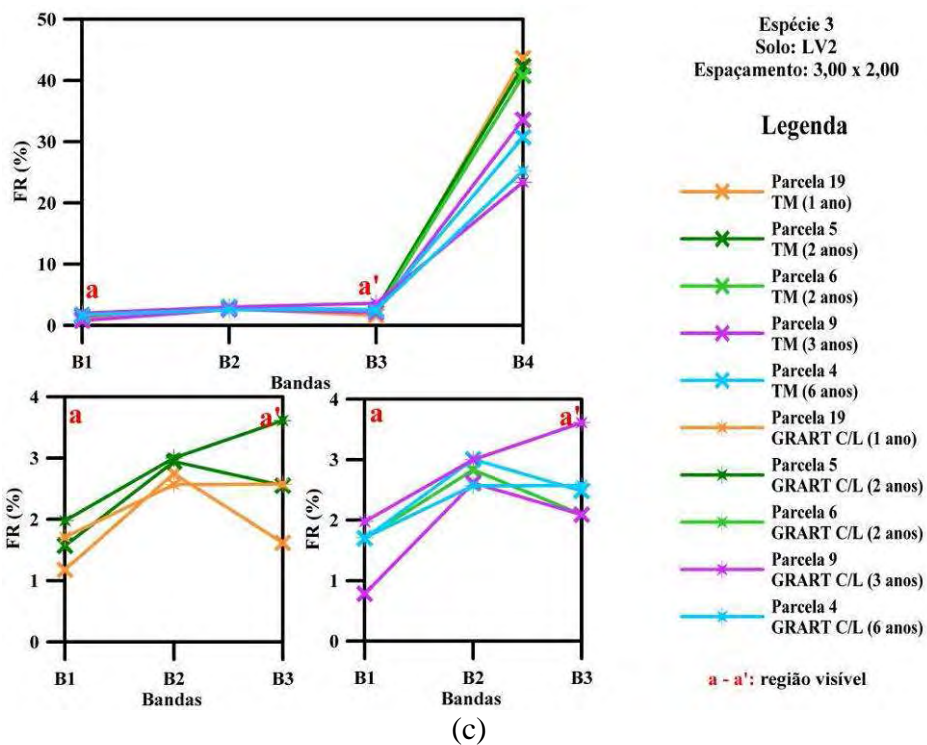
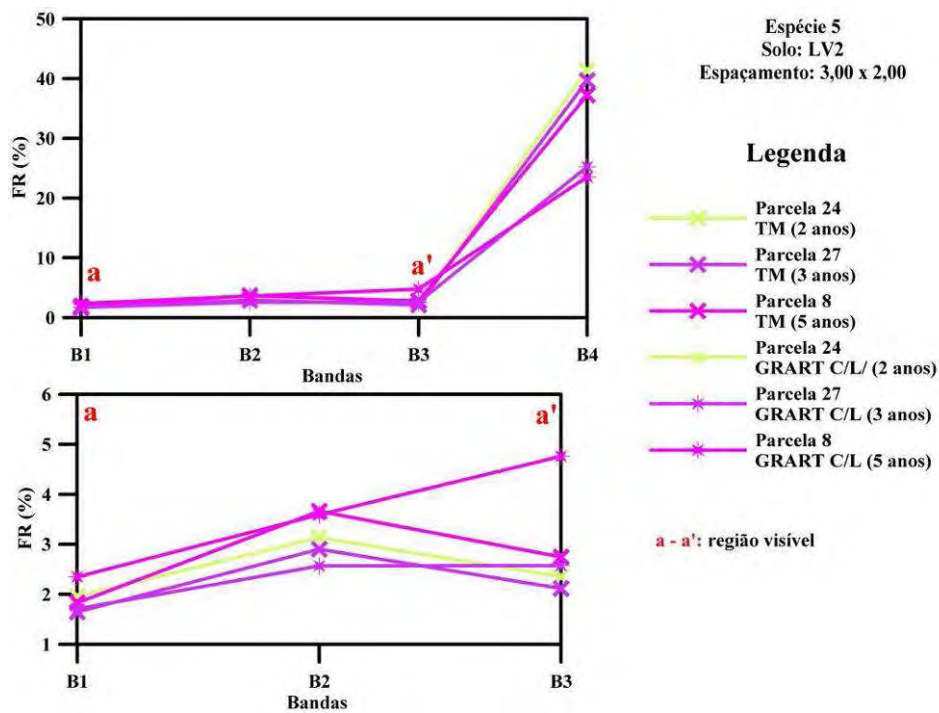
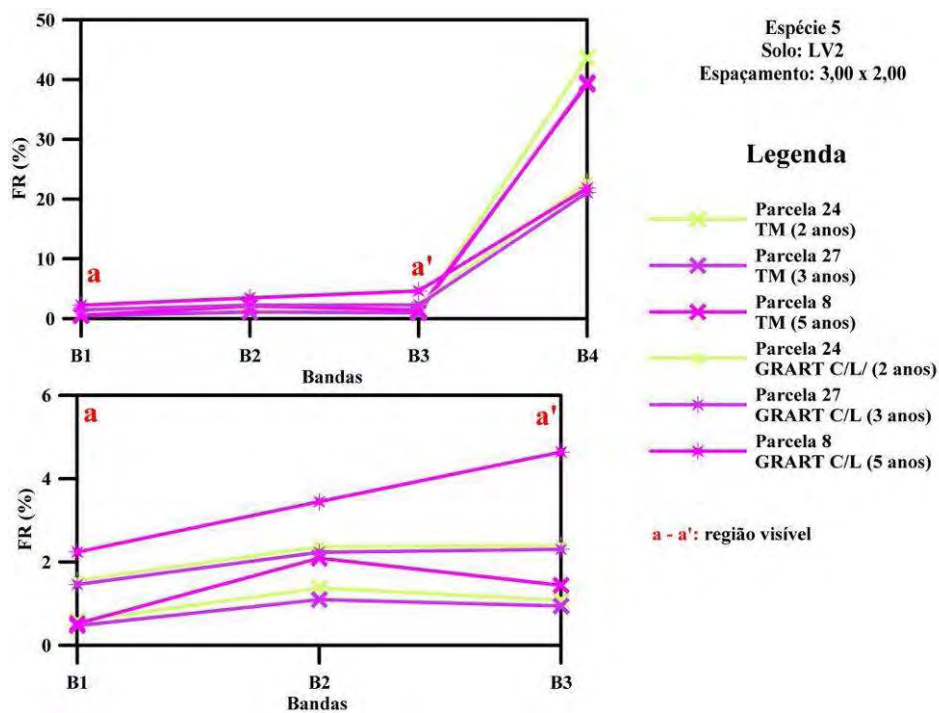


Figura 5.12 - Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 e os espectros médios simulados para espécie 1(a); espécie 3(c); espécie 5(e); Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 24.05.2009 e os espectros médios simulados para espécie 1(b); espécie 3(d); espécie 5(f). (Continua)





(e)



(f)

Figura 5.12 - Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 e os espectros médios simulados para espécie 1(a); espécie 3(c); espécie 5(e); Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 24.05.2009 e os espectros médios simulados para espécie 1(b); espécie 3(d); espécie 5(f). (Conclusão)

Através da análise dos gráficos acima se percebe que há discordâncias entre os espectros simulados e os espectros observados para as duas datas, tanto para a região do infravermelho quanto para a região do visível. Percebe-se também que o modelo superestima os valores de FRB nas simulações na região do visível e subestima as simulações na região do infravermelho próximo.

Com relação à região do visível, uma hipótese possível que explicaria a diferença observada seria a maior contribuição do substrato nos valores de FRB. É esperado que a fase de modelagem da Geometria Óptica pelo modelo *GRART*; quando a cena é fragmentada em diferentes frações radiométricas (solo e vegetação iluminados e sombreados) projetadas na direção do sensor, proporcione resultados bastante realistas assumindo que a distribuição vertical e horizontal dos elementos do dossel tenha sido corretamente informada. Assumindo que a penetração da radiação no dossel foi modelada corretamente, ajustes no modelo precisariam ser feitos para que o espalhamento da radiação a partir do substrato represente melhor a realidade da transferência da radiação em dosséis de eucalipto.

Com relação à região do infravermelho próximo pode-se inferir que a oportunidade de haver ordens elevadas de espalhamento em dosséis de eucalipto é maior que a considerada por modelos híbridos (GO e Transferência de Radiação) como o modelo *GRART*. Possibilidades de ordens elevadas de espalhamento também podem explicar as diferenças de absorção no visível, já que ordens elevadas de espalhamento diminuem as chances da radiação no visível ser refletida pelo dossel, sendo o inverso verdadeiro para o caso do infravermelho próximo. Nota-se também que os valores de FRB simulados pelo modelo não apresentam a mesma dinâmica espectral dos valores de FR observados e extraídos das imagens e discutidos no subitem 5.4.1 deste trabalho.

As maiores discrepâncias podem estar relacionadas possivelmente à complexidade da modelagem, mas também podem ter ocorrido por conta da incerteza na parametrização do modelo. A dificuldade de se medir os parâmetros requeridos resultou na necessidade de se adotar (i) valor de IAF arbitrário para todos os talhões, (ii) supor dispersão uniforme da folhagem no interior das copa (iii) supor distribuição angular de folhas



uniforme e (iv) adotar direções de linha de plantio por critérios outros que não a medição direta no campo. Possivelmente se os valores destes dados, que são essenciais e que descrevem a estrutura do dossel, fossem realisticamente conhecidos, maior concordância poderia ter sido observada entre os valores modelados e observados na imagem.

Desta maneira, pode-se inferir que as discordâncias observadas na região do infravermelho próximo podem estar relacionadas possivelmente à complexidade de modelagem do espalhamento múltiplo dentro dos dosséis de eucalipto e podem também estar relacionadas às incertezas dos dados de entrada, como: o índice de área foliar que foi assumido um valor médio para todos os talhões independentes das idades; incertezas também relacionadas à densidade de folhagem, e ainda a distribuição angular de folhas assumido uniformemente, como dito acima. Recorrendo-se a literatura, constatou-se que na Banda 4 os valores de reflectância de dosséis de eucalipto estão entre 0,3 a 0,70 (CANAVESI, 2008; PONZONI et al., 2002), o que é significativamente superior aos valores de FRB simulados pelo modelo na Banda 4. Ponzoni et al. (2002) compararam o FRB de um dossel de mudas de eucalipto e o FRDH de suas folhas isoladas. Os autores constataram que o FRB na região do infravermelho próximo foi superior aos valores de FRDH de suas folhas isoladas. Tal resultado confirma a mesma afirmação dada por Goel (1998) e Kumar (1972), de que na região do infravermelho, o espalhamento múltiplo da radiação dentro de um dossel entre suas inúmeras folhas aumenta significativamente sua reflectância nessa região espectral.

Leblanc et al. (1999), aplicou o modelo *Four-Scale* para quatro tipos de dosséis: “old black spruce”, pinheiro velho e jovem e “old aspen”. Os valores de reflectância obtidos pela simulação do modelo para os quatro tipos de dosséis foram comparados com dados radiométricos obtidos destes dosséis pelo “*Airborne Polarization and Directional Earth Radiation - (POLDER)*”. Discrepâncias na região espectral do vermelho foram encontradas quando as comparações entre os dados simulados com os dados observados foram feitas para dosséis com pinheiros jovens. Segundo os autores, possivelmente esta discrepância pode estar relacionada com a consideração de alguns pixels que apresentam influências da resposta de outros alvos, dado que este tipo de dossel

analisado era menos homogêneo. Entretanto, a simulação na região do vermelho foi melhor que na região do infravermelho. Para melhorar o desempenho do modelo na estimativa da reflectância na região do infravermelho os autores alegam que se faz necessária a melhora na modelagem do espalhamento múltiplo. Os autores conseguiram melhor desempenho nas simulações do modelo para o dossel de coníferas. Este resultado, de acordo com eles, foi em parte devido à melhor determinação dos parâmetros descritivos da arquitetura destes dosséis que foram utilizados como dados de entrada no modelo.

As maiores discrepâncias nas bandas do visível, principalmente na banda do vermelho, podem estar relacionadas com as incertezas da propriedade óptica da folhas, do substrato (serrapilheira) cujas variabilidades foram completamente ignoradas nas simulações com o modelo *GRART*. Como mencionado e mostrado no subitem 5.2, o substrato nos talhões de eucalipto apresentam variação em composição e a quantidade de acordo com a idade do plantio, com a localização topográfica do talhão, com os fatores ambientais, entre outros. Assim, uma variação temporal na composição do substrato é esperada. Por isso, possivelmente o espectro médio da serrapilheira utilizado como parâmetro de entrada no modelo não apresente a realidade espacial do substrato de todas as parcelas. A mesma discussão feita para a utilização do espectro médio da serrapilheira como parâmetro de entrada no modelo faz-se para a utilização do espectro médio das folhas. Sabe-se que deficiências nutricionais, morfológicas, ataques de pragas e doenças podem produzir variações na propriedade óptica da folha (CAMPOS, 2008). Ponzoni et al. (2002) notaram diferenças bastante pronunciadas na região do visível entre folhas maduras, folhas intermediárias e folhas novas. Tal resultado encontrado por estes autores reforçam a discussão de que possivelmente a utilização do espectro médio das folhas utilizado como parâmetro de entrada no modelo na simulação dos FRB das 30 parcelas não apresente a realidade espacial e espectral das folhas que compunham o universo daquele talhão. Campos (2008) relatou que o modelo *GRART* apresenta sensibilidade na estimativa do FRB ao variar alguns parâmetros que serviram de entrada no modelo. Considerando quatro casos estruturais diferentes de dosséis de café, o autor identificou que entre estes parâmetros, os relativos às propriedades ópticas do substrato

e das folhas são os mais influentes. Entre os parâmetros analisados pelo autor, destacam-se:  $H_c$ ,  $R_c$ ,  $dx$ ,  $dy$ , densidade do dossel, propriedades ópticas do substrato e da folha, *I-SKYL*.

Como a reflexão bidirecional modelada pelo modelo *GRART* é composta de quatro contribuições da radiância provenientes das frações radiométricas projetadas na direção de observação, quais sejam: assinaturas espectrais do brilho da copa iluminada, do solo iluminado, da copa sombreada e solo sombreado, o conhecimento espacial das mesmas seria imprescindível. Segundo Ni et al. (1999), uma discussão sobre o uso de modelos GO está justamente na estimativa destas assinaturas espectrais. Segundo o autor, a medição destas assinaturas espectrais em campo torna-se de difícil realização, pois para aquisição das mesmas seria necessária que tais medições fossem realizadas acima do dossel. Assim, o desempenho dos modelos geométricos - ópticos nas simulações da reflectância de dosséis se enfraquece quando as informações realísticas destas medidas não são disponibilizadas.

Os gráficos para os demais agrupamentos os quais consideram que as árvores estivessem plantadas com o mesmo espaçamento e se desenvolvendo no mesmo tipo de solo para as duas datas, para as diferentes simulações (considerando e desconsiderando a orientação da linha de plantio) encontram-se apresentados no Apêndice F deste documento. Além destes gráficos, encontram-se no Apêndice G os gráficos com os espectros observados e os espectros simulados de cada parcela.

### **5.6.2 Desconsiderando a orientação das linhas de plantio: caracterização espectral**

Os gráficos das Figuras 5.13a, 5.13c, 5.13e mostram as comparações entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 e os espectros médios simulados pelo modelo para esta data, desconsiderando a orientação das linhas de plantio para as espécies 1, 3 e 5 respectivamente. Analogamente, os gráficos das Figuras 5.13b, 5.13d, 5.13f mostram as comparações entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 24.04.2009 os espectros médios simulados pelo modelo para esta data, desconsiderando a orientação das linhas de plantio para as espécies 1, 3 e 5 respectivamente.

A tentativa de se considerar uma distribuição uniforme (sem orientação da linha de plantio) das copas, na mesma densidade e dimensões de copas medidas na parcela, foi a de atenuar o efeito que ocorreria nas situações em que o modelo foi parametrizado equivocadamente para a direção da linha de plantio. Assim, ao desconsiderar a orientação das linhas de plantio percebe-se que as discordâncias entre os espectros simulados e os espectros observados para as duas datas em todas as faixas espectrais diminuem, mas não deixam de existir. Houve redução na diferença entre os valores de FR em praticamente todas as faixas espectrais. Entretanto, as mesmas discussões mencionadas no subitem 5.6.1 relacionadas às possíveis incertezas dos parâmetros que serviram de entrada no modelo são válidas aqui.

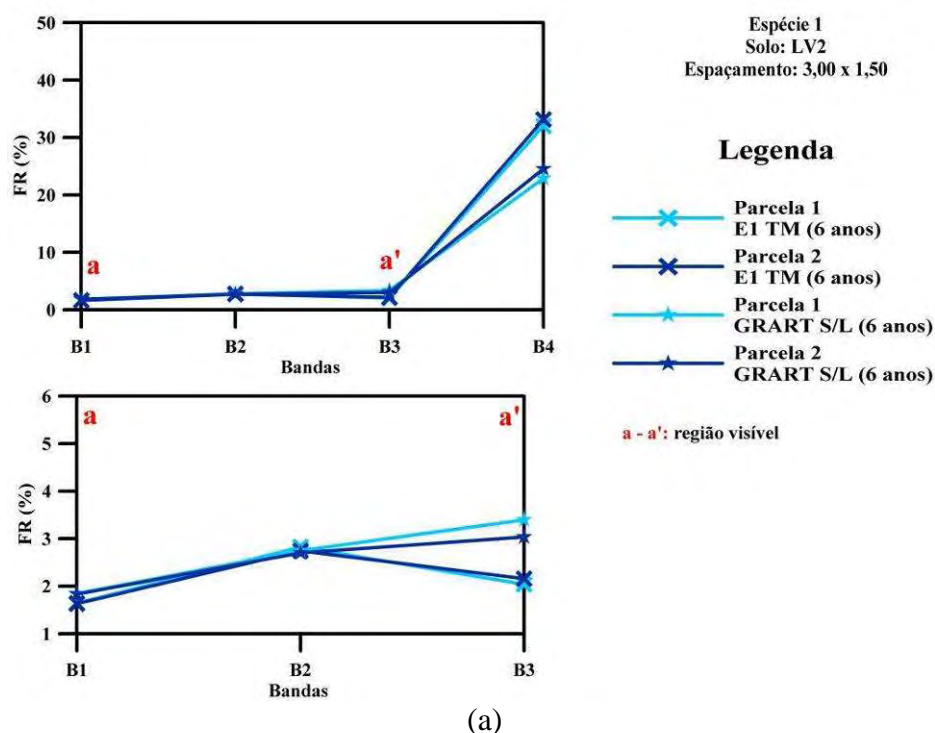


Figura 5.13 - Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 e os espectros médios simulados para espécie 1(a); espécie 3(c); espécie 5(e); Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 24.05.2009 e os espectros médios simulados para espécie 1(b); espécie 3(d); espécie 5(f). (Continua)

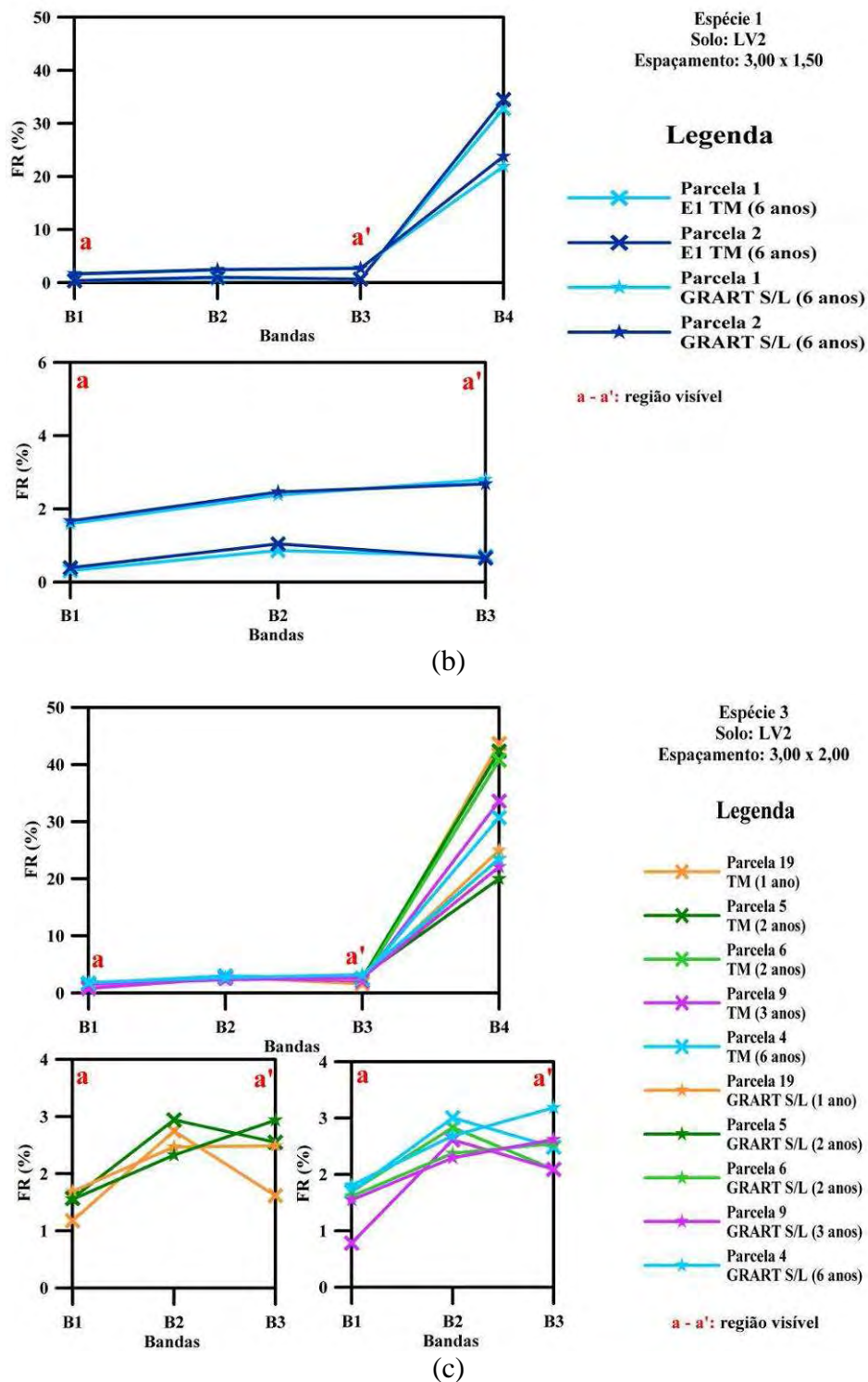


Figura 5.13 - Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 e os espectros médios simulados para espécie 1(a); espécie 3(c); espécie 5(e); Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 24.05.2009 e os espectros médios simulados para espécie 1(b); espécie 3(d); espécie 5(f). (Continua)

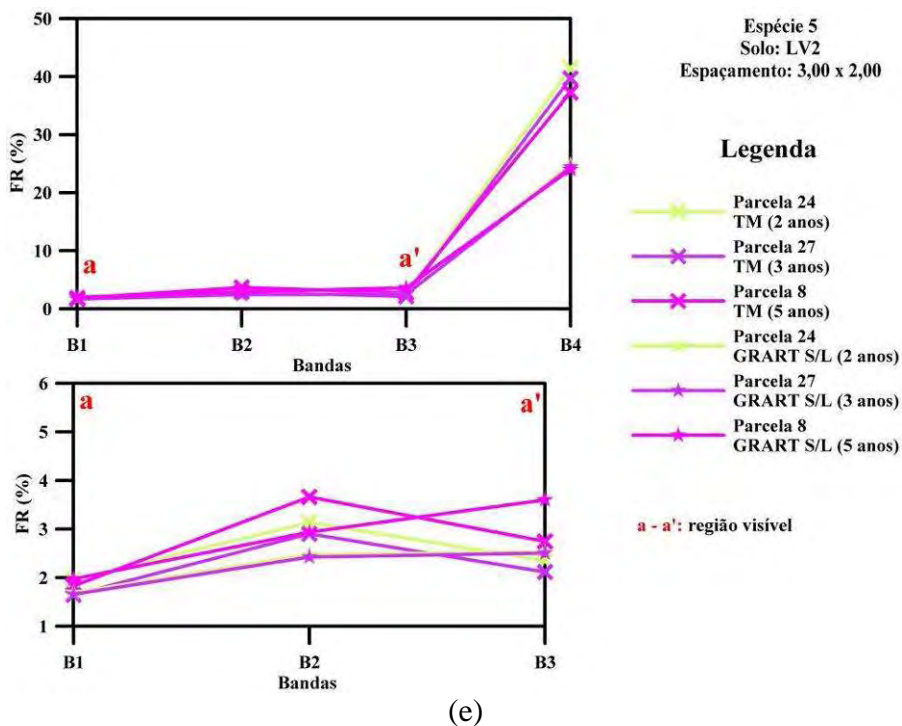
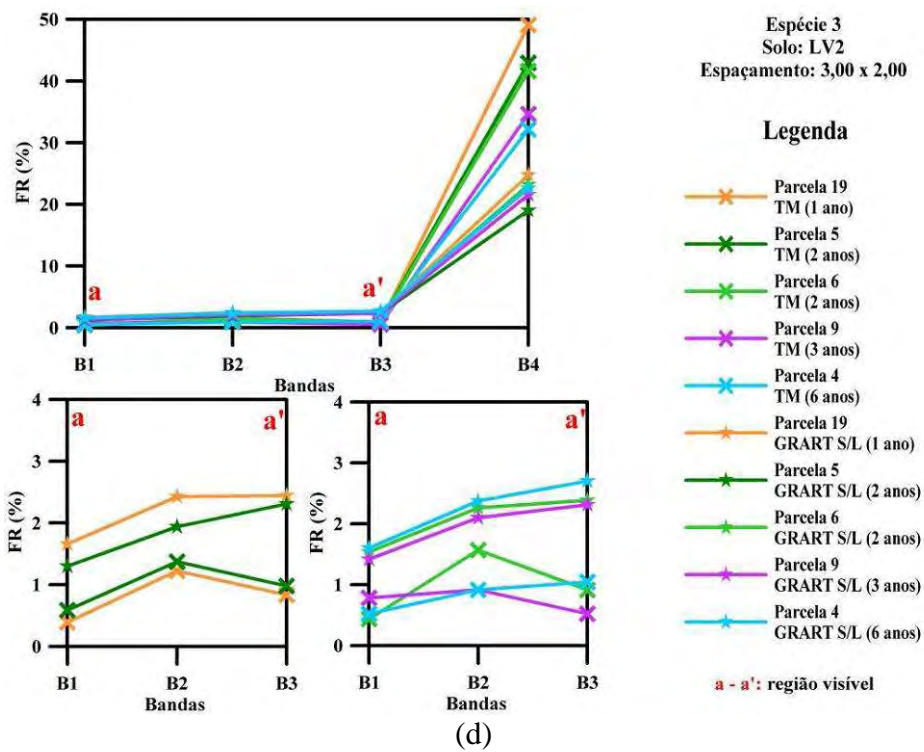
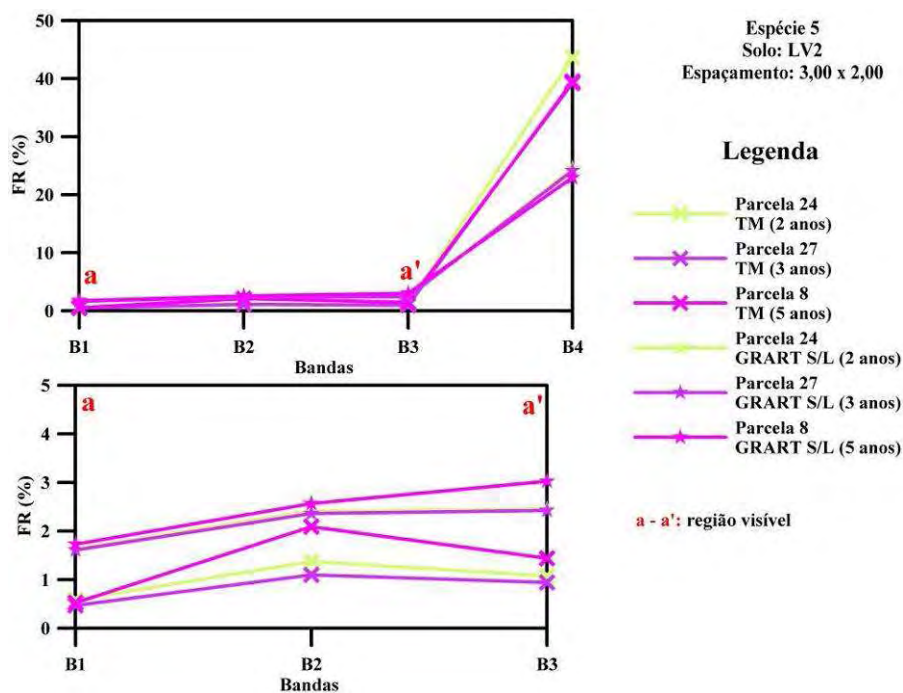


Figura 5.13 - Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 e os espectros médios simulados para espécie 1(a); espécie 3(c); espécie 5(e); Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 24.05.2009 e os espectros médios simulados para espécie 1(b); espécie 3(d); espécie 5(f). (Continua)



(f)

Figura 5.13 - Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 e os espectros médios simulados para espécie 1(a); espécie 3(c); espécie 5(e); Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 24.05.2009 e os espectros médios simulados para espécie 1(b); espécie 3(d); espécie 5(f). (Conclusão)

Quando valores de FRB são simulados por modelos de transferência radiativa de dosséis, estes valores carregam consigo incertezas provenientes de diversas fontes de incertezas (das medições dos parâmetros de “input”, das hipóteses formuladas e que são tratadas pelo modelo para simular a interação da radiação eletromagnética com a vegetação, as aproximações adotadas para o cálculo da transferência radiativa, entre outros). DARVISHZADEH et al. (2008) inverteram os modelos *PROSAIL* e *PROSPECT* para estimativa de parâmetros de gramíneas, como índice de área foliar, conteúdo de clorofila da folha e do dossel. As estimativas destes parâmetros apresentaram graus de sucesso diferenciados dependendo das combinações dos espectros utilizados para inversão. Os autores acreditam que o insucesso de algumas estimativas esteja relacionado com o mau desempenho destes modelos no método direto.

### 5.6.3 Considerando a orientação das linhas de plantio: análises estatísticas

Os resultados da comparação quantitativa por meio da dispersão dos valores simulados pelo modelo considerando a orientação das linhas de plantio e os dados extraídos das imagens são representados pelos gráficos de 5.14 (a, b, c, d) para a data de 22.04.2009 e 5.14 (e, f, g, h) para a data de 24.05.2009 separados nas Bandas 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

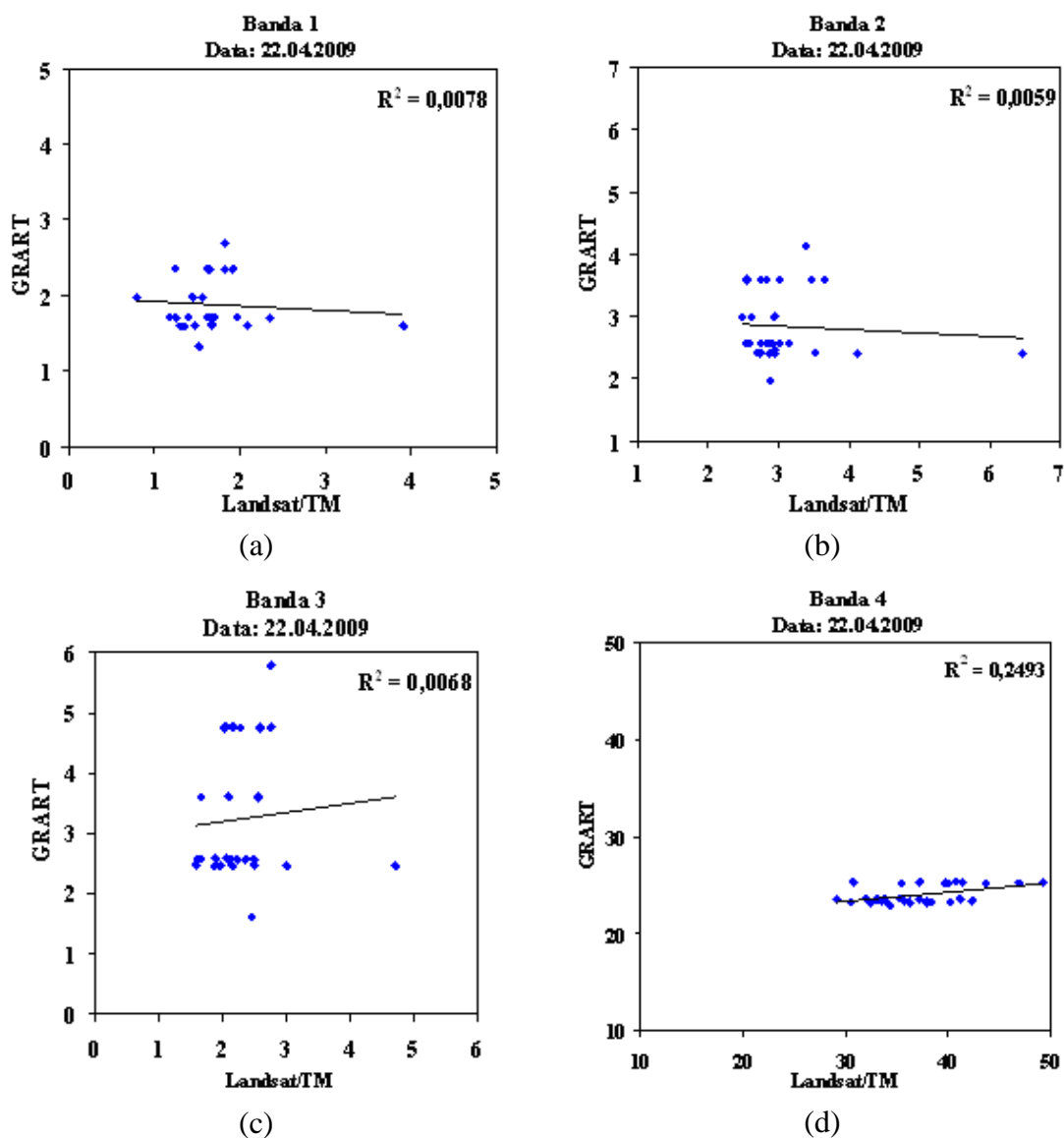


Figura 5.14 - Gráficos de dispersão dos dados simulados pelo modelo *GRART* e os dados observados nas imagens TM para a data 22.04.2009 (a, b, c, d) e para data 24.05.2009 (e, f, g, h) para as quatro faixas espectrais (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo – Banda 1, 2, 3 e 4) respectivamente.(Continua)



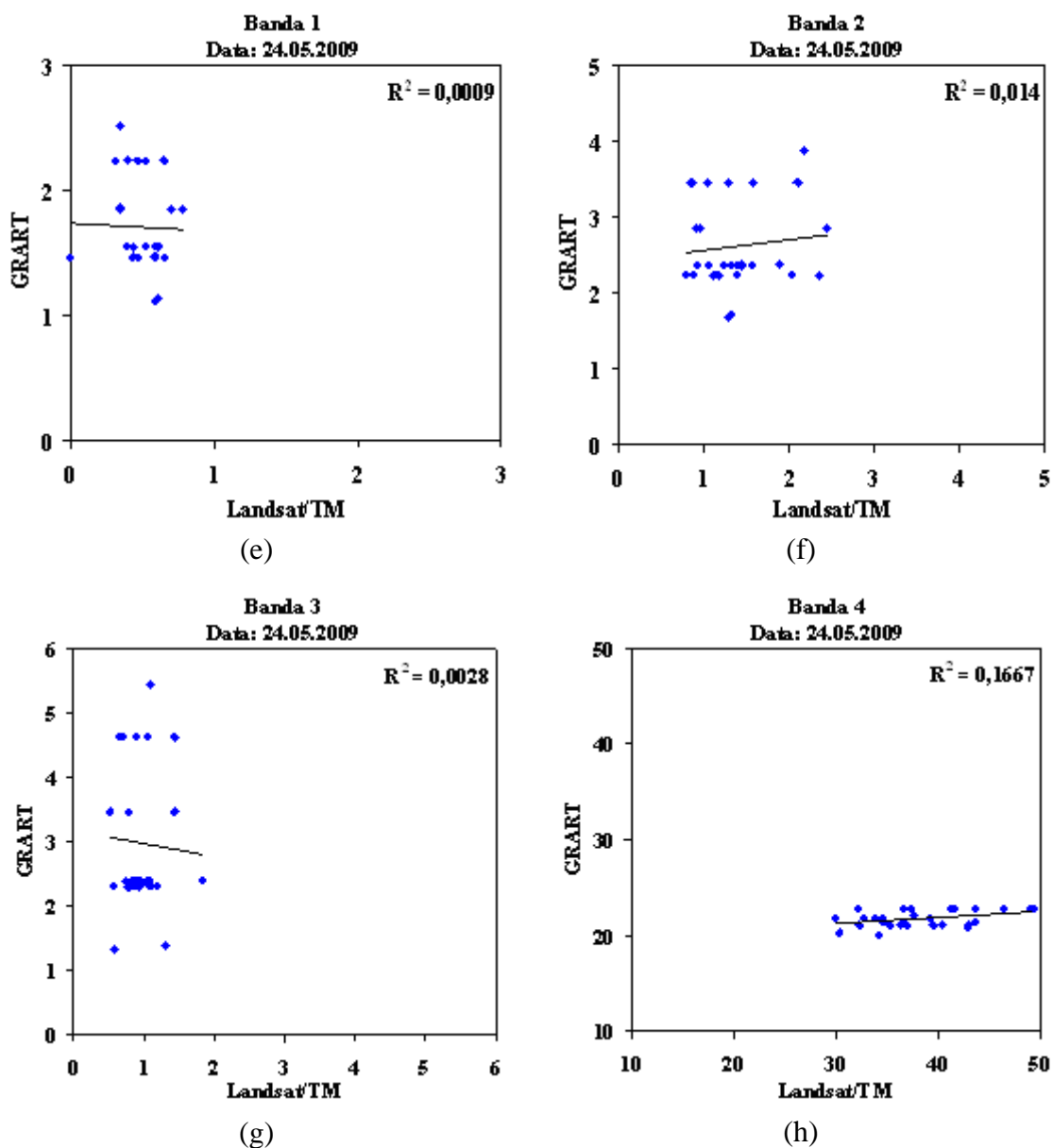


Figura 5.14 - Gráficos de dispersão dos dados simulados pelo modelo *GRART* e os dados observados nas imagens TM para a data 22.04.2009 (a, b, c, d) e para data 24.05.2009 (e, f, g, h) para as quatro faixas espectrais (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo – Banda 1, 2, 3 e 4) respectivamente. (Conclusão)

Pode-se observar pelos gráficos que as menores correlações entre os dados simulados pelo modelo *GRART* e os dados extraídos das imagens estão na região do visível. Este resultado realça as observações realizadas anteriormente, de que as diferenças nesta faixa espectral possivelmente estão relacionadas com as incertezas da propriedade óptica da folhas, do substrato. Em contrapartida observa-se que as maiores correlações entre os dados simulados pelo modelo *GRART* e os dados extraídos das imagens para as

duas datas são encontradas na região do infravermelho próximo. Este resultado mostra que apesar dos dados simulados nesta região espectral estarem bem abaixo dos dados observados nas imagens, estes apresentaram melhor tendência do comportamento espectral dos dosséis de eucalipto do que os dados simulados na região do visível. Schlerf e Atzberg (2006) encontraram resultados semelhantes, os valores de FR simulados pelo modelo *INFORM* apresentaram melhor relação com os valores de FR observados provenientes do sensor *Hymap* na faixa do infravermelho próximo e piores relações na região do visível.

Apesar disso, através da análise dos gráficos percebe-se que as discrepâncias que foram observadas na caracterização espectral nas 4 faixas espectrais entre os dados simulados pelo modelo GRART e os dados extraídos das imagens foram comprovadas pelas análises estatísticas. Percebe-se que não houve correlação entre os dados simulados pelo modelo GRART e aqueles extraídos das imagens.

Para análise da identificação de quais parâmetros estruturais utilizados como dados de entrada no modelo estariam mais correlacionados a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo em todas as faixas espectrais foram estabelecidas regressões múltiplas utilizando o método *stepwise* para as duas datas. Para a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo na Banda 2, nenhuma equação foi ajustada, para a data 22.04.2009. Ou seja, os parâmetros estruturais selecionados como variáveis independentes não apresentam relação significativa com as diferenças observadas entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo nesta faixa espectral.

Para a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo na Banda 1, a equação 5.1 foi ajustada, com as variáveis selecionadas pelo método *stepwise*.

$$B1_{observado} - B1_{simulado} = -2,377 + 1,776 \times Rc \quad (5.1)$$

Onde:  $Rc$  é o raio da copa. O  $R^2$  ajustado para essa equação foi de 0,121. Os dados do  $Hc$  e  $Dy$  não foram selecionados para o ajuste do modelo. Neste caso, as diferenças observadas entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo nesta faixa espectral estão sendo explicadas pelo parâmetro  $Rc$ .

Para a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo na Banda 3, a equação 5.2 foi ajustada, com as variáveis selecionadas pelo método *stepwise*.

$$B3_{observado} - B3_{simulado} = -9,097 + 4,298 \times Rc + 1,4 \times Dy \quad (5.2)$$

Onde:  $Rc$  é o raio da copa e  $Dy$  é o espaçamento em  $y$ . O  $R^2$  ajustado para essa equação foi de 0,364. Os dados de  $Hc$  não foram selecionados para o ajuste do modelo. Neste caso, as diferenças observadas entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo nesta faixa espectral estão sendo explicadas pelos dois parâmetros  $Rc$  e  $Dy$ .

Para a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo na Banda 4, a equação 5.3 foi ajustada, com as variáveis selecionadas pelo método *stepwise*.

$$B4_{observado} - B4_{simulado} = -8,635 + 17,563 \times Rc \quad (5.3)$$

Onde:  $Rc$  é o raio da copa. O  $R^2$  ajustado para essa equação foi de 0,29. Os dados do  $Hc$  e  $Dy$  não foram selecionados para o ajuste do modelo. Neste caso, as diferenças observadas entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo nesta faixa espectral estão sendo explicadas pelo parâmetro  $Rc$ .

Ao contrário dos resultados obtidos para os dados da data 22.04.2009, a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo para a data 24.05.2009, equações foram ajustadas para todas as faixas espectrais.

Para a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo na Banda 1, a equação 5.4 foi ajustada, com as variáveis selecionadas pelo método *stepwise*.

$$B1_{observado} - B1_{simulado} = -2,952 + 0,112 \times Hc + 0,577 \times Dy \quad (5.4)$$

Onde:  $Hc$  é a altura da copa e  $Dy$  é o espaçamento em  $y$ . O  $R^2$  ajustado para essa equação foi de 0,51. Os dados do  $Rc$  não foram selecionados para o ajuste do modelo. Neste caso, as diferenças observadas entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo nesta faixa espectral estão sendo explicadas pelos parâmetros  $Hc$  e  $Dy$ .

Para a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo na Banda 2, a equação 5.5 foi ajustada, com as variáveis selecionadas pelo método *stepwise*.

$$B2_{observado} - B2_{simulado} = -5,662 + 1,109 \times Dy + 1,75 \times Rc \quad (5.5)$$

Onde:  $Dy$  é o espaçamento em  $y$  e  $Rc$  é o raio da copa. O  $R^2$  ajustado para essa equação foi de 0,335. Os dados de  $Hc$  não foram selecionados para o ajuste do modelo. Neste caso, as diferenças observadas entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo nesta faixa espectral estão sendo explicadas pelos parâmetros  $Rc$  e  $Dy$ .

Para a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo na Banda 3, a equação 5.6 foi ajustada, com as variáveis selecionadas pelo método *stepwise*.

$$B3_{observado} - B3_{simulado} = -11,628 + 4,627 \times Rc + 1,9,9 \times Dy \quad (5.6)$$

Onde:  $Rc$  é o raio da copa e  $Dy$  é o espaçamento em  $y$ . O  $R^2$  ajustado para essa equação foi de 0,575. Os dados de  $Hc$  não foram selecionados para o ajuste do modelo. Neste caso, as diferenças observadas entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo nesta faixa espectral estão sendo explicadas pelos parâmetros  $Rc$  e  $Dy$ .

Para a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo na Banda 4, a equação 5.7 foi ajustada, com as variáveis selecionadas pelo método *stepwise*.

$$B4_{observado} - B4_{simulado} = -7,324 + 19,160 \times Rc \quad (5.7)$$

Onde:  $Rc$  é o raio da copa. O  $R^2$  ajustado para essa equação foi de 0,287. Os dados de  $Hc$  e  $Dy$  não foram selecionados para o ajuste do modelo. Neste caso, as diferenças observadas entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo nesta faixa espectral estão sendo explicadas pelo parâmetro  $Rc$ .

#### 5.6.4 Desconsiderando a orientação das linhas de plantio: análises estatísticas

Os resultados da comparação quantitativa por meio da dispersão dos valores de FRB simulados pelo modelo desconsiderando a orientação das linhas de plantio e os dados extraídos das imagens são representados pelos gráficos de 5.15 (a, b, c, d) para a data de 22.04.2009 e 5.15 (e, f, g, h) para a data de 24.05.2009 separados nas Bandas 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

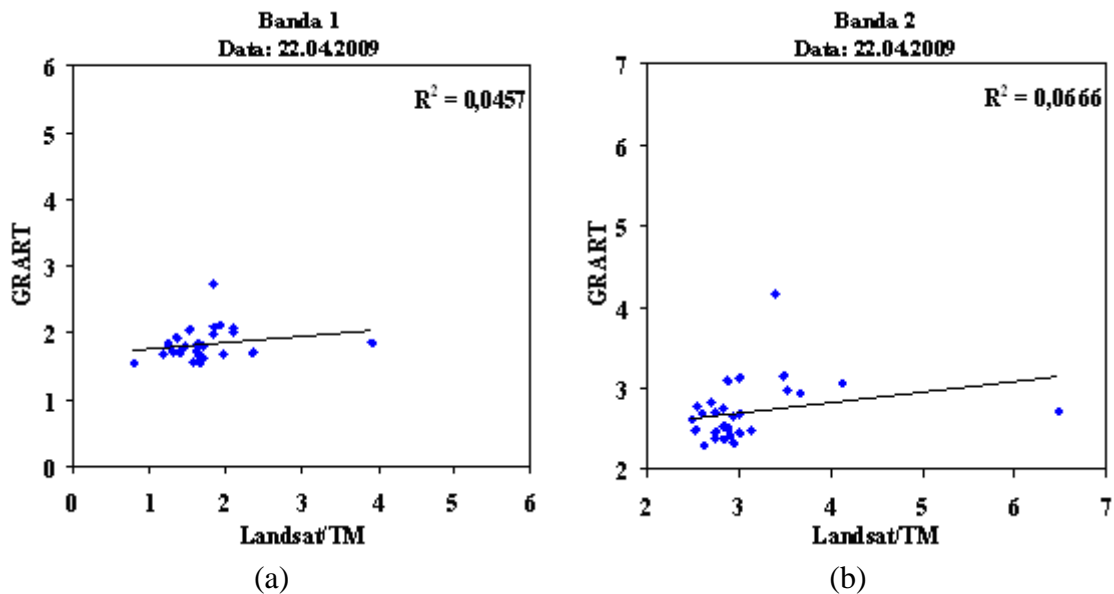


Figura 5.15 - Gráfico de dispersão dos dados simulados pelo modelo *GRART* e os dados observados nas imagens TM para a data 22.04.2009 (a, b, c, d) e para data 24.05.2009 (e, f, g, h) para as quatro faixas espectrais (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo – Banda 1, 2, 3 e 4) respectivamente. (Continua)

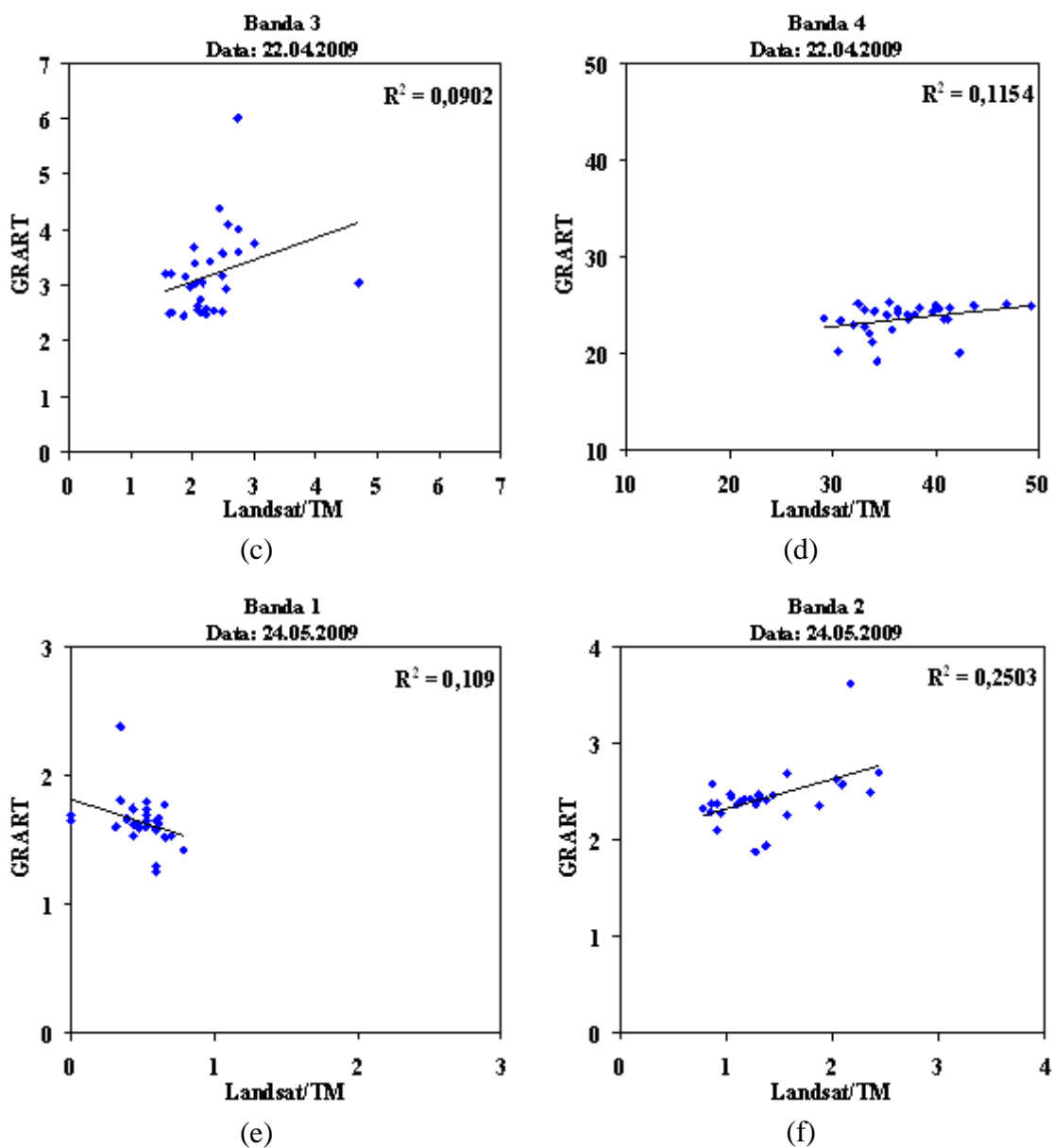


Figura 5.15 - Gráfico de dispersão dos dados simulados pelo modelo *GRART* e os dados observados nas imagens TM para a data 22.04.2009 (a, b, c, d) e para data 24.05.2009 (e, f, g, h) para as quatro faixas espectrais (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo – Banda 1, 2, 3 e 4) respectivamente. (Continua)

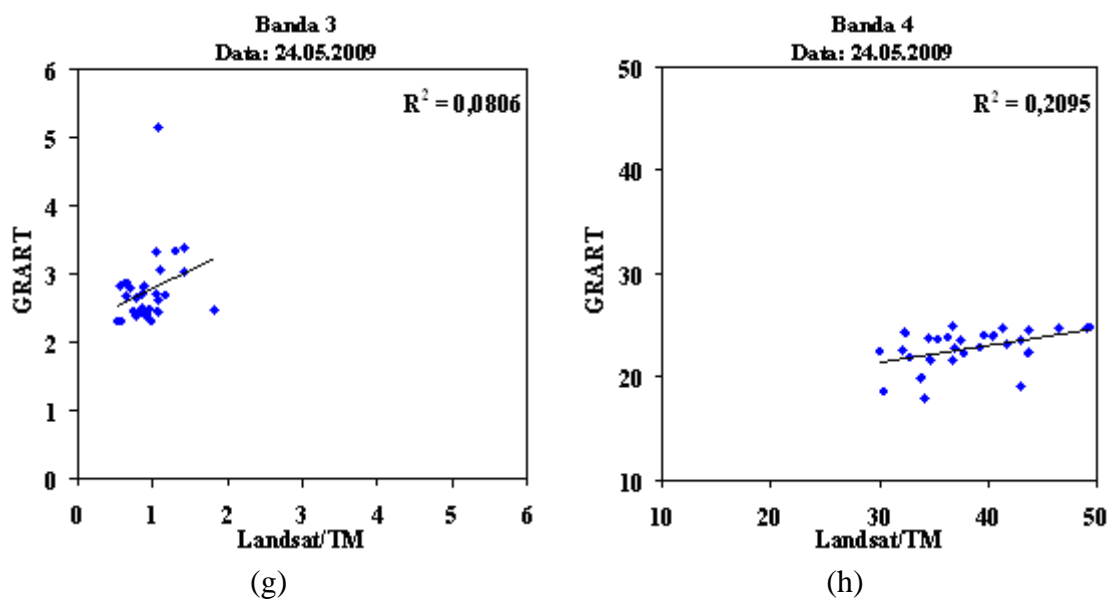


Figura 5.15 - Gráfico de dispersão dos dados simulados pelo modelo *GRART* e os dados observados nas imagens TM para a data 22.04.2009 (a, b, c, d) e para data 24.05.2009 (e, f, g, h) para as quatro faixas espectrais (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo – Banda 1, 2, 3 e 4) respectivamente. (Conclusão)

Pode-se observar pelos gráficos que as menores correlações entre os dados simulados pelo modelo *GRART* e os dados observados na imagem do dia 22.04.2009 ocorreram na região do visível como observado com os dados simulados considerando as orientações das linhas de plantio. Porém os coeficientes de determinação das simulações desconsiderando as orientações das linhas de plantio para a data de 22.04.2009 foram melhores do que os coeficientes de determinação das simulações aonde as linhas de plantio foram consideradas para as duas datas. Este resultado realça as observações realizadas no subitem 5.5.2 de que ao desconsiderar a orientação das linhas de plantio nas simulações dos dados percebe-se que as discrepâncias entre os espectros simulados e os espectros observados para as duas datas em todas as faixas espectrais diminuem.

Ao contrário do que foi encontrado para as simulações do modelo considerando a orientação das linhas de plantio, nas simulações do modelo desconsiderando a orientação das linhas de plantio nenhuma equação foi ajustada para a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo nas Bandas 1 e 2 para a data 22.04.2009.

Para a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo na Banda 3, a equação 5.8 foi ajustada, com as variáveis selecionadas pelo método *stepwise*.

$$B3_{observado} - B3_{simulado} = -4,532 + 2,947 \times Rc \quad (5.8)$$

Onde:  $Rc$  é o raio da copa. O  $R^2$  ajustado para essa equação foi de 0,245. Além dos dados de  $Hc$  não serem selecionados para o ajuste do modelo os dados  $Dy$  também não foram. Neste caso, as diferenças observadas entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo nesta faixa espectral estão sendo explicadas somente pelo parâmetro  $Rc$ .

Para a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo na Banda 4, a equação 5.9 foi ajustada, com as variáveis selecionadas pelo método *stepwise*.

$$B4_{observado} - B4_{simulado} = 5,782 + 1,58 \times Hc \quad (5.9)$$

Onde:  $Hc$  é a altura da copa. O  $R^2$  ajustado para essa equação foi de 0,338. Os dados do  $Rc$  e  $Dy$  não foram selecionados para o ajuste do modelo. Neste caso, as diferenças observadas entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo nesta faixa espectral estão sendo explicadas pelo parâmetro  $Hc$ .

Para a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo na Banda 2 para a data 24.05.2009, nenhuma equação foi ajustada. Ou seja, os parâmetros estruturais selecionados como variáveis independentes não apresentam relação significativa com as diferenças observadas entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo nesta faixa espectral.

Para a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo na Banda 1, a equação 5.10 foi ajustada, com as variáveis selecionadas pelo método *stepwise*.

$$B1_{observado} - B1_{simulado} = -0,861 + 0,147 \times Hc - 0,831 \times Rc \quad (5.10)$$



Onde:  $Hc$  é a altura da copa e  $Rc$  é o raio da copa. O  $R^2$  ajustado para essa equação foi de 0,477. Os dados do  $Dy$  não foram selecionados para o ajuste do modelo. Neste caso, as diferenças observadas entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo nesta faixa espectral estão sendo explicadas pelos parâmetros  $Hc$  e  $Rc$ .

Para a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo na Banda 3, a equação 5.11 foi ajustada, com as variáveis selecionadas pelo método *stepwise*.

$$B3_{observado} - B3_{simulado} = -4,557 + 2,229 \times Rc \quad (5.11)$$

Onde:  $Rc$  é o raio da copa. O  $R^2$  ajustado para essa equação foi de 0,323. Os dados de  $Hc$  e  $Dy$  não foram selecionados para o ajuste do modelo. Neste caso, as diferenças observadas entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo nesta faixa espectral estão sendo explicadas pelos parâmetros  $Rc$ .

Para a diferença entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo na Banda 4, a equação 5.12 foi ajustada, com as variáveis selecionadas pelo método *stepwise*.

$$B4_{observado} - B4_{simulado} = 9,449 + 1,198 \times Hc \quad (5.12)$$

Onde:  $Hc$  é a altura da copa. O  $R^2$  ajustado para essa equação foi de 0,160. Os dados de  $Rc$  e  $Dy$  não foram selecionados para o ajuste do modelo. Neste caso, as diferenças observadas entre os valores de FR extraídos das imagens e os valores simulados pelo modelo nesta faixa espectral estão sendo explicadas pelo parâmetro  $Hc$ .



## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados alcançados destacam-se as seguintes conclusões para aplicação dos modelos empíricos (1) e para aplicação do modelo *GRART* (2):

### 1) Modelos empíricos:

- ✓ Com base nos modelos empíricos, as correlações mais significativas entre os dados radiométricos e os biofísicos aqui considerados foram verificadas para a região do infravermelho próximo (Banda 4 do sensor TM/Landsat5).
- ✓ A distribuição espacial dos dados dendrométricos e de densidade do dossel (*D*), comparados com a distribuição das idades dos plantios foi coerente com o esperado, indicando que mesmo empiricamente, é possível estimar consistentemente dados dendrométricos e *D*, mediante dados radiométricos orbitais.
- ✓ Apesar da consistência, a escolha da data da imagem da qual serão extraídos os dados radiométricos para definição dos modelos constitui aspecto relevante no desempenho dos modelos, uma vez que foi identificada diferença significativa de desempenho entre os mesmos, quando definidos a partir dos dados oriundos das duas datas distintas consideradas neste trabalho.

### 2) Modelo físico – *GRART*:

- ✓ No geral, o modelo *GRART* não apresentou bom desempenho na simulação dos valores de FRB de um dossel de eucalipto;
- ✓ As maiores relações entre os valores de FRB simulados e os valores de FR observados ocorreram na faixa do infravermelho próximo;
- ✓ O desempenho do modelo *GRART* nas simulações dos valores de FRB em todas as faixas espectrais desconsiderando a orientação das linhas de plantio foi melhor que as simulações feitas pelo modelo considerando a orientação das linhas de plantio;

✓ Ainda, conclui-se que, com o desempenho não satisfatório do modelo *GRART* no método direto, a sua inversão para a estimativa de parâmetros de dosséis de eucalipto não resultaria em dados consistentes ou confiáveis.

Para trabalhos futuros empregando o modelo *GRART* recomenda-se:

- ✓ Há a necessidade de melhor parametrização do modelo *GRART* com todos os dados bioquímicos e biofísicos admissíveis e necessários para “alimentá-lo”;
- ✓ Há a necessidade do conhecimento espacial e espectral do substrato;
- ✓ Há a necessidade de maior amostragem de folhas para representar a dinâmica espectral de um dossel de eucalipto;

Com os resultados obtidos por meio da aplicação do modelo *GRART* algumas conjecturas foram levantadas:

- ✓ O pior desempenho do modelo na simulação dos FRBs considerando a orientação das linhas de plantio em quase todas as faixas espectrais para as duas datas pode estar relacionado às incertezas provenientes dos dados não adquiridos em campo da orientação das linhas de plantio;
- ✓ As incertezas nas quatro faixas espectrais podem estar relacionadas também aos parâmetros assumidos constantes como o índice de área foliar e a distribuição angular das folhas, além das incertezas provenientes do desconhecimento espacial e espectral das folhas e do substrato;
- ✓ Possivelmente se o modelo fosse parametrizado com todos os dados bioquímicos e biofísicos admissíveis e necessários para alimentá-lo, o desempenho na estimativa dos valores de FRB nas quatro poderia ser melhor e retratar a dinâmica espectral de um dossel de eucalipto;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, C. F.; SILVA, J. R.; GLERIANI, J. M.; SOARES, V. P.; RIBEIRO, C. A. Á. S.; SCHIMITH, R. S. Utilização de modelos de normalização topográfica para a classificação de fragmentos florestais na Zona da Mata Mineira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 1591-1598. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em:  
<<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.19.48>  
<<http://urlib.net/rep/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.19.48?languagebutton=pt-BR>>>. Acesso em: 04 jan. 2010.
- ANNANDALE, J.G.; JOVANOVIĆ, N.Z.; CAMPBELL, G.S.; DU SAUTOY, N.; LOBIT, P. Two-dimensional solar radiation interception model for hedgerow fruit trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, n.121, p. 207-225, 2004.
- ANTUNES, M.A.H. **Avaliação dos modelos SUTIS e SAIL no estudo da refletância da soja (Glycine Max (L.) MERRILL)**. 1992. 140p. (INPE-6988-TDI/657).Dissertação(Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) São José dos Campos, 1992. Disponível em:  
<<http://mtcm12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris%401912/2005/07.19.23.53/doc/paginade acesso.html>>. Acesso em 01 out. de 2008.
- ARAGÃO, L.E.O.C.; SHIMABUKURO, Y.E.; ESPÍRITO SANTO, F.D.B.; WILLIAMS, M. Landscape pattern and spatial variability of leaf area index in Eastern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v.211, n.3, p.240-256, June 2005.
- ASNER, G.P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 64, p. 234-253, 1998.
- ASNER, G.P.; HICKE, J. A.; LOBELL, D. B. Per-pixel analysis of forest structure: Vegetation indices, spectral mixture analysis and canopy reflectance modeling. In: WULDER, M. A.; FRANKLIN, S. E. (eds.). **Remote sensing of forest environments: concepts and case studies**, 2003. p. 209-254.
- BARRY, K.M.; NEWNHAM, G.J.; STONE, C. Estimation of chlorophyll content in Eucalyptus globulus foliage with the leaf reflectance model PROSPECT. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1209–1213 , 2009.
- BIRD, R. A simple solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance. **Solar Energy**, v.32, n.4, p.461-471, 1984.
- BRUNORI, A.; NAIR, P.K.R.; ROCKWOOD, D.L. Performance of two Eucalyptus species at different slope positions and aspects in a contour-ridge planting system in the Negev Desert of Israel. **Forest Ecology and Management**, n. 1-3, v. 75., p. 41-48, 1995.

CAMARA NETO, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computer and Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, May - June 1996. (INPE-6416-PRE/2455).

Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/geopro/trabalhos/spring.pdf> >. Acesso em: 22 de jun. de 2006.

CAMPOS, R.C. **GRART**: modelo de transferência radiativa para dosséis agrícolas esparsos. 2008. 146p. Tese( Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008. Disponível em: <[http://mtcm18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtcm18@80/2009/02.06.17.52/doc/TESE\\_FI\\_NAL\\_0812bcp\\_pg.doc](http://mtcm18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtcm18@80/2009/02.06.17.52/doc/TESE_FI_NAL_0812bcp_pg.doc)>. Acesso em: 09 de fev.de 2009.

CANAVESI, V. **Aplicação de dados Hyperion EO-1 no estudo de plantações de Eucalyptud spp.** 2008. 124p. Tese( Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008.

CANAVESI, V.; PONZONI, F. J. Relações entre variáveis dendrométricas de plantios de Eucalyptus sp. e valores de FRB de superfície de imagens do sensor TM/Landsat 5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 1619-1625. CD-ROM; On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. (INPE-16284-PRE/10864). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.10.20.48>>. Acesso em: 4 jan. 2010.

CHANDER, G.; MARKHAM, B.L.; HELDER, D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v.113, n.5, p.893-903, May 2009

CHAVES, R. A.; REIS, M. G. F.; REIS, G. G.; PEZZOPANE, J. E. M.; XAVIER, A.; MONTE, M. A. Dinâmica de cobertura de dossel de povoamentos de clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden submetidos a desrama artificial e desbaste. **Revista Arvore**, v. 31, n. 6, p. 989-998, 2007

COLOMBO, R.; BELLINGERI, D.; FASOLINI, D., MARINO, C. Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v.86, p. 120-131, 2003.

COLOMBO, R.; MERONI, M.; MARCHESI, A.; Busetto, L.; ROSSINI, M.; GIARDINO, C.; PANIGADA, C. Estimation of leaf and canopy water content in poplar plantations by means of hyperspectral indices and inverse modeling. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 1820-1834, 2008.

COMBAL, B.; BARET, F.; WEISS, M.; TRUBUIL, A.; MACÉ, D.; PRAGNE'RE, A.; MYNENI, R.; KNYAZIKHIN, Y.; WANG, L. Retrieval of canopy biophysical variables from bidirectional reflectance using prior information to solve the ill-posed inverse problem. **Remote sensing of Environment**, v. 84, p. 1-15, 2002.

DARVISHZADEH, R.; SKIDMORE, A.; SCHLERF, M.; ATZBERGER, C. Inversion of radiative transfer model for estimating vegetation LAI and chlorophyll in a heterogeneous grassland. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 2592-2604, 2008.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos; **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412p.

FOODY, G.M.; BOYD, D.S.; CUTLER, M.E.J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. **Remote Sensing of Environment**, v.85, n.4, p.463-474, June 2003.

FORRESTER, D.; MEDHURST, J.L.; WOOD, M.; BEADLE, C.L.; VALENCIA, J.C. Growth and physiological responses to silviculture for producing solid-wood products from Eucalyptus plantations: An Australian perspective. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1819-1835, April 2010.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLANTICA. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica**: período 2005-2009. 5. ed. São Paulo, 2009. Escala 1: 50.00.

GANIS, A. Radiation transfer estimate in a row canopy: a simple procedure. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.88, p. 67-76, 1997.

GAUSMAN, H. W. ; ALLEN, W. A.; MYERS, V. I.; CARDENAS, R. Reflectance and internal structure of cotton leaves, *Gossypium hirsutum* L. **Agronomy Journal**, Madison, v. 61, n. 3, p. 374-376, May/June 1969.

GAUSMAN, H. W. **Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light**. Graduate Studies (Thesis) – Texas Tech University, n.29, 1985. 78p

GEMMELL, F.; VARJO, J. Utility of Reflectance Model Inversion Versus Two Spectral Indices for Estimating Biophysical Characteristics in a Boreal Forest Test Site. **Remote Sensing of Environment**, v. 68, p. 95-111, 1999.

GOEL, N.S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, v. 4, p. 1-212, 1988.

HABOUDANE, D.; MILLER, J.R.; PATTEY, E.; ZARCO-TEJADA, P.; STRACHAN, I.B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting Green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote sensing of Environment**, v. 90, p.337-352, 2004.

HALL, F.G., STREBEL, D.E., NICKESON, J.E., GOETZ, S.J. 1991. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multitemporal, multisensor images. **Remote Sensing of Environment**, 35: 11-27.

HOUBORG, R.; SOEGAARD, H.; BOEGH, E. Combining vegetation index and model inversion methods for the extraction of key vegetation biophysical parameters using Terra and Aqua MODIS reflectance data. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, p.39-58, 2007.

HOUBORG, R.; ANDERSON, M.; DAUGHTRY, C. Utility of an image-based canopy reflectance modeling tool for remote estimation of LAI and leaf chlorophyll content at the field scale. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 259-274, 2009.

HUEMMERICH, K. F. The GeoSail model: a simple addition to the SAIL model to describe discontinuous canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, n. 75, p. 423-431, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVAVEIS (IBAMA). **Unidades de conservação, florestas nacionais, Região Sudeste**. Disponível em: [http://www.ibama.gov.br/sp/index.php?id\\_menu=190](http://www.ibama.gov.br/sp/index.php?id_menu=190). Acesso em 7 jan 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA (IBGE). **Mapa de vegetação do Brasil**. 2004, 3a Ed. Escala 1: 5.000.000.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo**. São Paulo, 1981, escala 1: 1000 000. v. 1.

JACQUEMOUD, S. PROSPECT: a model to leaf optical properties spectra. **Remote Sensing of Environment**, v. 34, p. 74-91, 1990.

JACQUEMOUD, S.; BACOUR, C.; POILVÉ, H.; FRANGI, J.P. Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: direct and inverse mode. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, p. 471-481, 2000.

KIMES, D. S.; KIRCHNER, A. Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes. **Applied Optics**, v.21, n. 22, p.4119-4129, 1982.

KIMES, D. S. Modeling the directional reflectance from complete homogeneous vegetation canopies with various leaf orientation distributions. **Optical Society of America**, v.1, n.7, p.725-737. July 1984.

KIMES, D.S.; KNYAZIKHIN, Y.; PROVETTE, J.L.; ABUEL GASIM, A. A.; GAO, F. Inversion methods for physically-based models. **Remote Sensing Reviews**, v. 18, p. 381- 439, 2000.



KOBAYASHI, H.; SUZUKI, R.; KOBAYASHI, S. Reflectance seasonality and its relation to the canopy leaf area index in an eastern Siberian larch forest: Multi-satellite data and radiative transfer analyses. **Remote sensing of Environment**, v. 106, p. 238-252, 2007.

KUMAR, R. Radiation from plants-reflection and emission: a review. **Lafayette, Purdue**: research foundation, 1974. 88 p. (Research Project, n. 5543)

KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; NETER, J.; LI, W. **Applied linear statistical models**. New York, USA: McGraw-Hill, 2005. 1396 p.

KUUSK, A. A two-layer canopy reflectance model. **Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer**, v.71, p.1-9, 2001.

LEBLANC, S. G.; BICHERON, P.; CHEN, J. M.; LEROY, M.; CIHLAR, J. Investigation of directional reflectance in boreal forests with an improved four-scale 151 model and airborne polder data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.37, n.3, p.1396-1414, May 1999.

LI, X.; STRAHLER, A. H. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete-crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.30, p.276-292, 1992.

LIANG, S. Canopy Reflectance Modeling. In: \_\_\_\_\_. **Quantitative remote sensing of land surfaces**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004. Wiley Series in Remote Sensing.

LIANG, S. Introduction. In: \_\_\_\_\_. **Quantitative remote sensing of land surfaces**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004. Wiley Series in Remote Sensing.

MARSDEN, C.; MAIRE, G. L.; STAPE, J.L.; SEEN, D.L.; ROUPSARD, O.; CABRAL, O.; EPRON, D.; LIMA, A.M.N.; NOUVELLON, Y. Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing Eucalyptus plantations. Aceito pela revista: **Forest Ecology and Management**. Acesso em: 03 de novembro de 2009.

MELLO, M.P.; LIMA, F.B.; SILVA, G.B.; VIANA, D.R. Estudo de correlações entre dados radiométricos coletados em campo e em nível orbital. **Geografia, Ensino & Pesquisa**, v.12, n.1, p.3948-3960, 2008.

MINNAERT, The reciprocity principle on lunar photometry. **Astrophysical Journal**, v. 93, p.403-410, 1941.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do Eucalipto no Brasil**. São Paulo, Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2000. 112p.

MYNENI, R.B.; MAGGION, S.; IAQUINTA, J.; PRIVETTE, J.L.; GOBRON, N.; PINTY, B.; KIMES, D.S.; VERSTRAETE, M.M.; WILLIAMS, D.L. Optical remote sensing of vegetation: modeling, caveats, and algorithms. **Remote sensing of Environment**, v. 51, p.169-188, 1995.

NI, W.; LI, X.; WOODCOCK, C. E.; CAETANO, M. R.; STRAHLER, A. H. An analytical hybrid GORT model for bidirectional reflectance over discontinuous plant canopies. **IEEE Geoscience and Remote Sensing**, v.37, n.2, p.987-999, 1999.

NICODEMUS, F.E.; RICHMOND, J.C.; HSIA, J.J.; GINSBERG, I.W.; LIMPERIS, T. Geometrical considerations and nomenclature for Reflectance. **National Bureau of Standards (U.S.) monograph**, issued October 1977.

NORMAN, J. M.; WELLES, J.M. Radiative transfer in an array of canopies. **Agronomy Journal**, v.75, p.481-488, 1983.

OLIVEIRA, J.B.O; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida**. Campinas: Instituto Agronomico/ EMBRAPA Solos, 1999. 64 p.

PAIVA, H. N.; SILVA, A.R.; SILVA, L.L. Implantação da cultura de eucalipto. **Informe Agropecuário**, v. 29, n. 242, p. 23-31, 2008

PETERNELLI, L.A.; MELLO, M.P. de. **Conhecendo o R: uma visão estatística**. Viçosa, MG. Editora UVF, 2007. 182p.

PINTY, B.; GOBRON, N.; WIDLÓWSKI, J.L.; GERSTL, S. A. W.; VERSTRAETE, M.M.; ANTUNES, M.; BACOUR, C.; GASCON, F.; GASTELLU, J-P.; NARENDRA, G.; JACQUEMOUD, S.; NORTH, P.; QIN, W.; THOMPSONS, R. Radiation Transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise. **Journal of Geophysical Research**, v.106, p.11.937-11.956, 2001.

PINTY, B.; WIDLÓWSKI, J. -L.; TABERNER, M.; GOBRON, N.; VERSTRAETE, M. M.; DISNEY, M.; GASCON, F.; GASTELLU, J-P.; JIANG, L.; KUUSK, A.; LEWIS, P.; LI, X.; NI-MEISTER, W.; NILSON, T.; NORTH, P.; QIN, W.; SU, L.; TANG, S.; THOMPSONS, R.; VERHOEF, W.; WANG, H.; WANG, J.; YAN, G; ZANG, H. Radiation Transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise: Results from the second phase. **Journal of Geophysical Research**, v.109, p.1-19, 2004.

PONZONI, F.J.; GOMES, A.R.; MALDONADO, F.D.; SASSAGAWA; H.S.Y.; NUMATA, I.; ARAÚJO, L.S. Comparação entre fator de reflectância bidirecional de mudas de *Eucalyptus grandis* e o fator de reflectância direcional hemisférico de suas folhas isoladas. **CERNE**, v.8,n.1,p.059-068, 2002.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos, SP: Silva e Vieira, 2007. 135p. ISBN 9788560507023.

PONZONI, F.J.; GALVÃO, L.S.; LIESENBERG, V.; SANTOS, J.R. Potential of multi-angular and hyperspectral CHRIS/PROBA data for tropical forest biomass estimation. Aceito pela revista, **International Journal of Remote Sensing**.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical Computing**. Vienna, Áustria: R Foundation for Statistical Computing, 2009.

RAMOS, I. ; BOSCHI, R. S.; LOPES ASSAD, M.L. ; MARIN, F. R. . Aptidão agrícola de solos para a viticultura no estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31. **Anais...** Conquistas e Desafios da Ciência do Solo Brasileira. Porto Alegre : Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

ROSS, J. **The radiation regime and architecture of plant stands**. Dr W. Junk Publishers. The Hague-Boston-London, 1981, 391p.

SANTIS, A.; CHUVIECO, E. Burn severity estimation from remotely sensed data: Performance of simulation versus empirical models. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, p. 422-435, 2007.

SANTIS, A.; CHUVIECO, E.; VAUGHAN, P.J. Short-term assessment of burn severity using the inversion of PROSPECT and GeoSail models. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 126-136, 2009.

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

SCHLERF, M.; ATZBERGER, C. Inversion of a forest reflectance model to estimate structural canopy variables from hyperspectral remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, p. 281-294, 2006.

SCOLFORO, J. R. **O mundo Eucalipto: os fatos e mitos de sua cultura**. Rio de Janeiro: Mar de Idéias, 2008. 70p. ISBN (978-85-60458-04-2).

SETZER, J. **Atlas ecológico do estado de São Paulo**. Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguaí, 1966. 61p.

SILVA, B. S. G.; VALERIANO, D. M. Correção atmosférica e topográfica de imagens de satélite em terrenos montanhosos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3587-3594. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-

12738-PRE/8028). Disponível em:

<<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.18.37.34>>. Acesso em 04 de jan. 2010.

SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS (SiBCS). **Perguntas mais frequentes** - padrão de cores para mapas de solos até o segundo nível categórico. Brasília: Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Disponível em: <http://www.cnps.embrapa.br/sibcs/>. Acesso em: 16 de novembro de 2009.

SOARES, V.P.; RIBEIRO, C.A.A.S.; BRITES, R.S. Integração de imagens TM/LANDSAT e modelo digital de terreno para melhorar a classificação da cobertura terrestre. **Revista Ceres**, v. 47, n. 273, p. 511-522, 2000.

SOENEN, S.; PEDDLE, D.R.; COBURN, C. SCS+C: A Modified Sun-Canopy-Sensor Topographic Correction in Forested Terrain. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 9, p. 2148-2159, 2005.

SOUZA, A. A.; GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. R. Caracterização espectral de fisionomias de cerrado com dados hiperespectrais do sensor Hyperion/EO-1. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À ENGENHARIA FLORESTAL, 8., 2008, Curitiba. **Anais...** 2008. p. 32-37. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/plutao@80/2008/12.04.13.14.44>>. Acesso em: 04 jan. 2010.

STEININGER, M.K. Satellite estimation of tropical secondary forest above ground biomass: data from Brazil and Bolivia. **International Journal of Remote Sensing**, v.21, n.6 and 7, p.1139-1157, April 2000.

STUMPF, K.A. The estimation of forest vegetation cover descriptions using a vertical densitometer. In: POINT INVENTORY AND BIOMETRICS WORKING GROUPS SESSION AT THE SAF NATIONAL CONVENTION, 1993, Indianapolis. **Electronic Proceedings...**Indianapolis, 1993. Disponível em: <[www.grsis.com/publications/index.htm](http://www.grsis.com/publications/index.htm)> Acesso em: 26 mai. 2008.

TAGEEVA, S.V.; BRANDT, A.B.; DEREVYAKO, V.S. Changes in optical properties of leaves in the course of the growing season. **Bot. Sciences**, Doklady Akademii Nauk S.S.S.R., v.135, n.5, p. 266-268, 1960.

VALERIANO, M. M. **Reflectância espectral do trigo irrigado (*Triticum aestivum*, L.) por espectrorradiometria de campo e aplicações do modelo SAIL**. 1992. 149p. (INPE –5426 – TDI/483). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) São José dos Campos, 1992. Disponível em: <<http://mtcm12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.19.23.01.26/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 18 de dez. 2008.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos: INPE, 2004. 72 p. (INPE-10550-

RPQ/756). Disponível em:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/sergio/2004/06.30.10.57>>. Acesso em: 29 jan. 2009.

VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3595-3602. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12739-PRE/8029). Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.29.11.41>>. Acesso em 29 jan. 2009.

VALERIANO, M.M. **Equação para o cálculo do fator de iluminação**. São José dos Campos, SP, 2006.

VERMOTE, E.F.; TANRE, D.; DEUZE, J.L.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J.J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.35, n.3, p.675-686, May 1997

XAVIER, A. C.; SOARES, J.V.; ALMEIDA, A.C. Variação do índice de área foliar em clones de Eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, v.26, n.4, p.421-427, 2002

ZHAO, F.; GU, X.; VERHOEF, W.; WANG, Q.; YU, T.; LIU, Q.; HUANG, H.; QIN, W.; CHEN, L.; ZHAO, H. A spectral directional reflectance model of row crops. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 265-285, 2010.

WALTHALL, C.L. A Study of Reflectance Anisotropy and Canopy Structure Using a Simple Empirical Model. . **Remote Sensing of Environment**, v.61, p. 118-128, 1997.

WEI, C.; QINGJIU, T.; LIMING, W. A model of topographic correction and reflectance retrieval for optical satellite data in forested areas. In: THE INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, 2008, Beijing. **Proceedings...**Beijing: [s.n.], Beijing, 2008, v. XXXVII. Part B6b.p. 243-248, 2008.



## APÊNDICE A

Tabela A – Relação dos dados dendrométricos e dados cadastrais.

Parcela	DAP (cm)	H (m)	Ht (m)	Hc (m)	Rc (m)	D (%)	Espaçamento (m)	Idade (anos)	Solo*	Espécie
1	15,52	24,33	20,70	3,68	1,00	72	3,00 x 1,50	6,00	LV2	E1
2	16,37	24,425	21,325	3,1	1,1	78	3,00 x 1,50	6,00	LV2	E1
3	17,00	24,90	21,75	4,35	1,14	81	3,00 x 2,00	6,00	LV2	E2
4	17,83	25,65	21,45	4,20	1,20	65	3,00 x 2,00	6,00	LV2	E3
5	11,71	14,90	8,15	6,75	1,05	95	3,00 x 2,00	2,00	LV2	E3
6	12,06	13,75	7,525	6,15	1,274	91	3,00 x 2,00	2,00	LV2	E3
7	16,55	25,45	22,45	3,00	1,22	82	3,00 x 2,00	6,00	LV2	E4
8	16,10	23,45	20,10	3,35	1,19	72	3,00 x 2,00	5,00	LV2	E5
9	14,61	20,85	14,10	6,75	1,18	91	3,00 x 2,00	3,00	LV2	E3
10	14,06	18,65	14,55	4,10	1,21	89	3,00 x 2,00	3,00	LV3	E3
11	14,61	24,60	21,40	3,20	1,14	83	3,00 x 2,00	6,00	CXBD2	E3
12	15,05	22,70	20,50	2,20	0,99	84	3,00 x 2,00	6,00	LV3	E4
13	15,88	23,35	20,45	2,90	1,20	85	3,00 x 2,00	7,00	LV3	E6
14	13,17	16,10	11,30	4,80	1,15	84	3,00 x 2,00	3,00	LV2	E7
15	16,23	22,75	17,90	4,85	1,05	75	3,00 x 2,00	4,00	LV2	E2
16	16,80	23,80	20,6	3,20	1,13	88	3,00 x 2,00	4,00	LV2	E4
17	20,18	26,25	20,65	5,60	1,17	84	3,00 x 3,00	8,00	LV2	E3
18	24,98	29,55	21,10	8,45	1,23	83	3,00 x 3,00	9,00	LV2	E5
19	9,45	9,75	2,40	7,35	1,53	96	3,00 x 2,00	1,00	LV2	E3
20	7,92	8,30	8,30	8,30	1,55	90	3,00 x 2,00	1,00	LV3	E2
21	9,74	9,05	3,05	6,00	1,48	92	3,00 x 2,00	1,00	LV2	E2
22	10,99	11,80	5,75	6,05	1,42	91	3,00 x 2,00	2,00	LV2	E7
23	11,90	17,00	9,65	7,35	1,32	86	3,00 x 2,00	2,00	CXBD2	E3
24	12,03	15,90	10,65	5,25	1,35	87	3,00 x 2,00	2,00	LV2	E5
25	13,94	17,60	12,95	4,65	1,28	84	3,00 x 2,00	3,00	LV2	E6
26	13,33	16,90	12,25	4,65	1,39	85	3,00 x 2,00	3,00	LV1	E6
27	14,54	18,75	12,75	6,00	1,33	83	3,00 x 2,00	3,00	LV2	E5
28	18,14	26,65	23,70	2,95	1,28	79	3,00 x 2,00	5,00	LV1	E2
29	15,72	21,85	18,45	3,40	1,28	86	3,00 x 2,00	4,00	CXBD2/LV2	E6
30	16,64	23,95	20,10	3,85	1,27	73	3,00 x 2,00	5,00	LV3	E3

Onde: LV1 é LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado, textura muito argilosa, relevo plano a suavemente ondulado; LV2 é LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, relevo plano a suavemente ondulado; LV3 é LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado, textura média, relevo plano a suavemente ondulado e CXBD2 é CAMBISSOLO HÁPLICO, Distrófico, latossólico, A moderado, textura argilosa, relevo ondulado a fortemente ondulado.





## APÊNDICE B

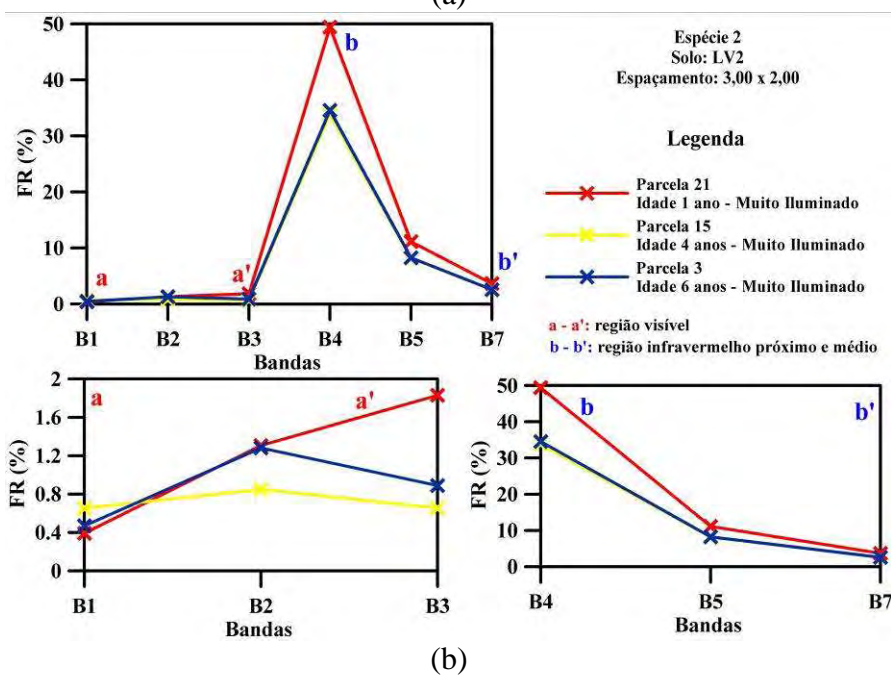
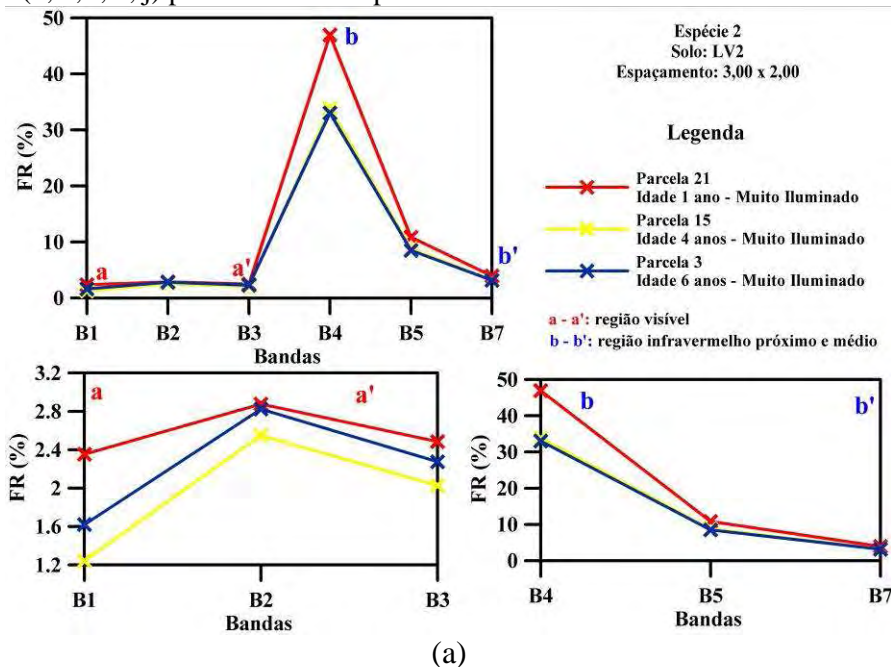
Tabela B – Relação dos dados radiométricos extraídos das imagens do dia 22.04.2009 e do dia 24.05.2009.

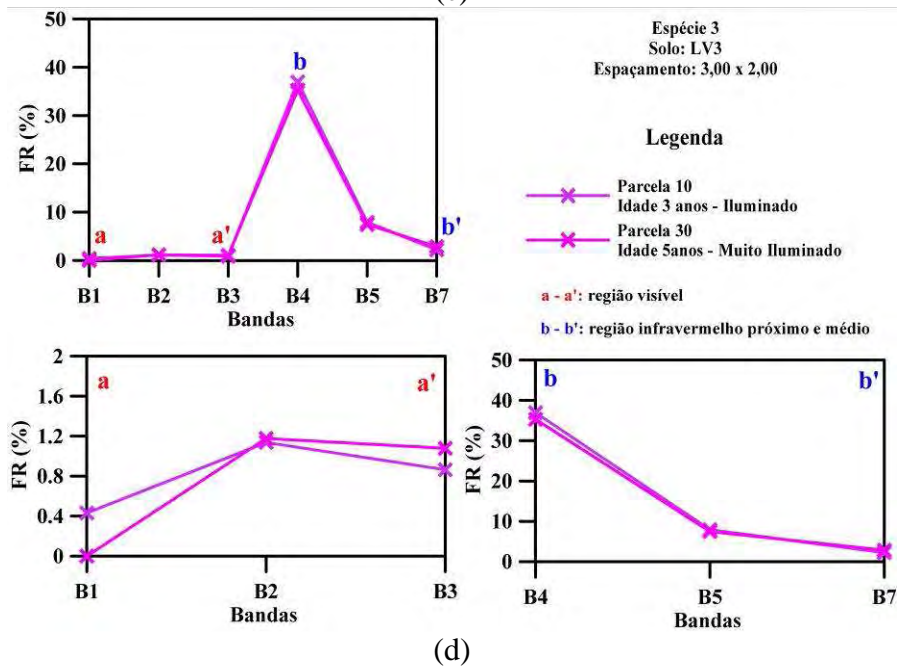
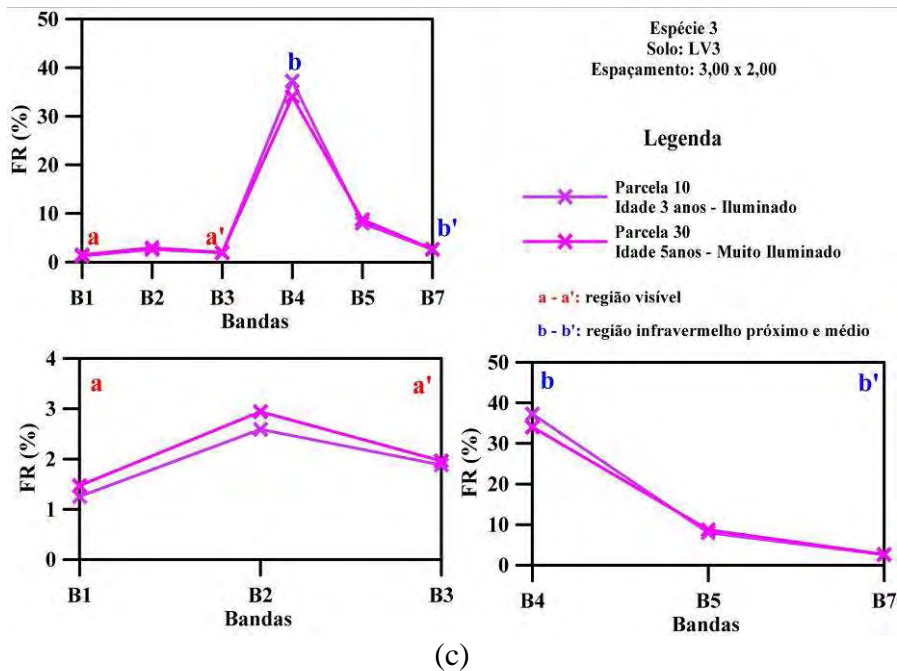
P	Dia 22.04.2009						Dia 24.05.2009					
	FR <sub>s1</sub>	FR <sub>s2</sub>	FR <sub>s3</sub>	FR <sub>s4</sub>	FR <sub>s5</sub>	FR <sub>s7</sub>	FR <sub>s1</sub>	FR <sub>s2</sub>	FR <sub>s3</sub>	FR <sub>s4</sub>	FR <sub>s5</sub>	FR <sub>s7</sub>
1	1,65	2,82	2,04	32,00	8,00	2,20	0,31	0,86	0,71	32,78	7,45	3,14
2	1,63	2,75	2,16	33,14	8,30	2,75	0,39	1,05	0,65	34,51	7,65	2,16
3	1,62	2,82	2,27	33,02	8,50	3,16	0,47	1,28	0,89	34,56	8,24	2,56
4	1,83	2,75	2,75	31,63	8,89	3,14	0,26	0,92	1,31	33,07	8,50	2,48
5	1,57	2,94	2,55	42,35	8,92	3,24	0,59	1,37	0,98	42,94	8,53	2,16
6	1,70	2,83	2,09	40,78	9,15	3,09	0,44	1,57	0,92	41,61	8,80	2,70
7	2,09	3,53	2,48	40,26	9,61	3,14	0,65	2,03	1,11	43,01	10,72	3,99
8	1,92	3,83	2,88	37,12	10,07	3,66	0,26	2,27	1,61	39,52	9,89	3,88
9	1,05	2,75	1,74	33,90	8,10	2,35	0,17	1,18	1,13	31,59	8,63	2,88
10	1,25	2,59	1,88	37,25	8,00	2,59	0,43	1,14	0,86	36,94	7,92	2,20
11	1,83	3,01	2,75	29,15	9,41	3,14	0,52	1,57	1,05	29,93	9,02	2,75
12	1,83	3,40	2,75	35,25	9,50	3,57	0,35	2,18	1,09	37,69	10,54	4,31
13	2,09	4,12	3,01	36,27	10,98	4,25	4,05	8,10	10,85	30,65	29,41	19,41
14	1,44	2,48	1,66	35,73	7,93	2,83	0,70	0,96	0,78	36,69	7,58	2,31
15	1,24	2,55	2,03	33,79	8,82	3,20	0,65	0,85	0,65	33,86	8,10	2,61
16	1,92	3,49	2,57	41,18	10,28	3,14	0,35	2,44	1,44	43,62	10,24	3,53
17	1,53	2,88	2,44	30,46	9,11	3,49	0,61	1,31	1,31	30,33	9,02	3,36
18	1,67	2,94	2,06	34,31	9,02	3,24	0,59	1,27	0,59	34,12	8,43	2,16
19	1,18	2,75	1,62	43,68	9,61	2,94	0,39	1,23	0,83	49,07	10,34	2,79
20	1,66	3,01	2,22	49,24	11,94	3,62	0,52	1,31	0,87	46,45	10,28	3,18
21	2,35	2,88	2,48	46,93	10,85	3,92	0,39	1,31	1,83	49,41	11,11	3,66
22	1,39	2,53	1,66	40,00	8,63	2,57	0,61	1,05	0,74	41,31	8,37	2,66
23	1,67	2,75	1,86	37,94	9,41	3,33	0,59	0,78	0,78	36,27	9,02	2,84
24	1,96	3,14	2,35	41,37	10,29	3,43	0,59	1,37	1,08	43,63	9,51	2,75
25	1,31	2,88	2,14	36,25	9,06	2,83	0,52	1,87	0,87	37,34	8,71	2,61
26	1,61	2,83	2,22	35,42	9,02	3,18	0,52	1,44	0,96	36,69	8,37	2,53
27	1,65	2,90	2,08	39,96	9,92	3,25	0,47	1,41	1,33	37,69	9,41	3,49
28	1,35	2,70	1,57	32,42	7,97	2,79	0,44	0,87	0,57	32,29	6,93	2,40
29	3,92	6,47	4,71	38,43	12,55	6,47	0,00	2,35	1,18	40,39	9,80	3,53
30	1,47	2,94	1,96	34,02	8,73	2,65	0,00	1,18	1,08	35,29	7,45	2,84

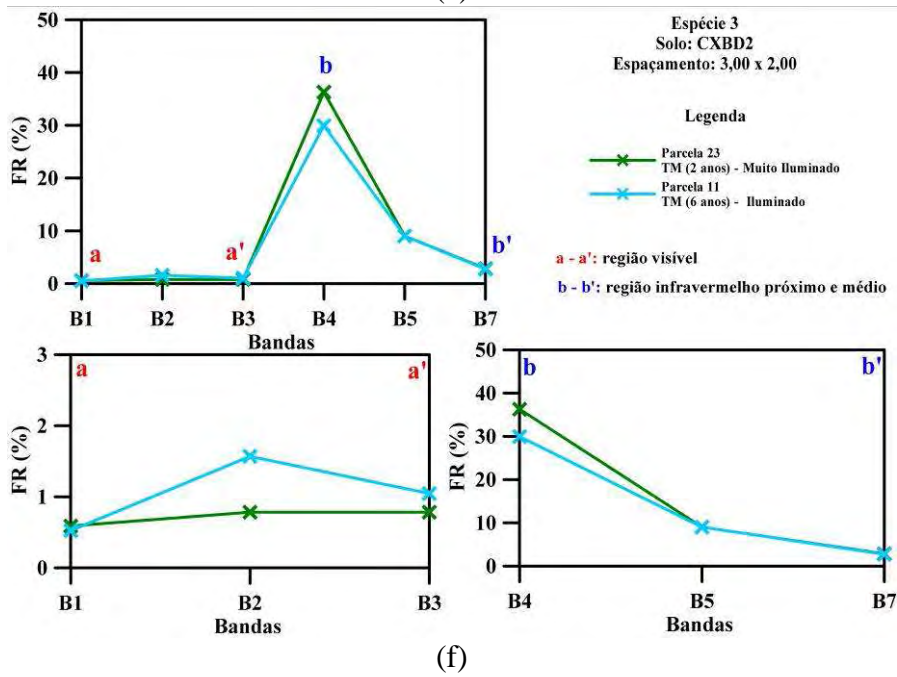
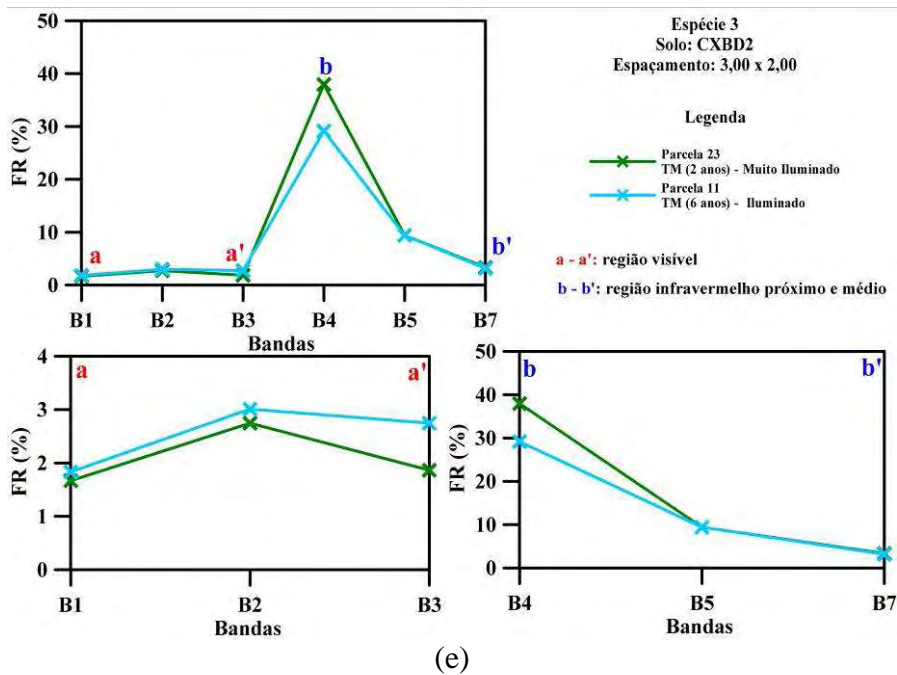


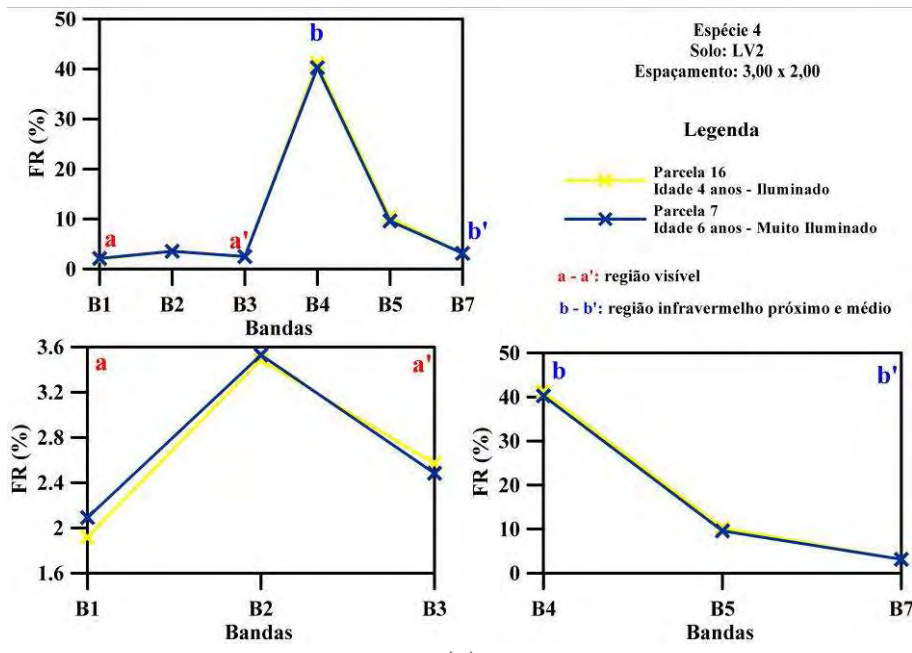
## APÊNDICE C

Gráficos dos espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 (a, c, e, g, i) e do dia 24.05.2009 (b, d, f, h, j) para as demais espécies.

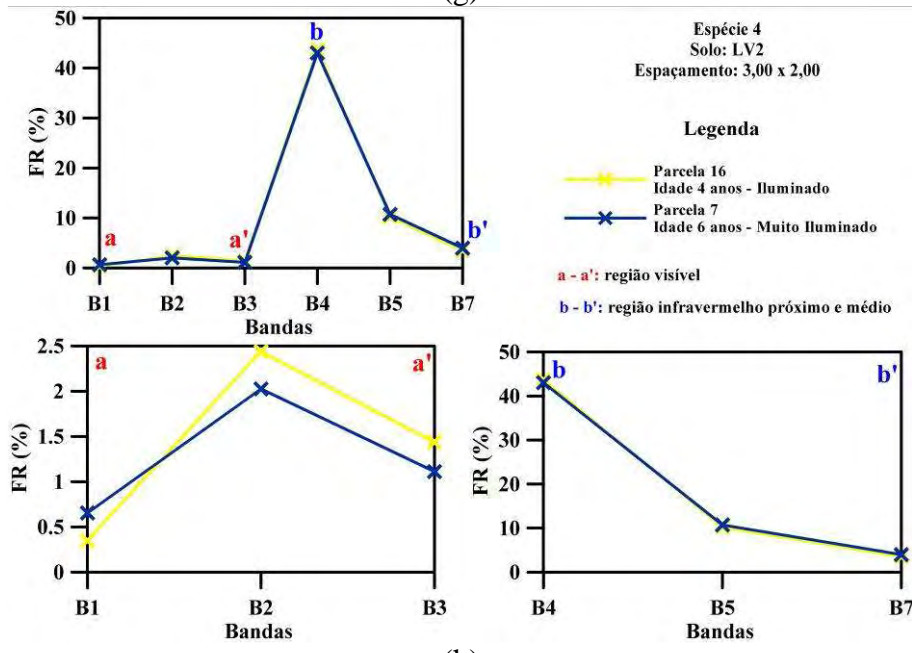




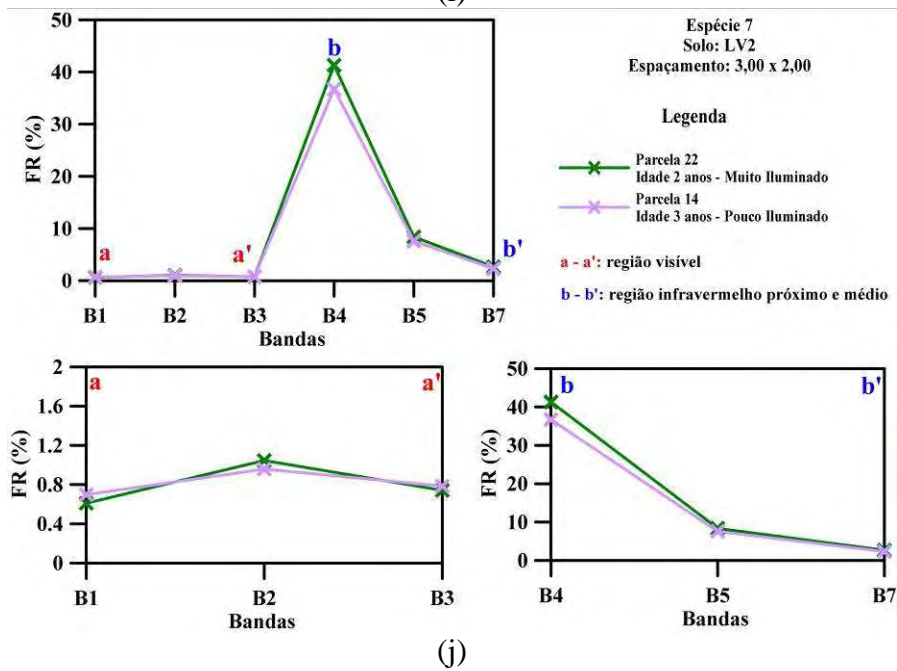
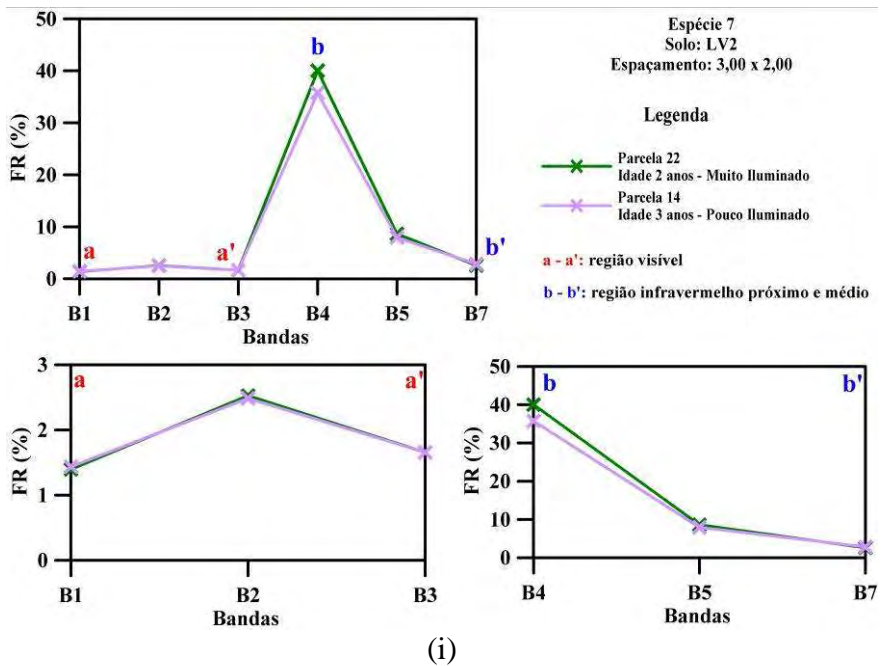




(g)



(h)

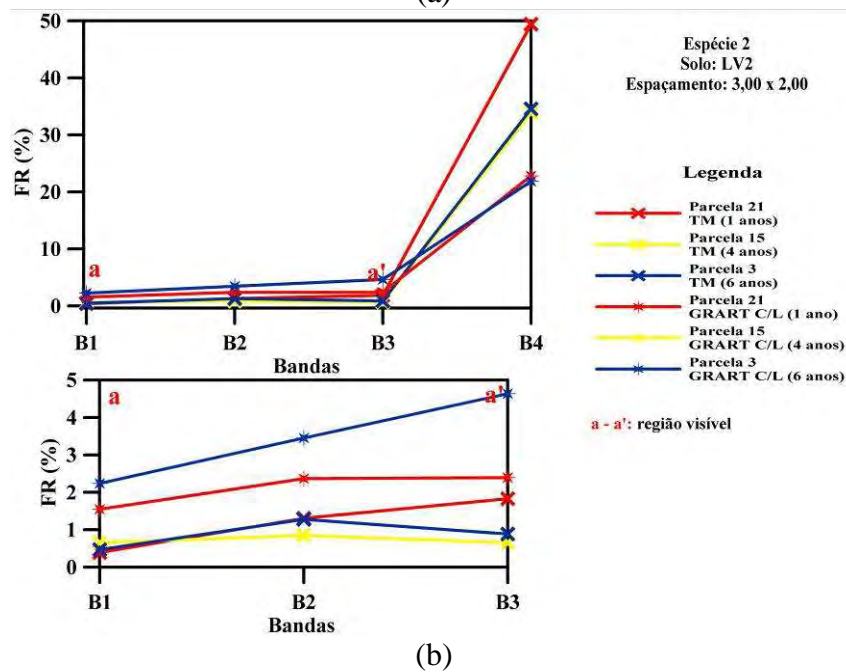
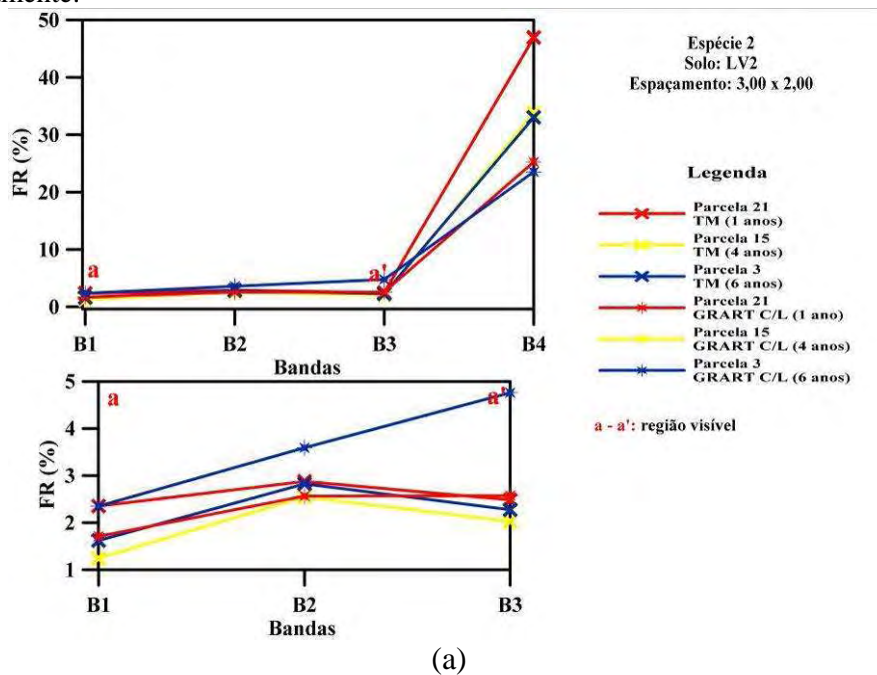


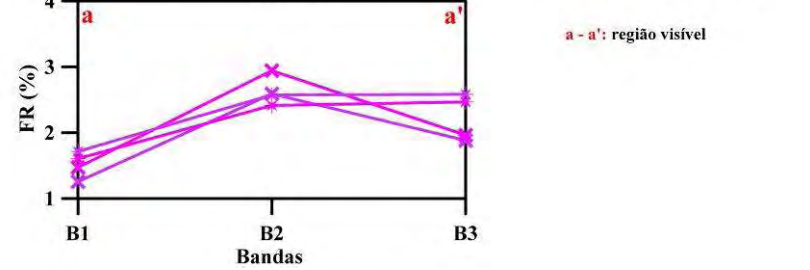
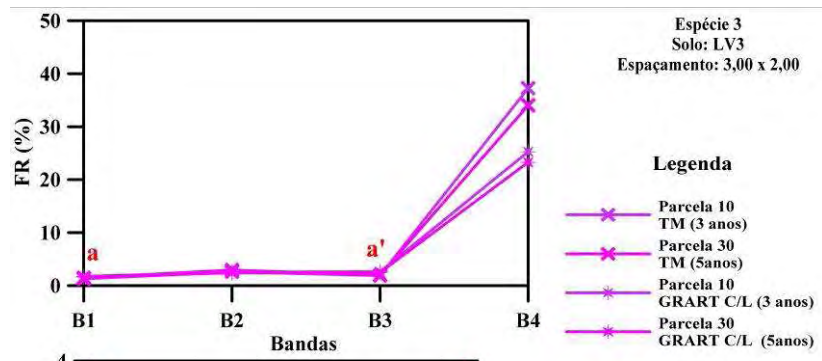




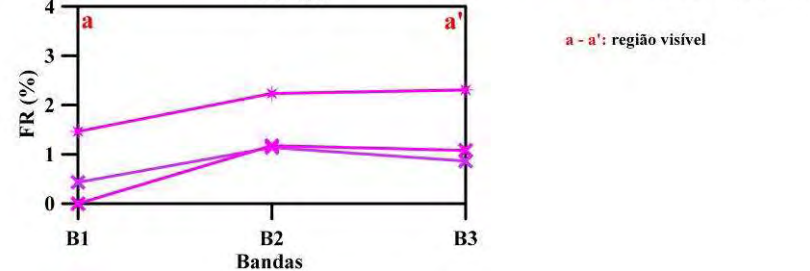
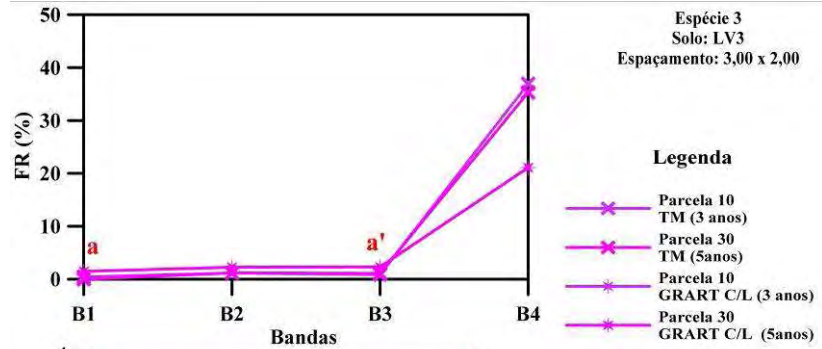
## APÊNDICE D

Comparação entre os espectros médios extraídos das imagens do dia 22.04.2009 (a, c, e, g, i, l, p, n, r, t) e do dia 24.05.2009 (b, d, f, h, j, m, o, q, s, u) e os espectros médios simulados para as demais espécies considerando e desconsiderando a orientação da linha de plantio, respectivamente.

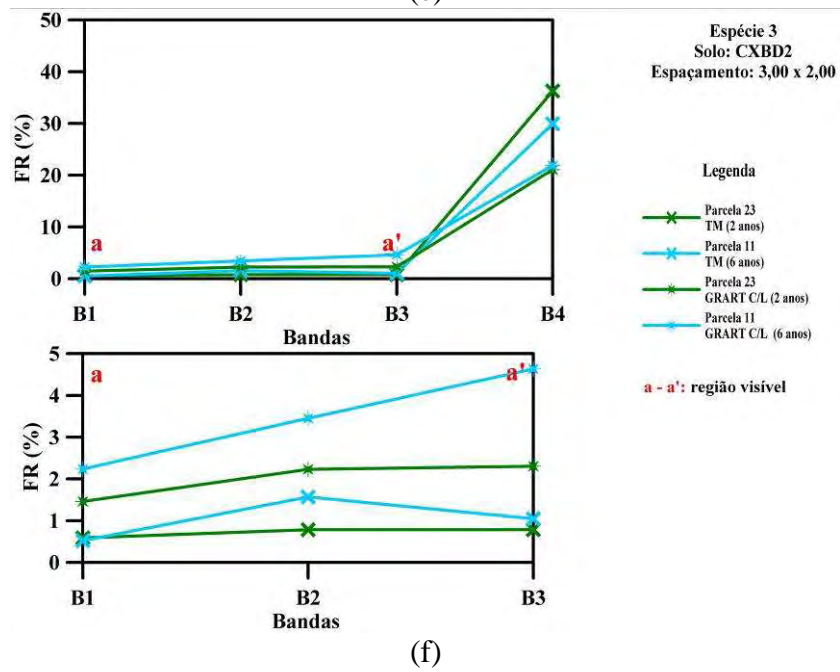
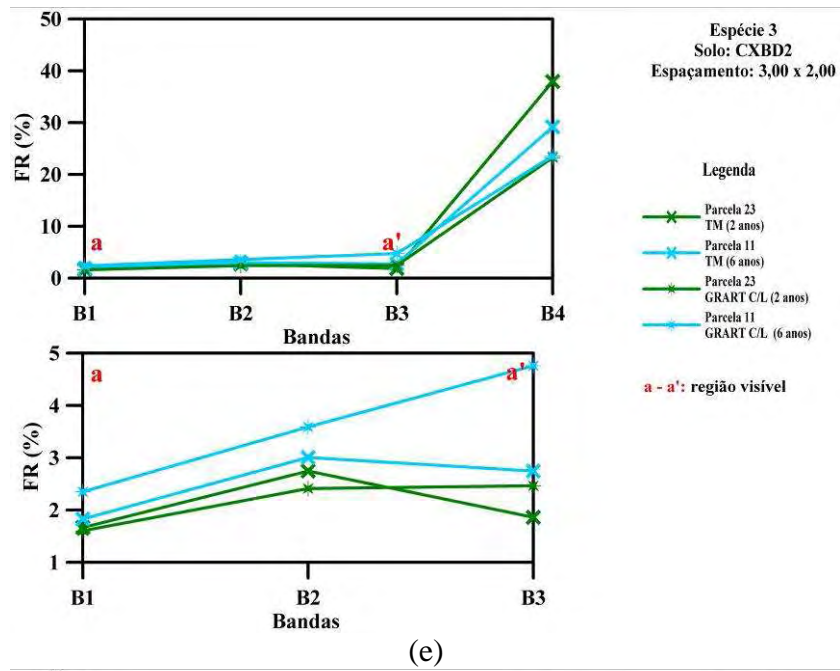


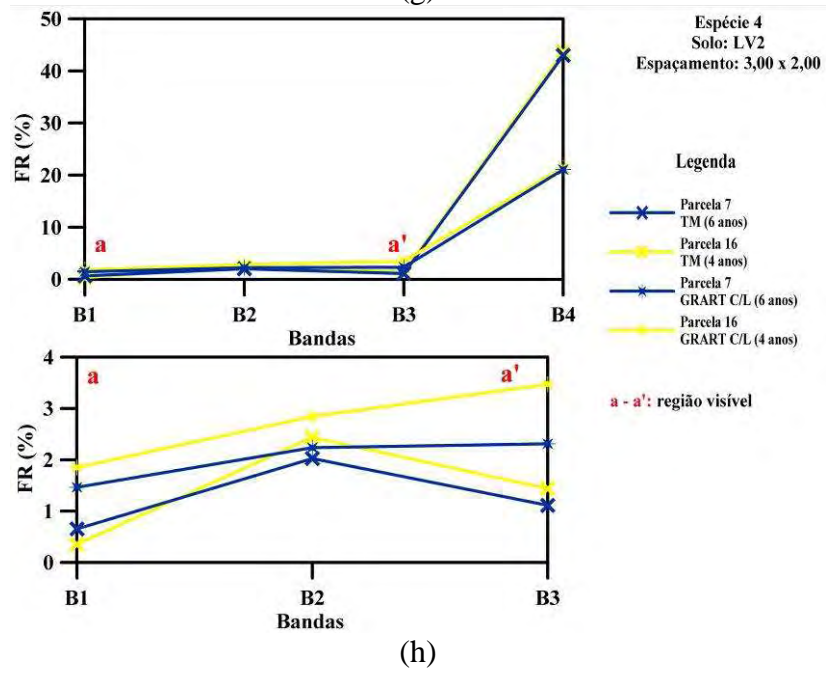
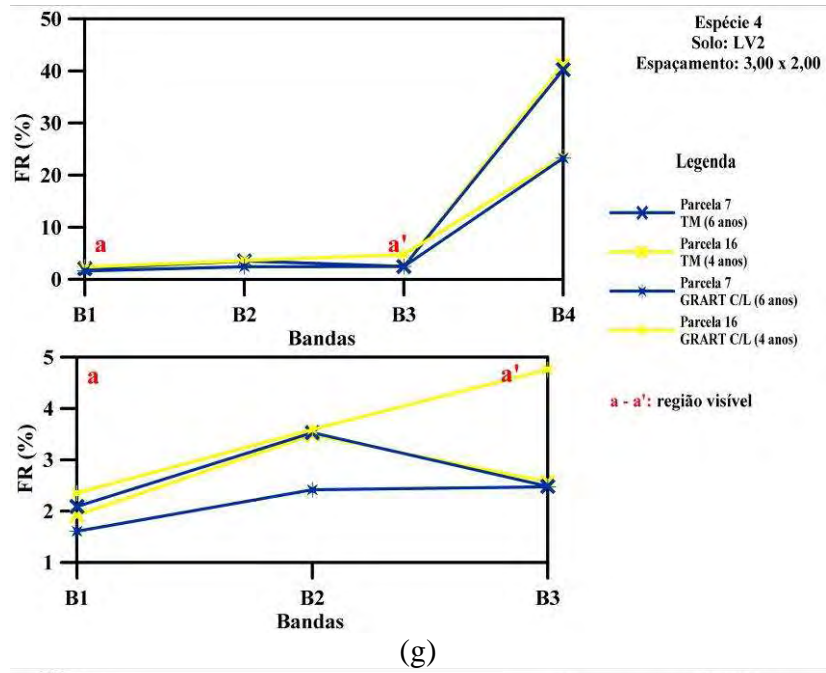


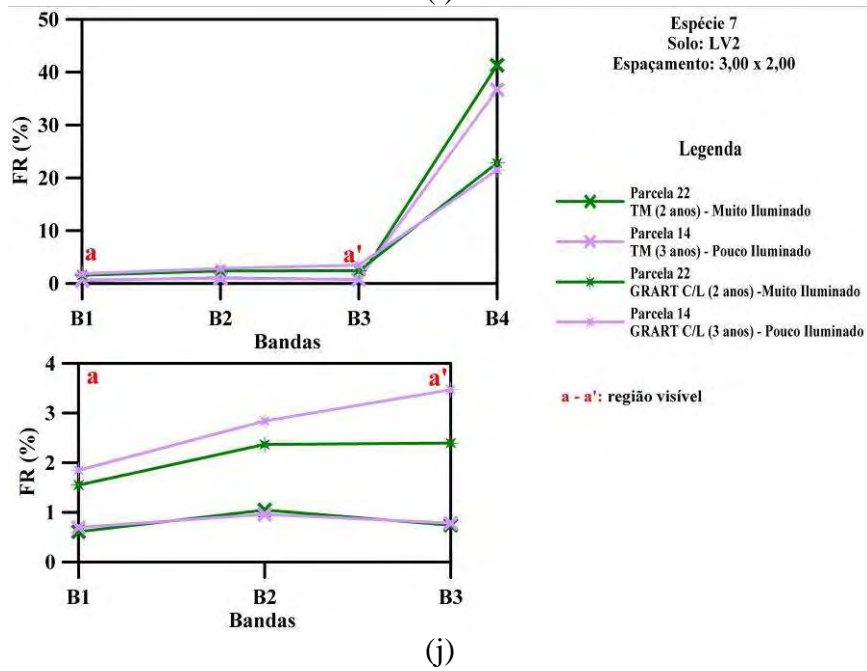
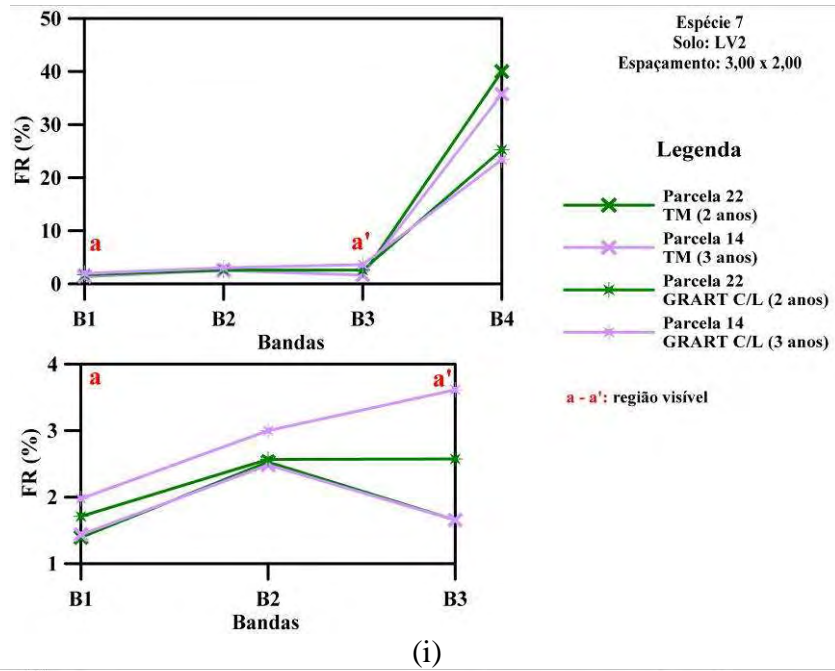
(c)

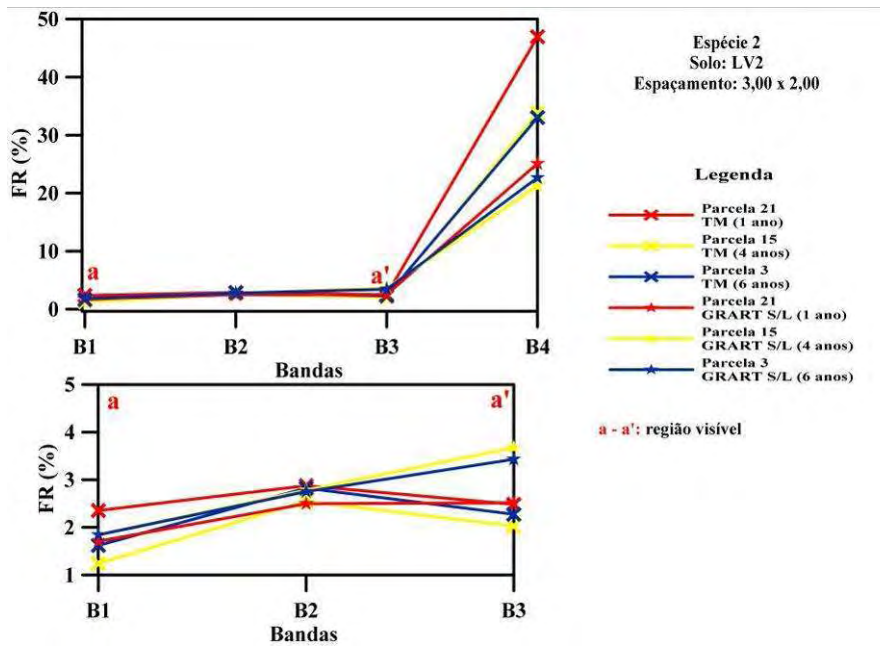


(d)

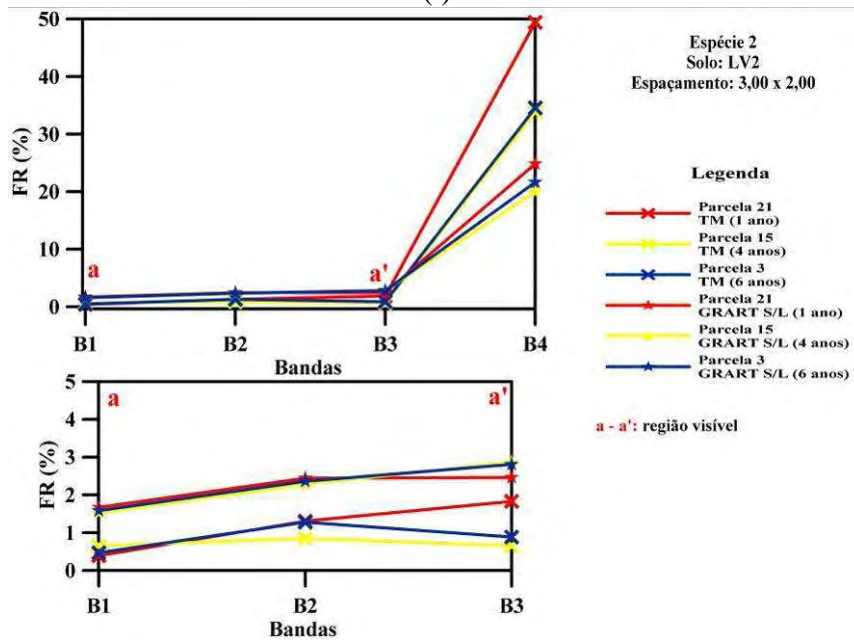




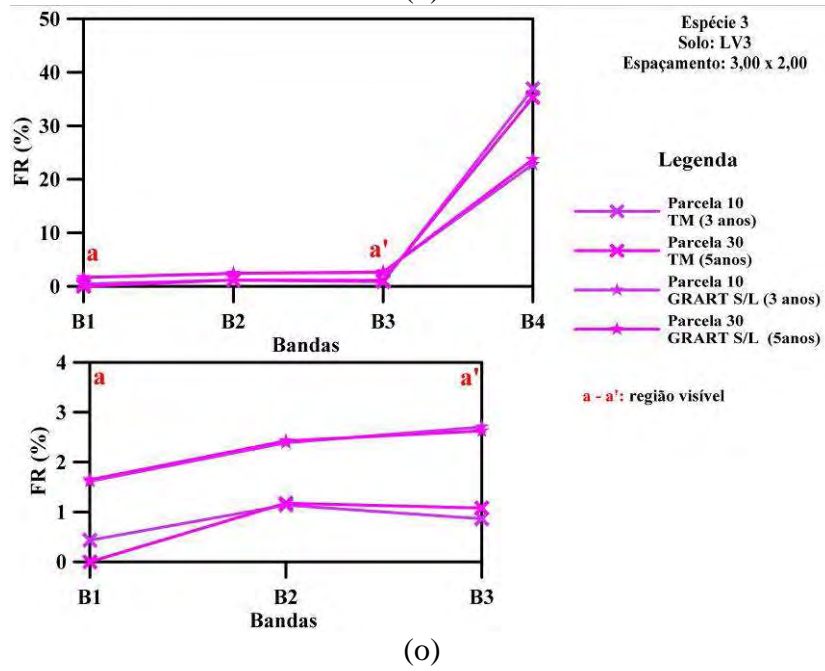
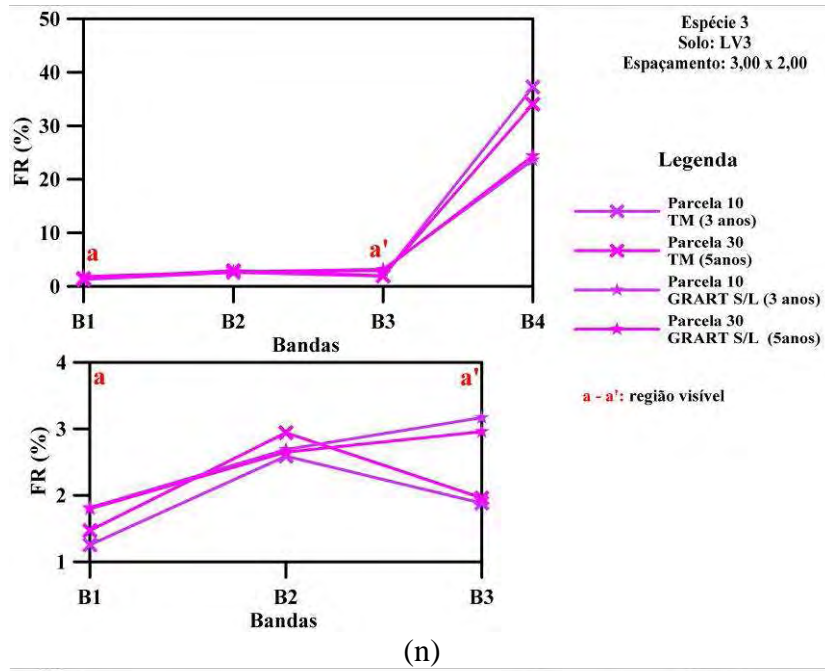


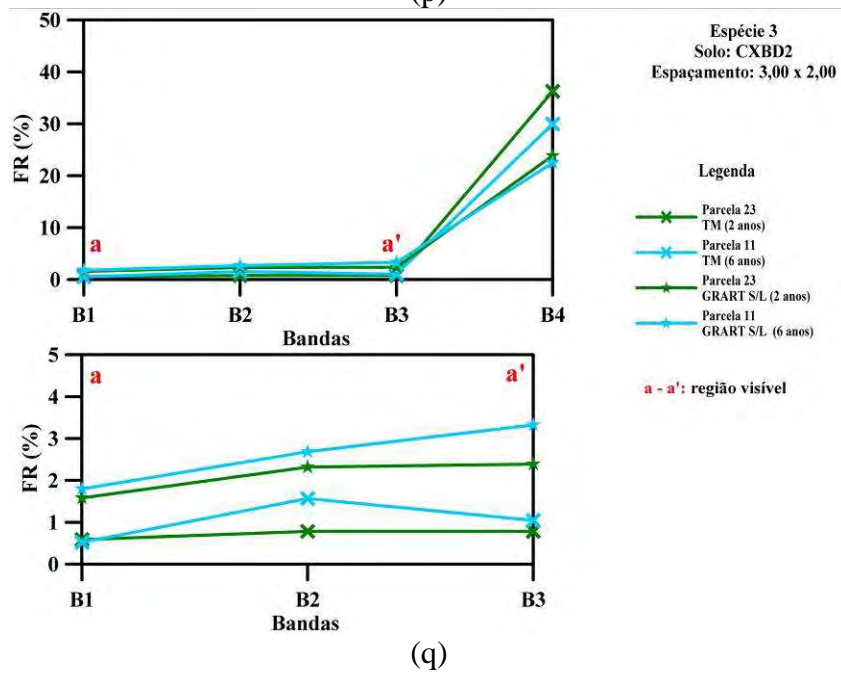
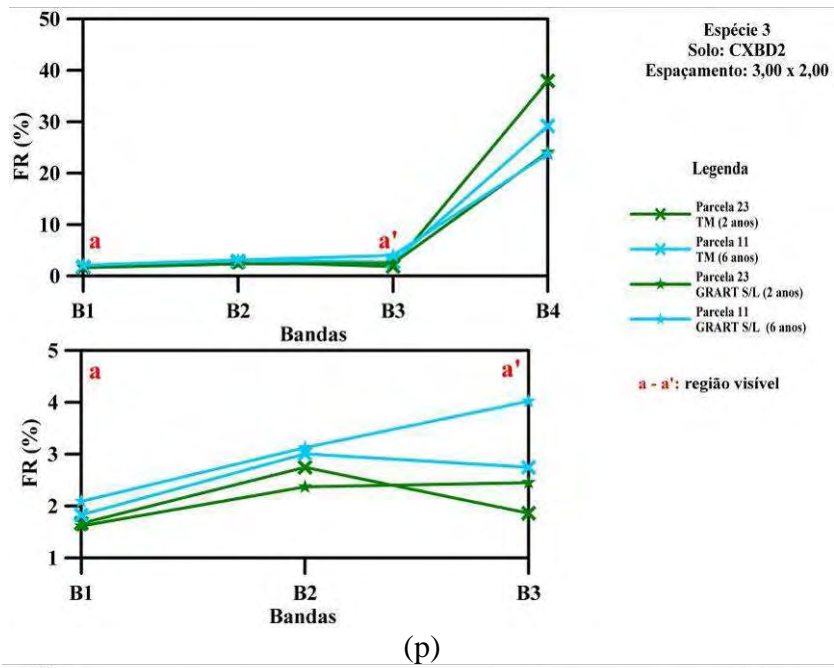


(l)

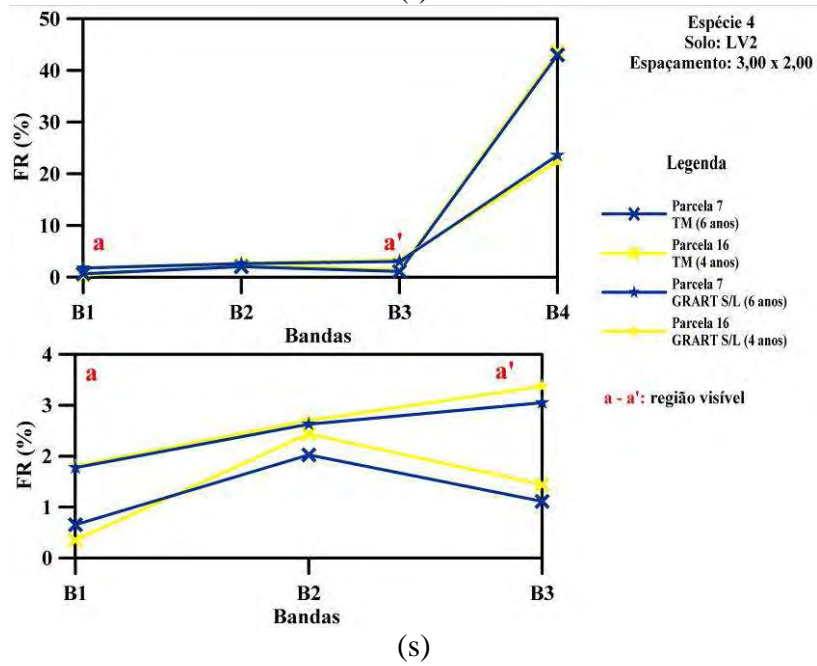
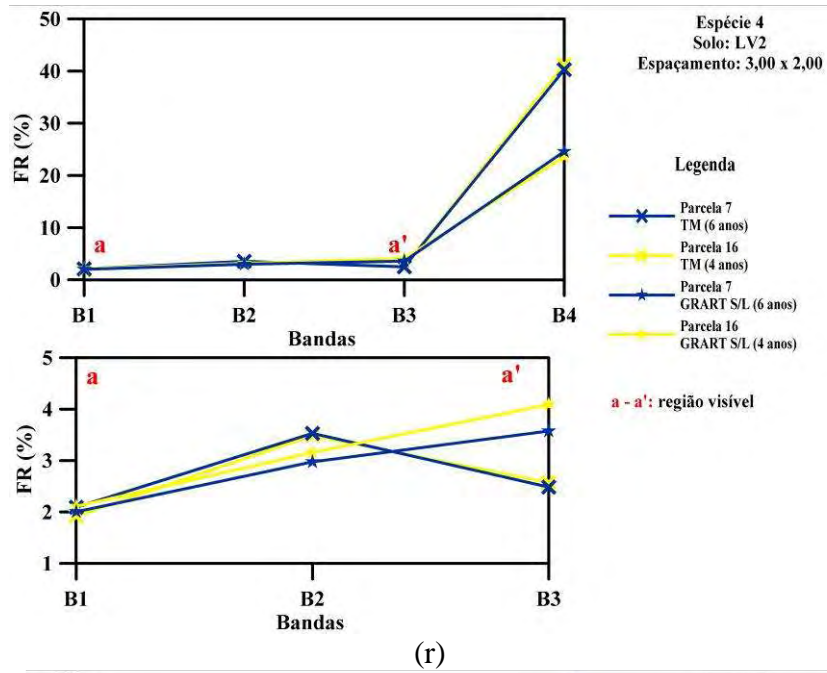


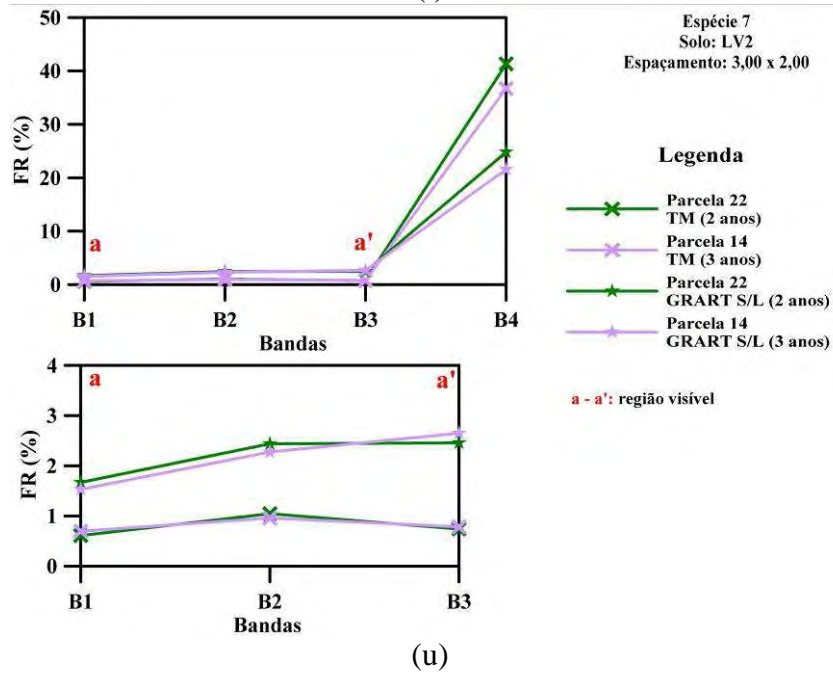
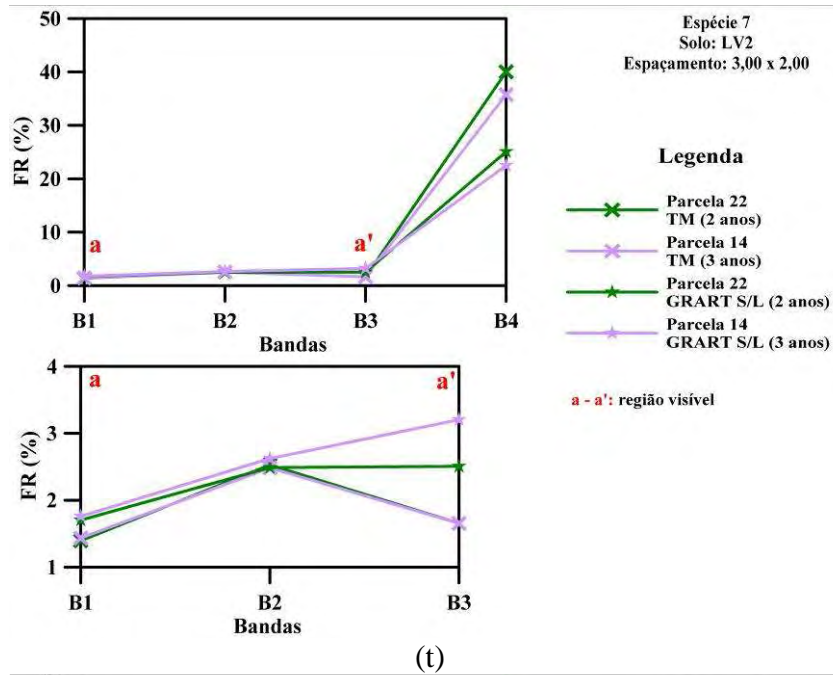
(m)







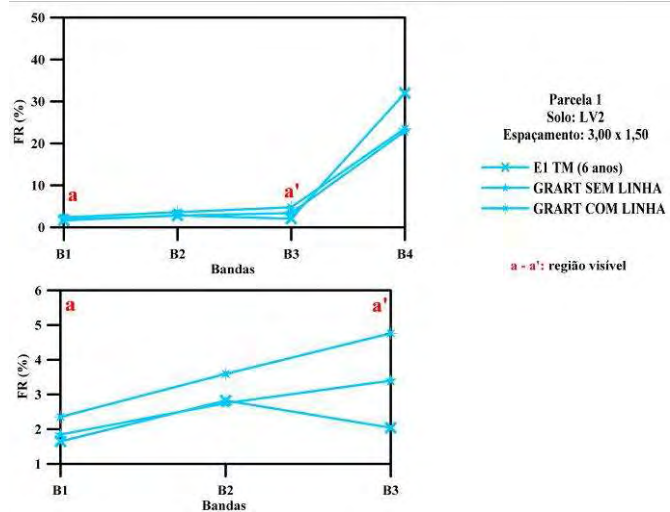




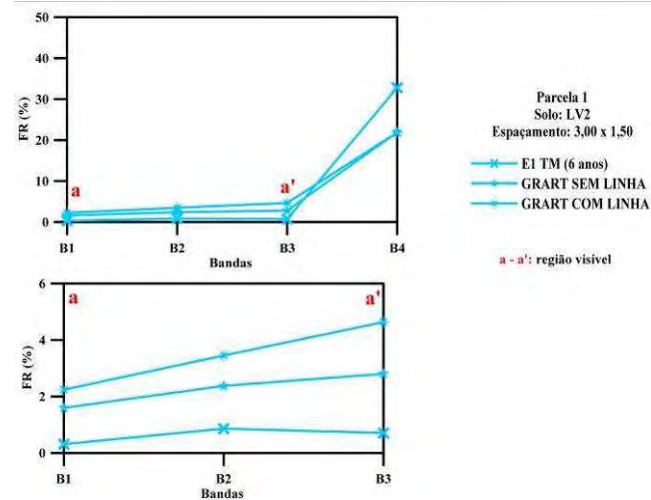
## APÊNDICE E

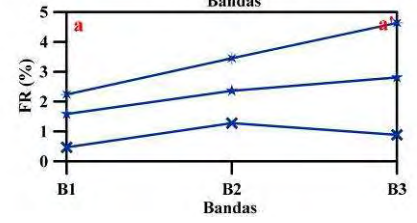
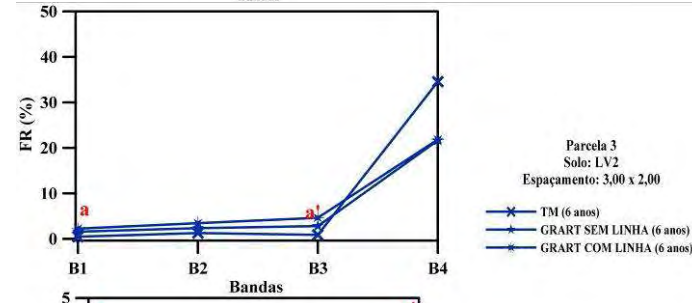
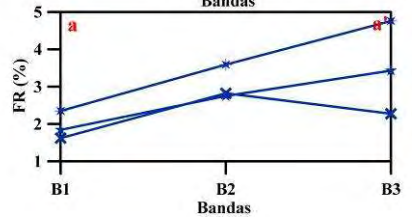
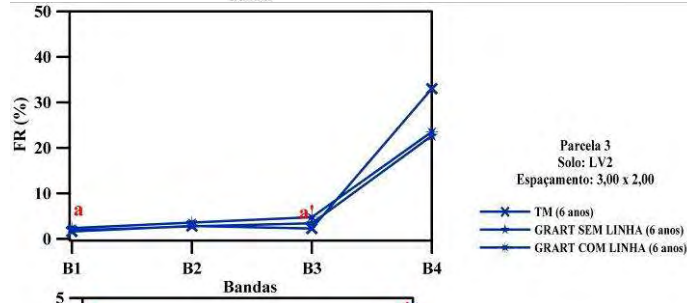
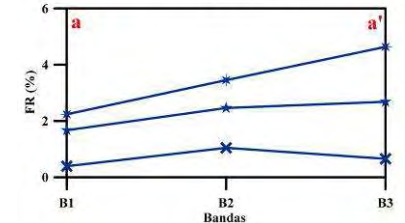
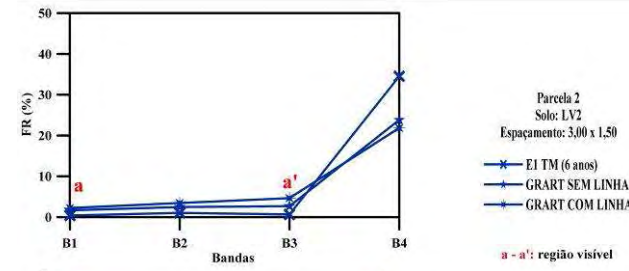
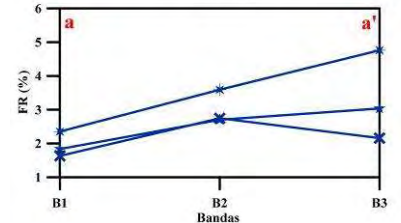
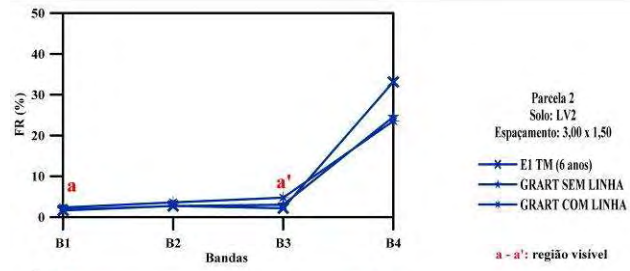
Gráficos com os espectros observados e os espectros simulados de cada parcela.

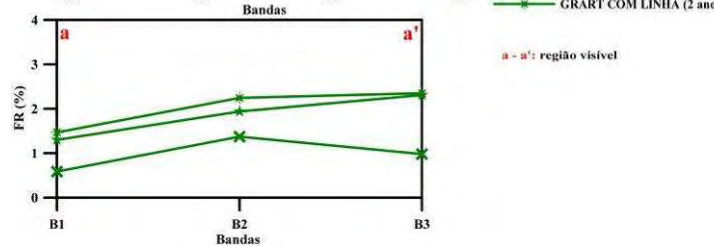
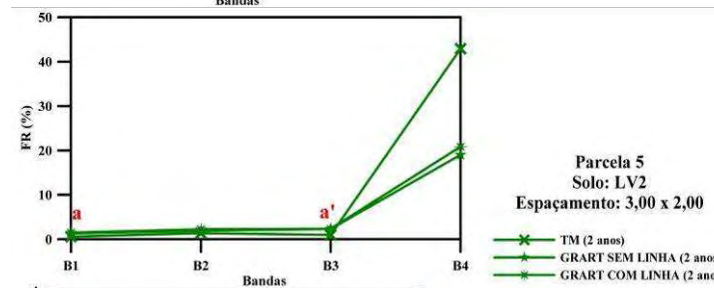
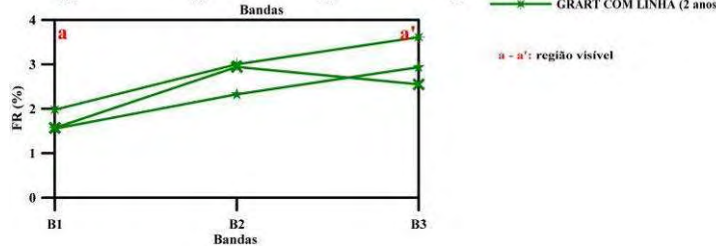
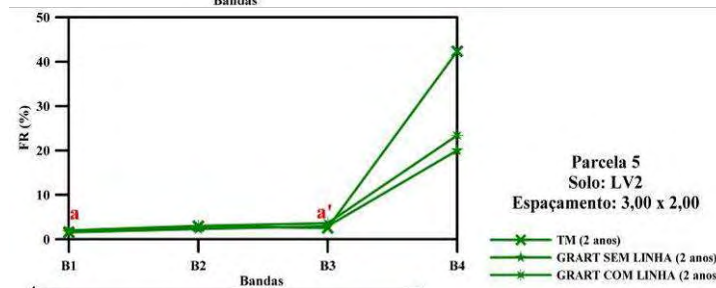
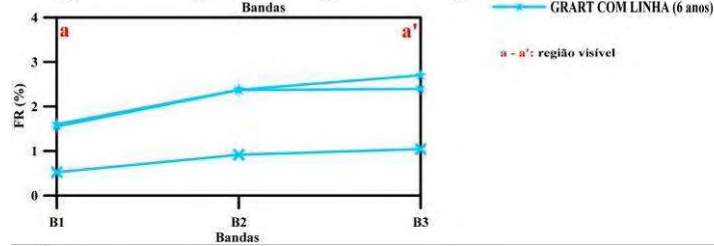
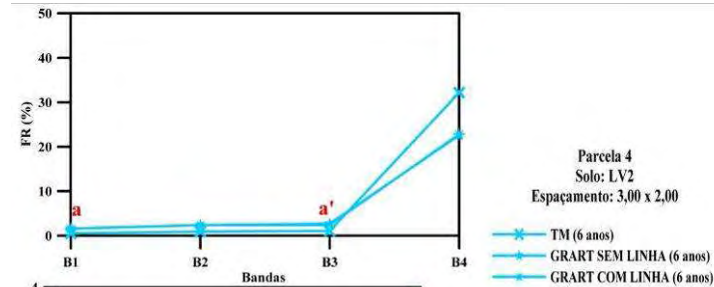
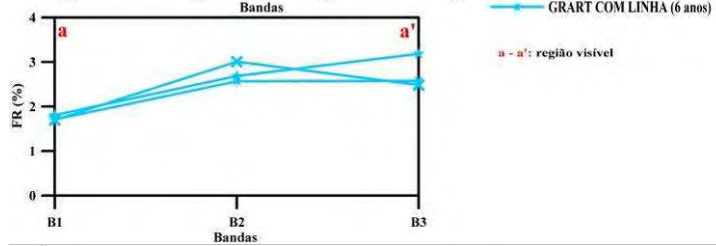
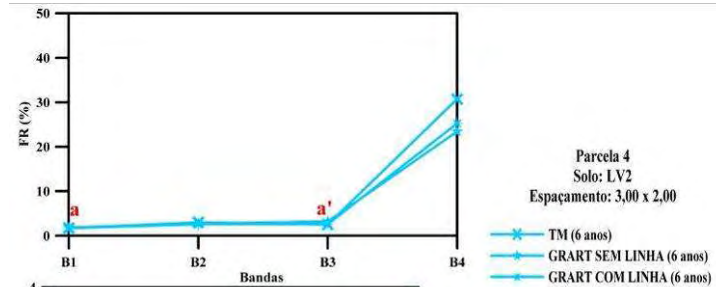
Data 22.04.2009

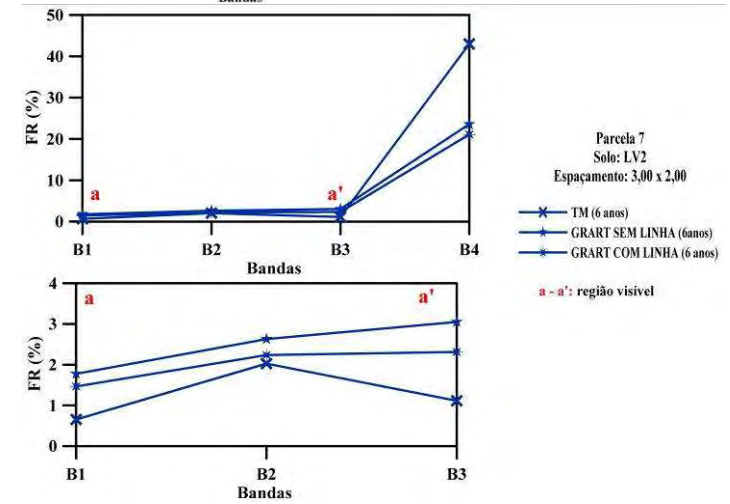
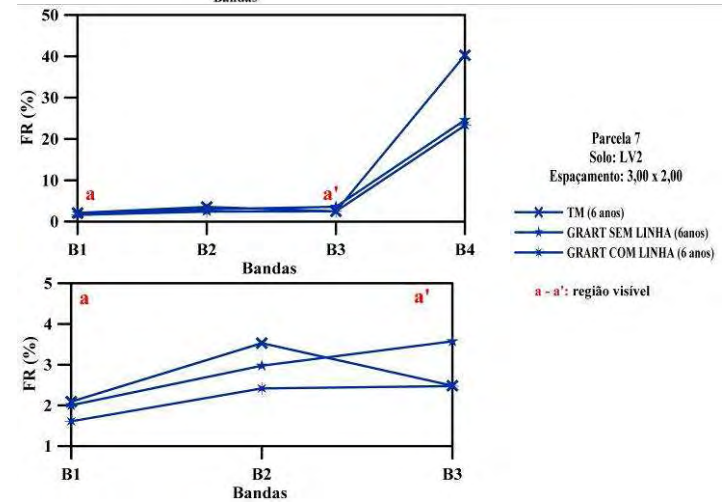
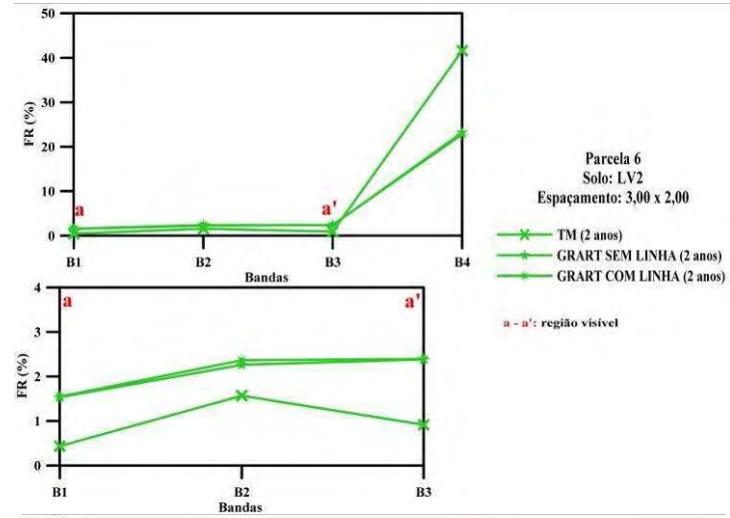
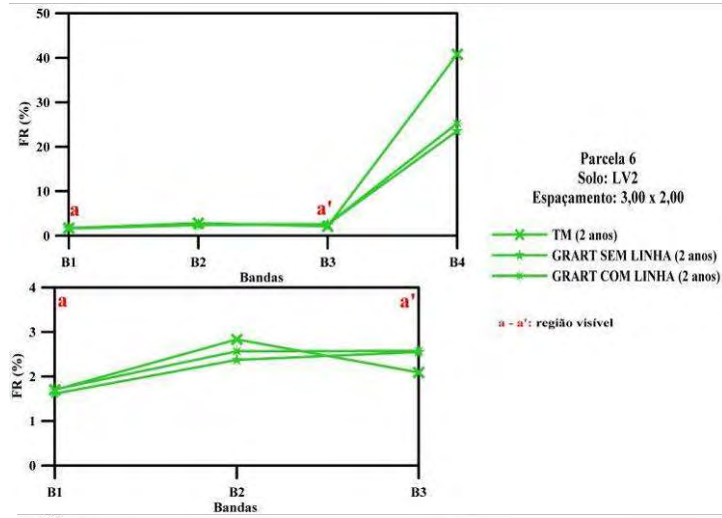


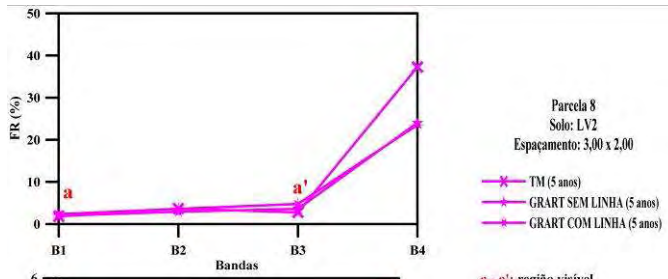
Data 24.05.2009



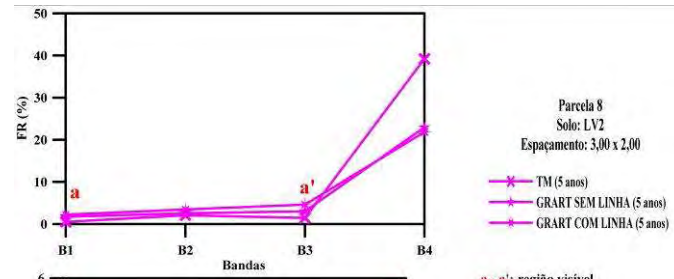
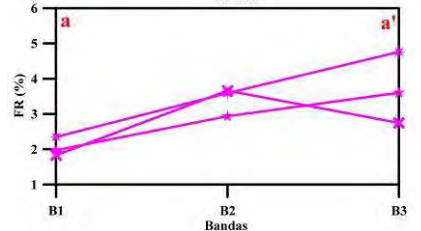




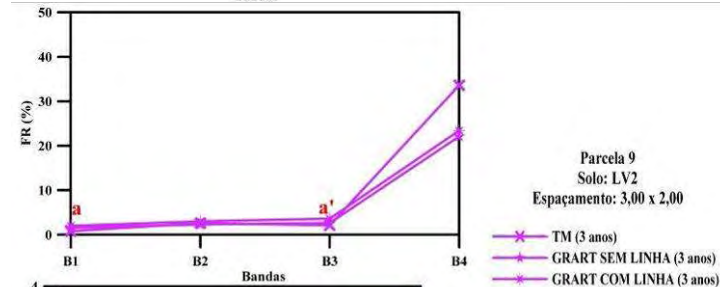
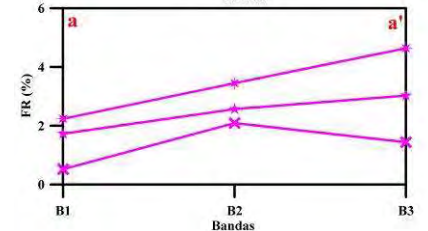




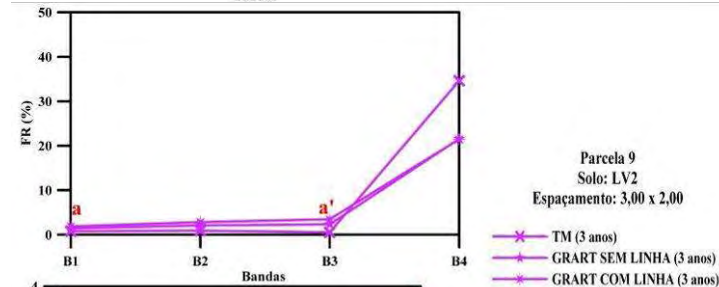
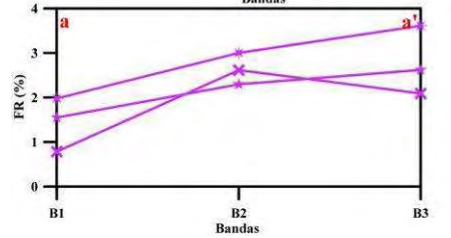
a - a': região visível



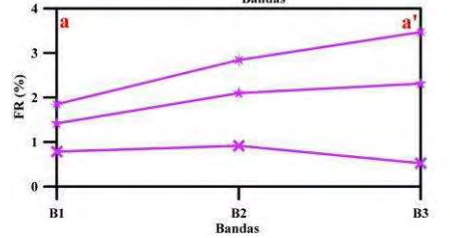
a - a': região visível

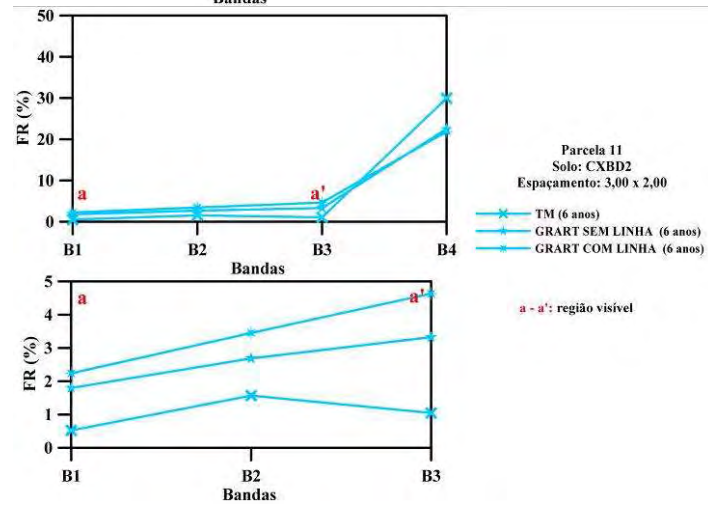
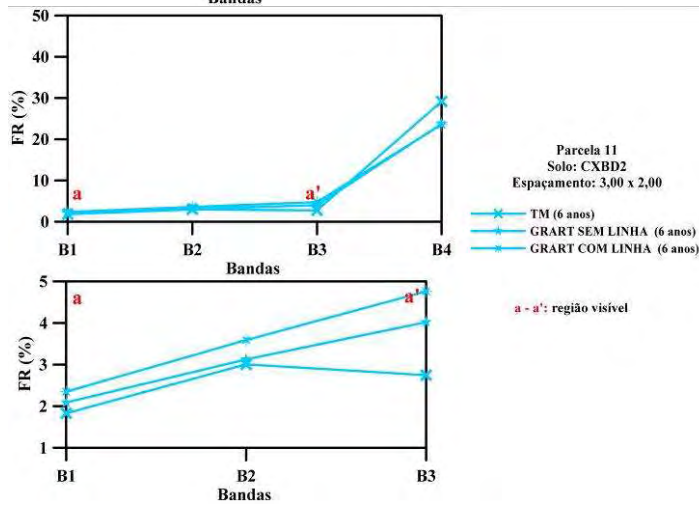
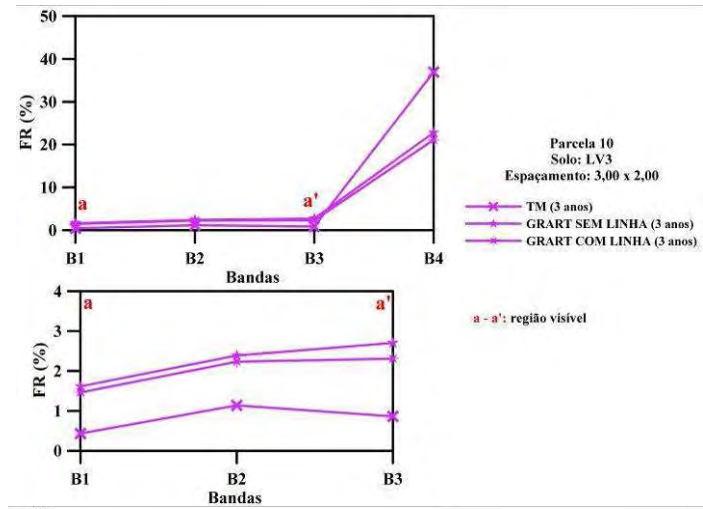
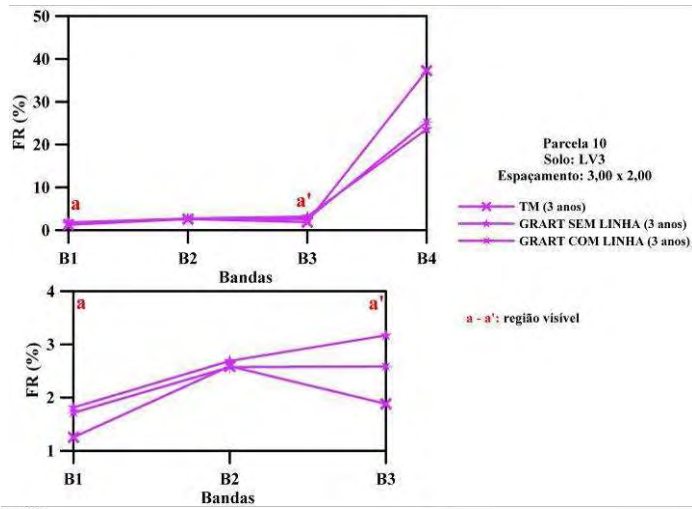


a - a': região visível

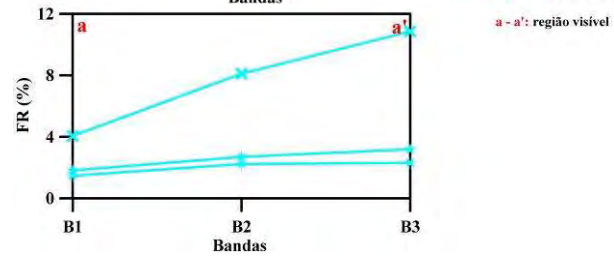
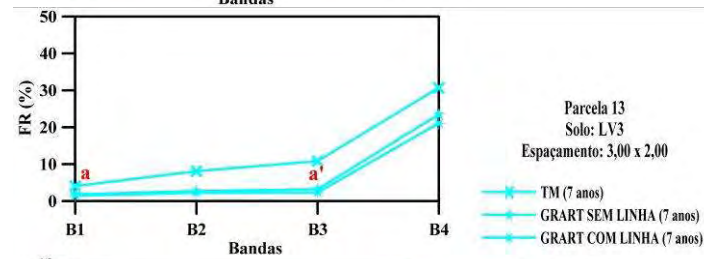
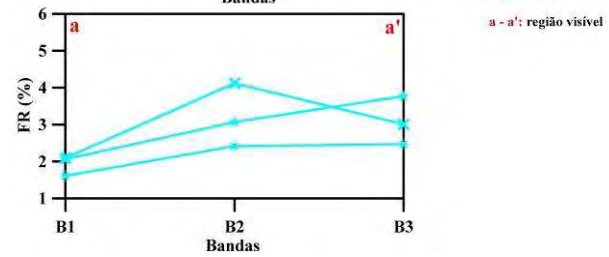
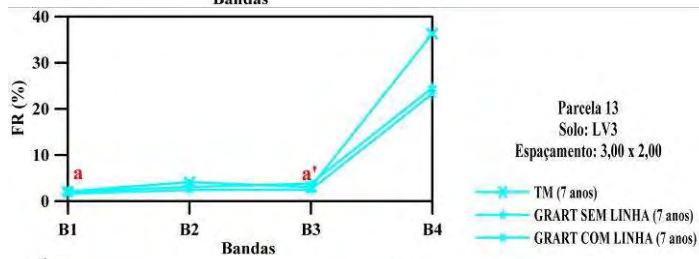
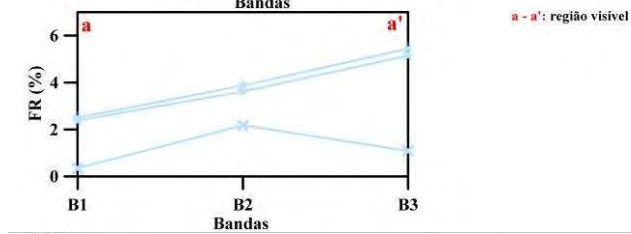
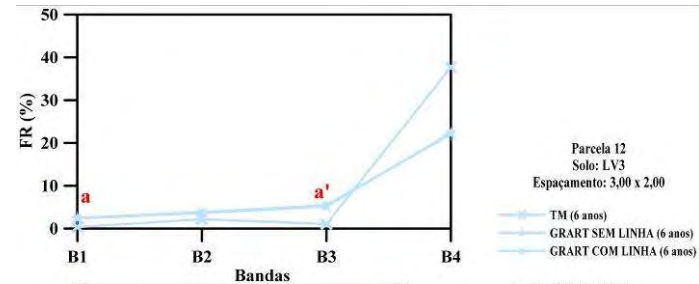
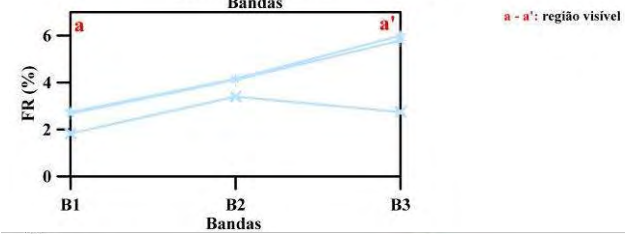
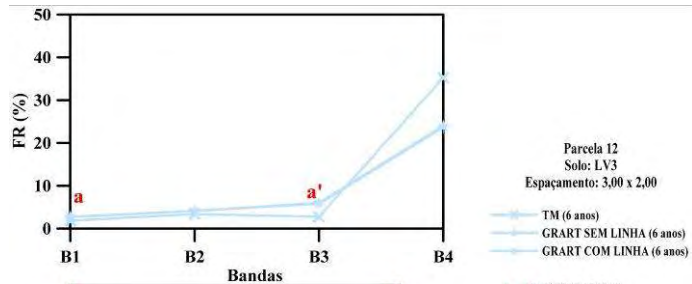


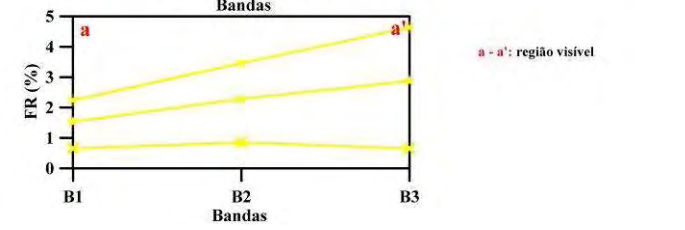
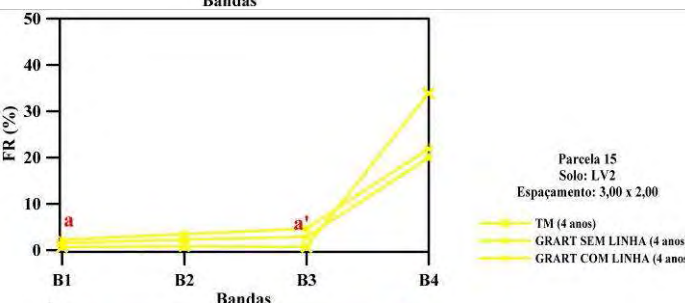
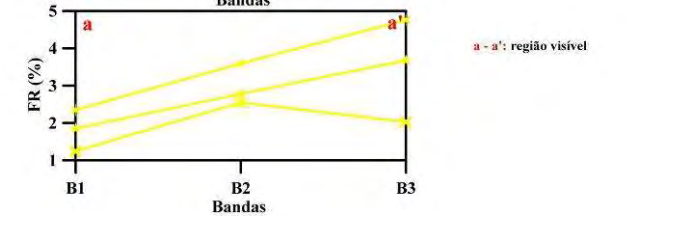
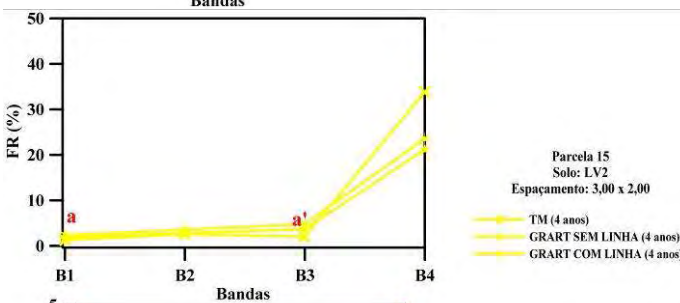
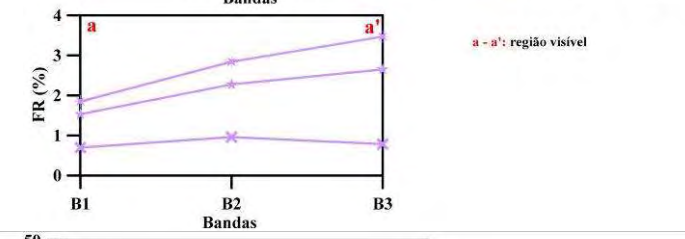
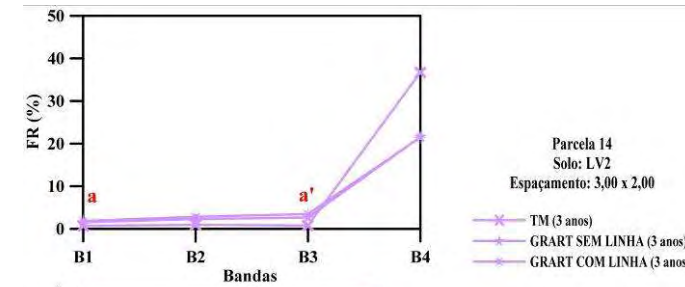
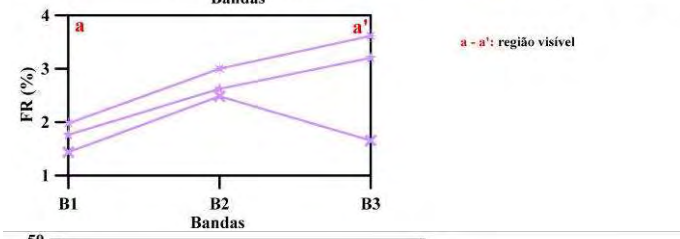
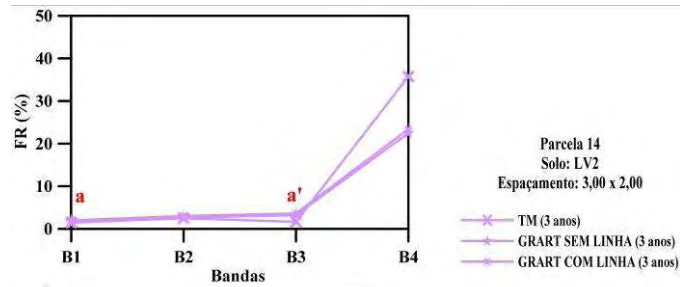
a - a': região visível

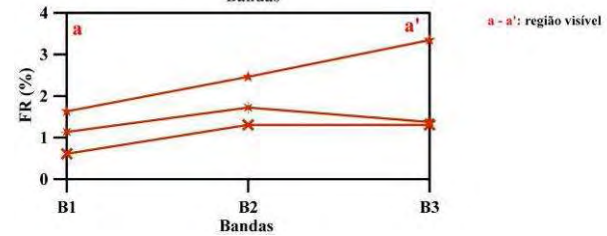
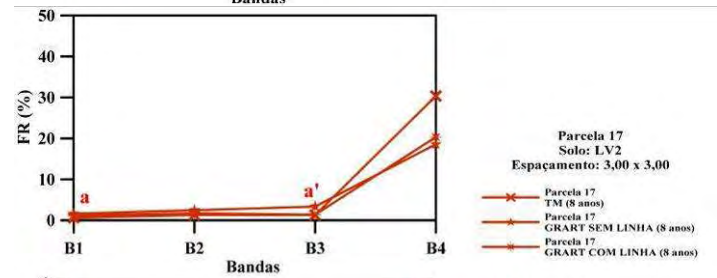
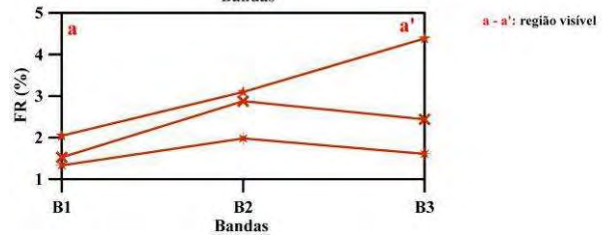
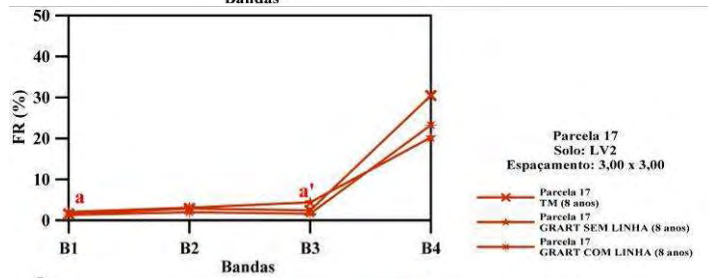
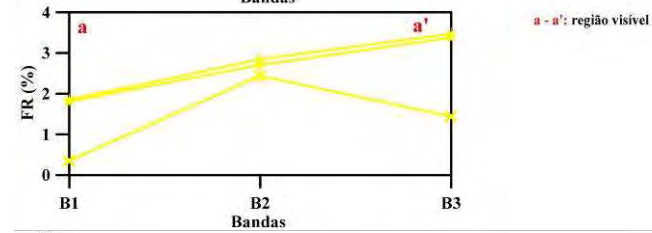
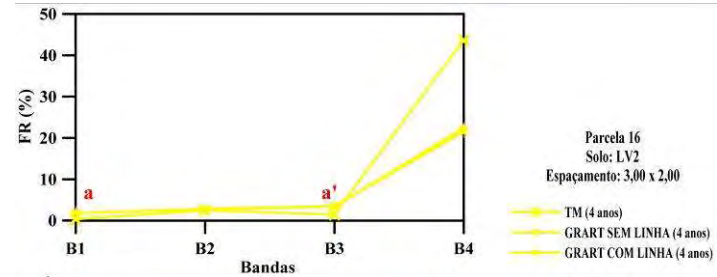
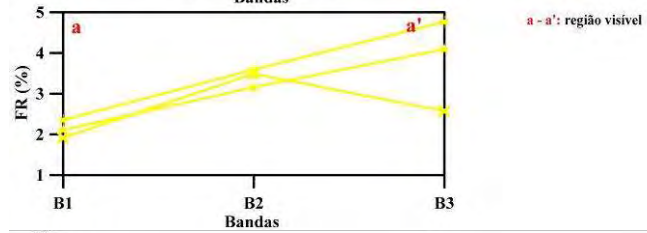
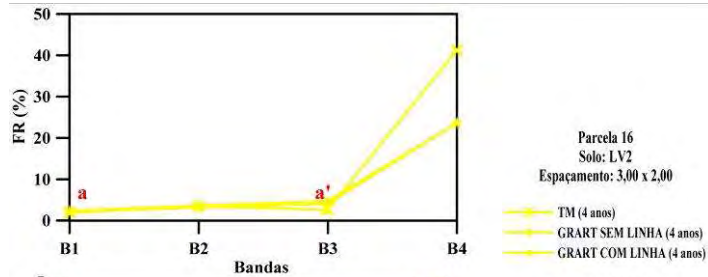


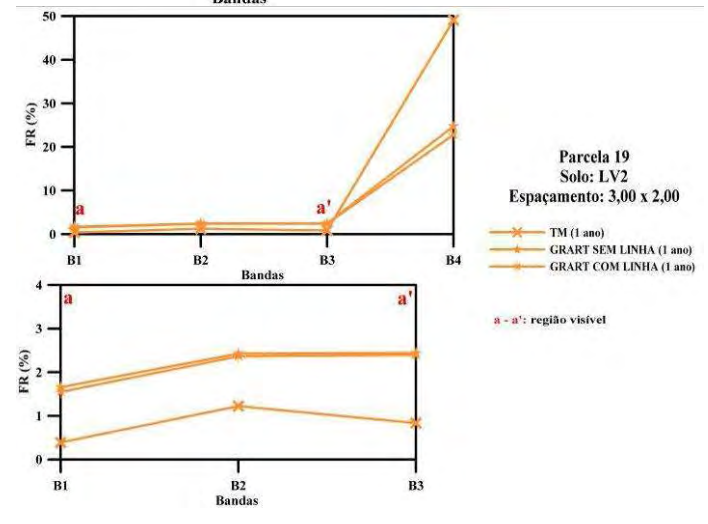
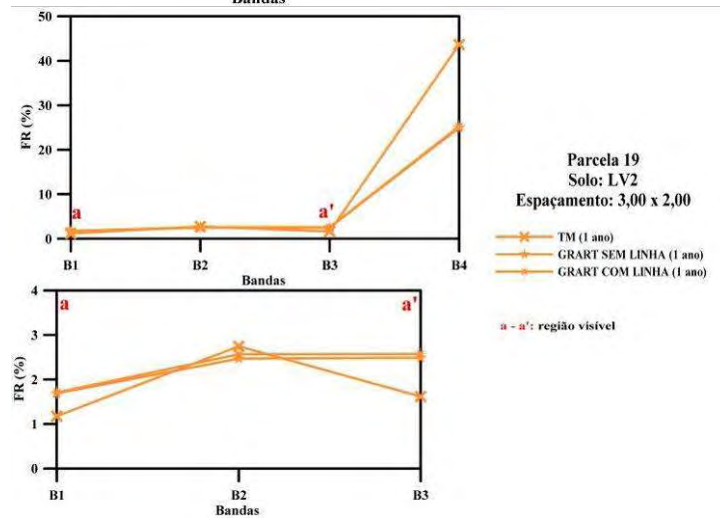
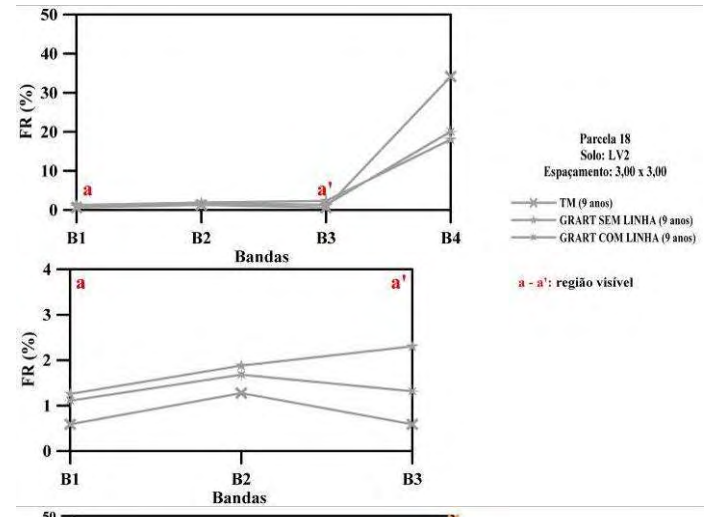
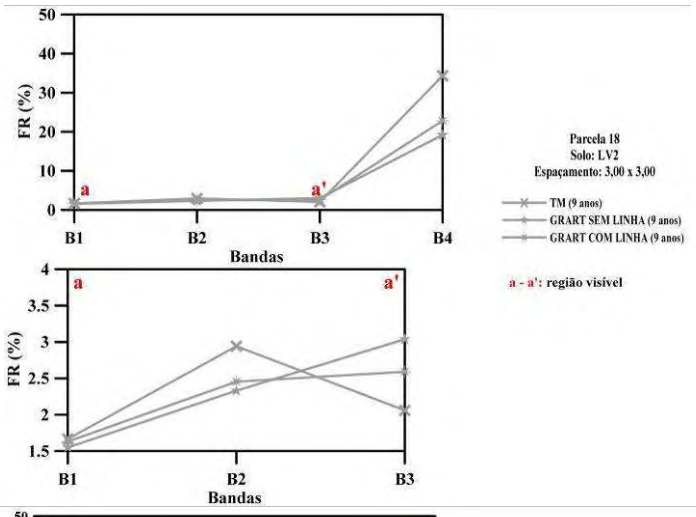


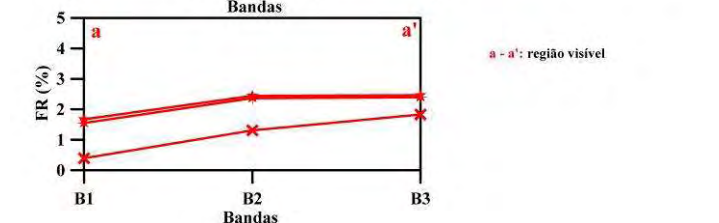
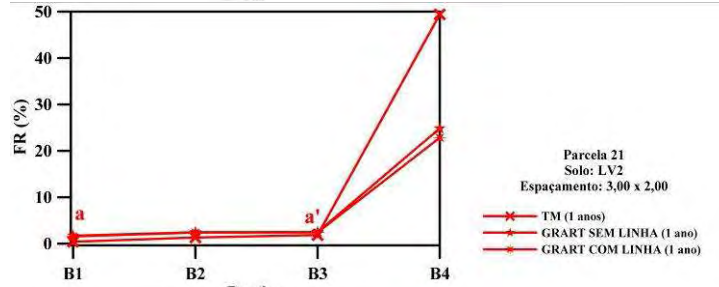
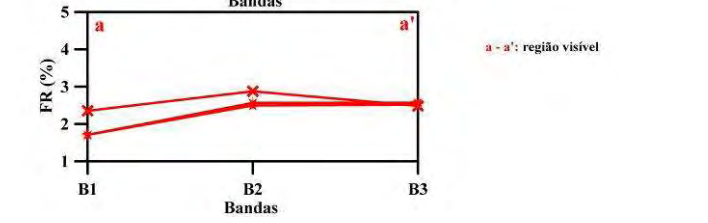
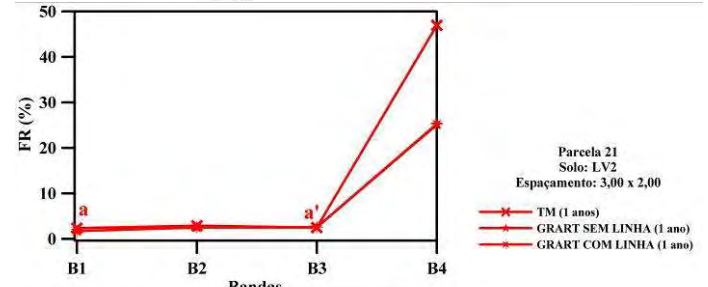
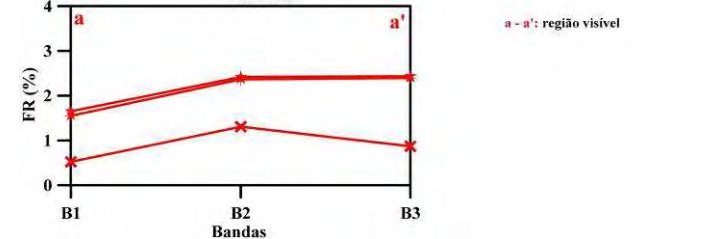
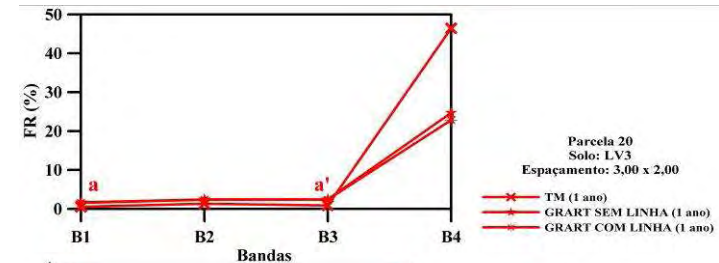
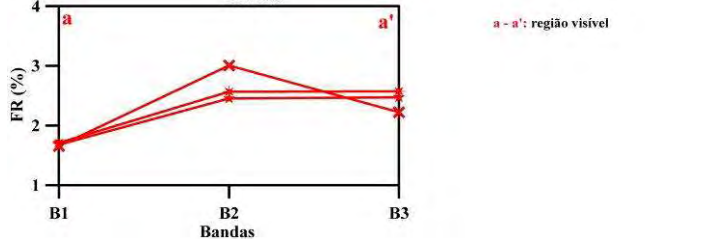
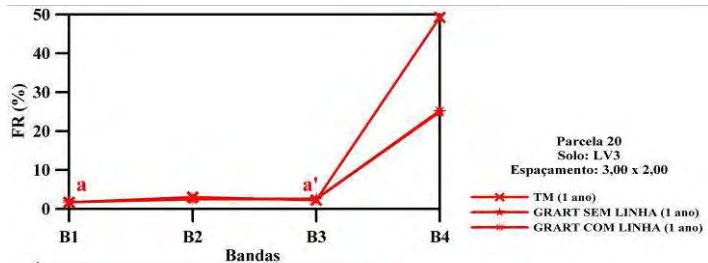


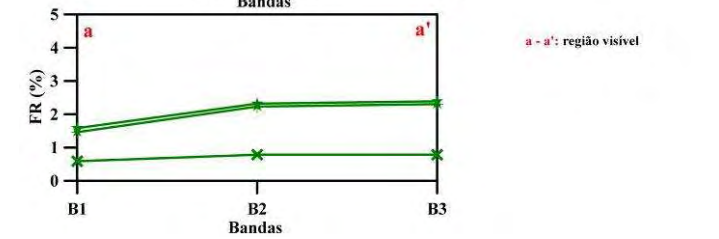
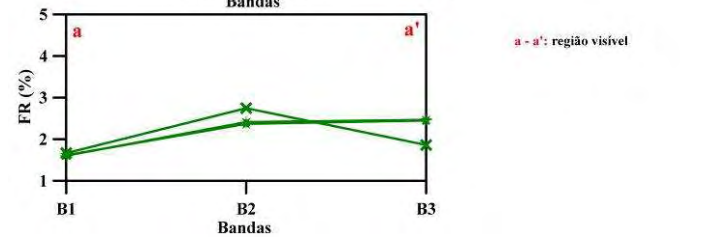
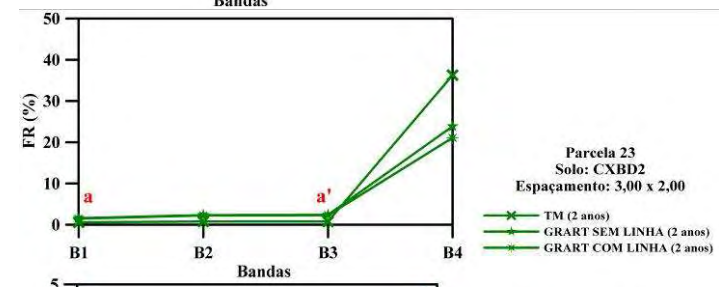
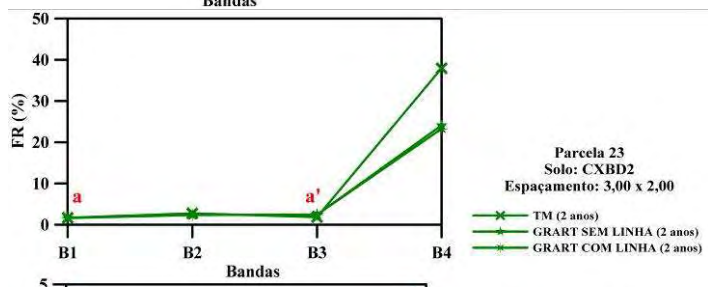
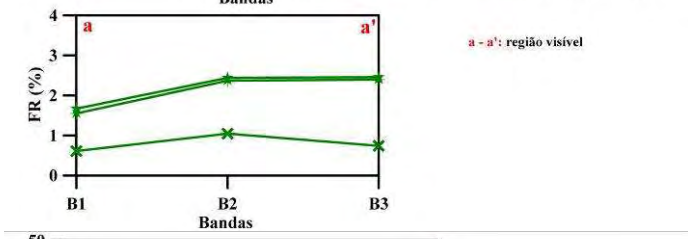
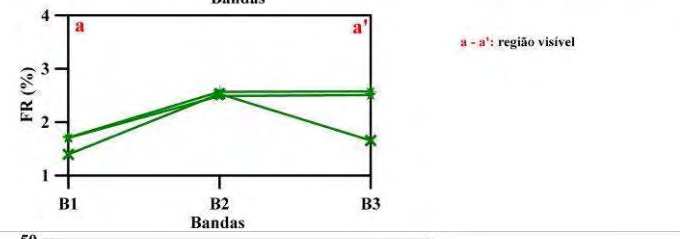
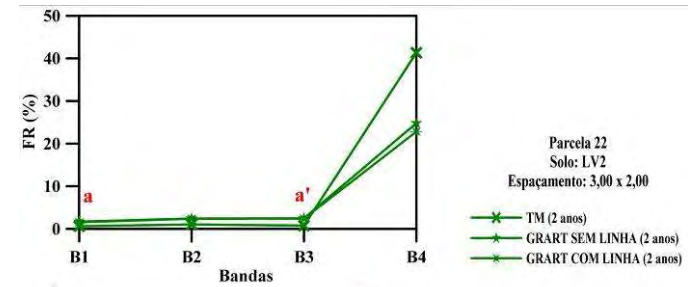
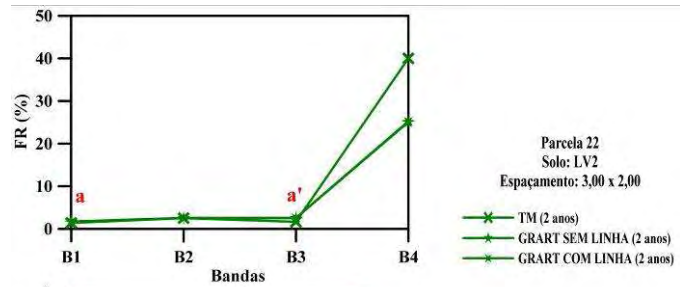


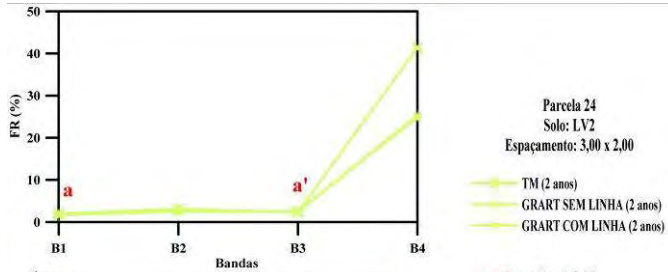






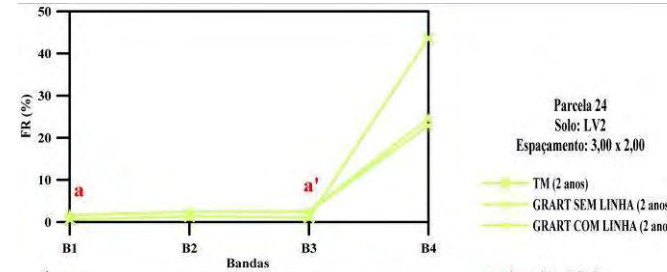
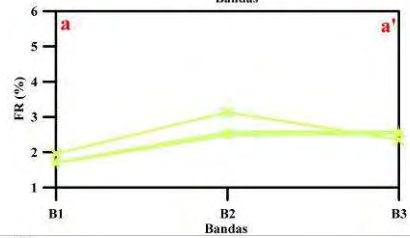






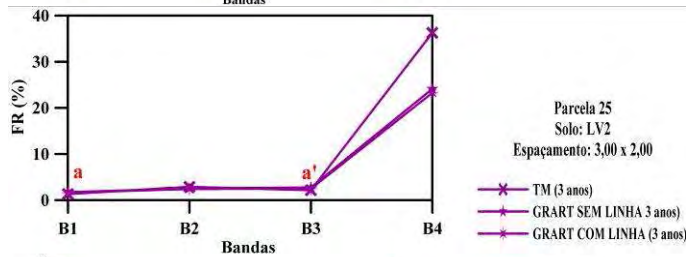
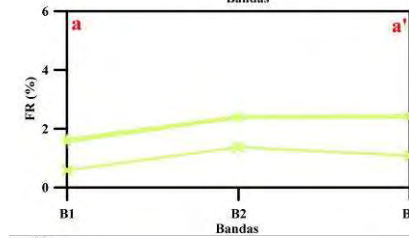
TM (2 anos)  
GRART SEM LINHA (2 anos)  
GRART COM LINHA (2 anos)

a - a': região visível



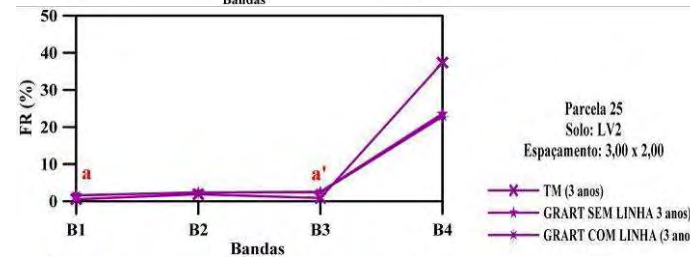
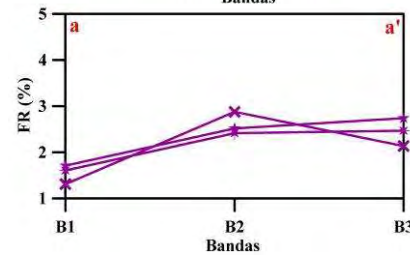
TM (2 anos)  
GRART SEM LINHA (2 anos)  
GRART COM LINHA (2 anos)

a - a': região visível



TM (3 anos)  
GRART SEM LINHA (3 anos)  
GRART COM LINHA (3 anos)

a - a': região visível



TM (3 anos)  
GRART SEM LINHA (3 anos)  
GRART COM LINHA (3 anos)

a - a': região visível

