

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO  
E METEOROLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E  
METEOROLOGIA

Elias Fernando Berra

**AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DE  
IMAGENS LISS-III/RESOURCESAT-1 E  
TM/LANDSAT 5 PARA ESTIMAR VOLUME  
DE MADEIRA DE UM PLANTIO DE PINUS  
ELLIOTTII**

Porto Alegre, abril de 2013

Elias Fernando Berra

AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DE IMAGENS LISS-III/RESOURCESAT-1 E  
TM/LANDSAT 5 PARA ESTIMAR VOLUME DE MADEIRA DE UM PLANTIO DE  
PINUS ELLIOTTII

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito para obtenção do grau de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Linha de pesquisa: Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento

Orientadora: Profa. Dra. Denise Cybis Fontana  
Coorientadora: Dra. Tatiana Mora Kuplich

Porto Alegre, abril de 2013

Elias Fernando Berra

**AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DE IMAGENS LISS-III/RESOURCESAT-1 E  
TM/LANDSAT 5 PARA ESTIMAR VOLUME DE MADEIRA DE UM PLANTIO DE  
PINUS ELLIOTTII**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito para obtenção do grau de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Aprovada em 11 de abril de 2013.

---

Profa. Dra. Denise Cybis Fontana – Orientadora

---

Dra. Tatiana Mora Kuplich - Coorientadora

---

Prof. Dr. Elódio Sebem – Universidade Federal de Santa Maria

---

Profa. Dra. Dejanira Luderitz Saldanha – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Laurindo Antônio Guasselli - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## **UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**Reitor:** Carlos Alexandre Netto  
**Vice-Reitor:** Rui Vicente Oppermann

### **INSTITUTO DE GEOCÊNCIAS**

**Diretor:** André Sampaio Mexias  
**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Berra, Elias Fernando

Avaliação e comparação de imagens Liss-III/Ressourcesat-1 e TM/Landsat 5 para estimar volume de madeira de um plantio de pinus ElliottII. / Elias Fernando Berra. - Porto Alegre : IGEO/UFRGS, 2013.  
[127f.] il.

Dissertação (Mestrado). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Porto Alegre, RS - BR, 2013.

Orientador: Denise Cybis Fontana  
Co-orientador: Tatiana Mora Kuplich

1. Reflectância. 2. Índice de vegetação. 3. Inventário florestal.  
4. Sensoriamento remoto. I. Título.

---

Catálogo na Publicação  
Biblioteca Geociências - UFRGS  
Miriam Alves CRB 10/1947

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM), pela possibilidade de cursar uma Pós Graduação gratuita e de qualidade. Em especial às pessoas que trabalham no CEPSRM.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela oportunidade de Bolsa de mestrado.

Aos professores e colegas do curso de pós-graduação em Sensoriamento Remoto, do Laboratório de Estudos Agrícolas e Ambientais (LEAA), e em especial às orientadoras, Denise Cybis Fontana, e Tatiana Mora Kuplich, pelo apoio e ensinamentos.

À empresa TREFLOR pela oportunidade de desenvolver esta dissertação tendo como área de estudo seus plantios. E, em especial ao Engenheiro Florestal Luiz Rafael Delgado Barcelos, pela ajuda e esclarecimentos.

À família e a namorada, os quais sempre acreditaram e apoiaram na conclusão de mais etapa acadêmica.

Enfim, a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a obtenção deste Título.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estimar o volume de madeira de um povoamento jovem de *Pinus elliottii*, localizado no litoral sudeste do Rio Grande do Sul, com imagens dos sensores LISS-III/ResourceSat-1 e TM/Landsat 5, comparando o desempenho destes para tal. Obtiveram-se imagens de setembro de 2010, mês coincidente com o inventário florestal feito na área de estudo. Os valores de reflectância espectral de superfície foram recuperados das imagens originais. Após o georreferenciamento, dos pixels coincidentes com a localização das unidades amostrais do inventário florestal foram extraídos os valores das reflectâncias nas quatro bandas espectrais equivalentes aos dois sensores, cujas respostas foram comparadas. Além das bandas espectrais foram utilizados os índices de vegetação (IV's) SR, NDVI, SAVI, MVI e GNDVI. Também, foi proposto o ajuste destes IV's originais pela idade do povoamento, os quais foram identificados por SR<sub>i</sub>, NDVI<sub>i</sub>, MVI<sub>i</sub> e GNDVI<sub>i</sub>. A aplicação do logaritmo nas bandas espectrais melhorou os valores dos coeficientes de correlação linear (r), à exceção do IVP, retornando valores entre 0,69 (IVP) a 0,83 (Verde) para o LISS-III e entre 0,68 (Vermelho) a 0,79 (IVM) para o TM; Com os IV's o logaritmo melhorou os valores de r somente para os IV's originais, retornando valores de r entre 0,77 (NDVI) a 0,84 (GNDVI) com o LISS-III e entre 0,73 (NDVI) a 0,82 (MVI) para o TM. Com os IV's ajustados pela idade do povoamento a logaritimização não se mostrou necessária para melhorar a associação linear, retornando valores de r entre 0,79 (NDVI<sub>i</sub>) a 0,82 (MVI<sub>i</sub>) com o LISS-III e entre 0,74 (SR<sub>i</sub>) a 0,80 (MVI<sub>i</sub>) com o TM. Além disso, o ajuste pela idade aumentou o intervalo dinâmico dos IV's ajustados, e, aparentemente, aumentou a sensibilidade nos povoamentos de maior volume. Diferenças significativas na associação linear entre os dados espectrais do TM e LISS-III com o volume só foram encontradas na banda equivalente do verde. Com dados TM, a equação melhor ajustada explicou 68% da variabilidade do volume; com dados LISS-III a equação explicou 72% da variabilidade. Estas equações geraram dois mapas de volume de madeira, onde as médias das estimativas obtidas com LISS-III estiveram dentro do intervalo de confiança da média do inventário florestal em 70% dos talhões considerados; para o TM a coincidência foi de 65% dos talhões. Conclui-se que os sensores LISS-III e TM apresentam alta similaridade e que a metodologia empregada pode ser utilizada para auxiliar no inventário florestal dos povoamentos jovens de *P. elliottii* na área de estudo principalmente pelo fato das estimativas obtidas pelas imagens cobrirem todo o talhão, ao passo que a amostragem do inventário florestal contempla menos de 2% da área.

**Palavras-chave:** Reflectância. Índice de vegetação. Inventário florestal.

## ABSTRACT

The aim of this work was to estimate the wood volume of a young stand of *Pinus elliottii*, located on the southeastern coast of the state of Rio Grande do Sul, by imagery from LISS-III/ResourceSat-1 and TM/Landsat 5 sensors, comparing their performance for such. Images were obtained on September 2010, the month coincident with the forest inventory made in the study area. The surface spectral reflectance values were retrieved from the original images. After the georeferencing, the sampling units location from the forest inventory were used to select the pixels to extract the reflectance values on the four spectral bands equivalents for the two sensors, which answers were compared. In addition to the bands were used the Vegetation Indices (VI's) SR, NDVI, SAVI, MVI and GNDVI. Also proposed was the adjusting of these original VI's by the stand age, which ones were identified by SR<sub>i</sub>, NDVI<sub>i</sub>, MVI<sub>i</sub> and GNDVI<sub>i</sub>. The application of logarithm in the spectral bands improved the r values, with exception to NIR, achieving values between 0.69 (NIR) and 0.83 (Green) for LISS-III and between 0.68 (Red) and 0.79 (SWIR) for TM; With the VI's, the logarithm improved the r values only for the original VI's, returning r values from 0.77 (NDVI) to 0.84 (GNDVI) with LISS-III and r values from 0.73 (NDVI) to 0.82 (MVI) for TM. With the VI's adjusted by stand age the logarithm was not necessary to improve the linear association, returning r values from 0.79 (NDVI<sub>i</sub>) to 0.82 (MVI<sub>i</sub>) with LISS-III and r values from 0.74 (SR<sub>i</sub>) to 0.80 (MVI<sub>i</sub>) with TM. Moreover, adjusting by age increased the dynamic range of the VI's adjusted, and apparently increased the sensitivity in stands with larger volume. Significant differences in the linear association between TM and LISS-III spectral data with volume were just found on the green equivalent band. With TM data, the best fitted model explained 68% of the volume variability; with LISS-III data the model explained 72% of the variability. These models generated two wood volume maps, where the average of the estimates achieved with LISS-III were within the confidence level of the average from the forest inventory on 70% of the compartments considered; for TM the coincidence was on 65% of the compartments. It is conclude that the sensors LISS-III and TM presented high similarity and the methodology applied can be used to aid in forest inventory of young stands of *P. elliottii* in the study area mainly because the estimates obtained by the images cover the entire compartment, while the forest inventory sampling contemplates less than 2% of the area.

**Key-words:** Reflectance. Vegetation Index. Forest inventory.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Distribuição geográfica natural do <i>Pinus elliottii</i> Engelm. nos Estados Unidos da América. ....	19
<b>Figura 2</b> - Distribuição da área de plantios florestais no Brasil por gênero, 2011. ....	21
<b>Figura 3</b> - Histórico da área de plantios florestais de Pinus no Brasil, 2005-2011. Fonte: ABRAF (2012).....	21
<b>Figura 4</b> - Distribuição de área de plantios florestais com Pinus das associadas individuais da ABRAF por segmento industrial, 2011. Fonte: ABRAF (2012) .....	22
<b>Figura 5</b> - Reflectância espectral característica da folha vegetal verde sadia, para o intervalo de comprimento de onda entre 0,4 e 2,6 $\mu\text{m}$ . Fonte: Jensen (2009) .....	23
<b>Figura 6</b> - Fluxograma da metodologia a ser utilizada. ....	42
<b>Figura 7</b> - Mapa de localização da área de estudo.....	43
<b>Figura 8</b> - Fotografia aérea da área de estudo, sentido leste-oeste. ....	45
<b>Figura 9</b> - Talhões de <i>Pinus elliottii</i> inventariados com idades entre 5 a 8 anos. ....	46
<b>Figura 10</b> - Croqui da disposição das unidades amostrais (U.A.) em um talhão simulado de 18 ha. ....	47
<b>Figura 11</b> - Imagem de um dos talhões inventariados quando o mesmo possuía em torno de um ano de idade.....	49
<b>Figura 12</b> - Distribuição das alturas dominantes (h100) observadas em amostras temporárias do inventário florestal (U.A. inventariadas) e estimadas pela análise de tronco de 5 árvores. Onde h100 refere-se a altura das 100 árvores mais grossas por hectare. ....	51
<b>Figura 13</b> – Média da reflectância espectral de superfície de 111 pixels (111 unidades amostrais) em povoamento de <i>Pinus elliottii</i> nas quatro bandas espectrais equivalentes dos sensores LISS-III e TM. ....	63
<b>Figura 14</b> - Comparação das reflectâncias entre as bandas equivalentes nos sensores TM e LISS-III: a) Banda do verde, b) Banda do vermelho, c) diferença percentual referente a banda do verde e, d) diferença percentual referente a banda do vermelho. ....	64
<b>Figura 15</b> - Comparação das reflectâncias entre as bandas equivalentes nos sensores TM e LISS III: a) Banda do infravermelho próximo (IVP), b) Banda do infravermelho médio	

(IVM), c) diferença percentual referente a banda do IVP e, d) diferença percentual referente a banda do IVM.....	66
<b>Figura 16</b> – Porção da imagem LISS-III (a) e da imagem TM (b) ilustrando as diferenças entre as dimensões do pixel LISS-III, em azul, e as dimensões do pixel TM, em amarelo. ....	68
<b>Figura 17</b> – Precipitação pluvial diária em duas estações de monitoramento ao sul do município de Rio Grande, RS.....	70
<b>Figura 18</b> - Matriz de dispersão entre as variáveis biofísicas de um povoamento de <i>Pinus elliottii</i> , destacados pela idade. ....	72
<b>Figura 19</b> - Gráficos de dispersão entre as reflectâncias espectrais e o volume de madeira para os sensores TM e LISS-III.....	75
<b>Figura 20</b> - Correlação linear de Pearson (r) entre o logaritmo natural (Ln) do volume de madeira (Vol.) e o logaritmo natural das bandas espectrais. ....	79
<b>Figura 21</b> - Gráficos de dispersão entre o NDVI, SAVI <sub>L=0,5</sub> , NDVI <sub>i</sub> e o volume de madeira para os sensores TM e LISS-III.....	82
<b>Figura 22</b> - Gráficos de dispersão entre volume de madeira e o índices SR e SR <sub>i</sub> para os sensores TM e LISS-III. ....	84
<b>Figura 23</b> - Gráficos de dispersão entre o volume de madeira e os índices MVI e MVI <sub>i</sub> para os sensores TM e LISS-III.....	85
<b>Figura 24</b> - Gráficos de dispersão entre o volume de madeira e os índices GNDVI e GNDVI <sub>i</sub> para os sensores TM e LISS III. ....	86
<b>Figura 25</b> - Correlação entre os índices de vegetação com volume de madeira de <i>P. elliottii</i> . ....	88
<b>Figura 26</b> - Melhores resultados de correlação entre volume de madeira de <i>Pinus elliottii</i> e os índices de vegetação. ....	89
<b>Figura 27</b> - Distribuição dos resíduos de modelos estimadores de volume de madeira em povoamentos de <i>Pinus elliottii</i> utilizando as bandas espectrais do sensor LISS-III (a) e do sensor TM (b) como variáveis independentes. ....	93
<b>Figura 28</b> - Distribuição dos resíduos dos modelos estimadores de volume de madeira em povoamentos de <i>Pinus elliottii</i> utilizando como variáveis independentes os IV's do sensor LISS-III (a) e do sensor TM (b). ....	96
<b>Figura 29</b> - Mapa da estimativa de volume de madeira de <i>Pinus elliottii</i> utilizando as bandas espectrais do TM/Landsat 5. A numeração identifica os talhões. ....	101

<b>Figura 30</b> - Mapa da estimativa de volume de madeira (V) de <i>Pinus elliottii</i> utilizando as bandas espectrais do LISS-III/ResourceSat-1. A numeração identifica os talhões. ....	102
<b>Figura 31</b> - Mapa comparativo das estimativas de volume de madeira de <i>Pinus elliottii</i> , ao norte da área de estudo, gerado com as bandas espectrais dos sensores TM e LISS-III. A numeração identifica os talhões. ....	103
<b>Figura 32</b> - Mapa da estimativa de volume de madeira de <i>Pinus elliottii</i> utilizando índice de vegetação do TM/Landsat 5. A numeração identifica os talhões. ....	104
<b>Figura 33</b> - Mapa da estimativa de volume de madeira (V) de <i>Pinus elliottii</i> utilizando índice de vegetação do LISS-III/ResourceSat-1. A numeração identifica os talhões. ....	105
<b>Figura 34</b> – Mapa comparativo das estimativas de volume de madeira de <i>Pinus elliottii</i> , ao norte da área de estudo, gerado com índices de vegetação dos sensores TM e LISS-III. A numeração identifica os talhões. ....	106
<b>Figura 35</b> – Comparação do volume de madeira estimado, a nível de pixel, pelos sensores TM e LISS-III: a) utilizando bandas espectrais, b) utilizando índices de vegetação, c) diferença percentual com as bandas espectrais, d) diferença percentual com os índices de vegetação. ....	107

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Características do sensor TM a bordo do satélite Landsat 5 e do sensor LISS-III a bordo do satélite ResourceSat-1. ....	41
<b>Tabela 2</b> - Exemplo de um talhão inventariado com alta variabilidade (coeficiente de variação de 51%) (Projeto 4 – Talhão 8). ....	50
<b>Tabela 3</b> - Estimativa do volume de madeira de <i>Pinus elliottii</i> colhido por hectare na TREFLOR, Rio Grande, RS. ....	52
<b>Tabela 4</b> - Parâmetros de calibração radiométrica do sensor TM/Landsat 5 e LISS-III/ResourceSat-1 com os intervalos espectrais, radiância mínima ( $L_{\min\lambda}$ ) e máxima ( $L_{\max\lambda}$ ) e irradiância solar exoatmosférica média ( $ESUN_{\lambda}$ ). ....	53
<b>Tabela 5</b> - Índices de Vegetação testados. ....	56
Tabela 6 - Estatísticas descritivas da reflectância espectral de superfície das bandas equivalentes dos sensores LISS-III e TM de 111 pixels de um povoamento de <i>Pinus elliottii</i> . ....	62
<b>Tabela 7</b> - ANOVA's aplicadas às bandas espectrais 2 e 3 do TM e LISS-III. ....	65
<b>Tabela 8</b> - ANOVA's aplicadas às bandas espectrais 4 e 5 do TM e LISS-III. ....	66
<b>Tabela 9</b> - Análise descritiva das variáveis biofísicas de povoamentos de <i>Pinus elliottii</i> . ....	71
<b>Tabela 10</b> - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as variáveis florestais. ....	72
<b>Tabela 11</b> - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre o volume de madeira (Vol.) de <i>Pinus elliottii</i> e as bandas espectrais dos sensores TM e LISS-III. ....	78
<b>Tabela 12</b> - Análise da significância das diferenças entre os coeficientes de correlação linear de Pearson entre as bandas espectrais equivalentes dos sensores TM e LISS-III. ....	80
<b>Tabela 13</b> - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre o volume de madeira (Vol.) e os índices de vegetação dos sensores TM e LISS-III. ....	87
<b>Tabela 14</b> - Análise da significância das diferenças entre os coeficientes de correlação linear de Pearson dos índices de vegetação ajustados pelo logaritmo ( $\ln$ ) e dos ajustados pela idade ( $i$ ). ....	90
<b>Tabela 15</b> - Equações testadas para estimar volume de madeira (V) utilizando as bandas espectrais como variáveis independentes. ....	91
<b>Tabela 16</b> - Equações testadas para estimar volume de madeira (V) utilizando os índices de vegetação como variáveis independentes. ....	94
<b>Tabela 17</b> - Equações selecionadas para estimar volume de madeira (V) de <i>Pinus elliottii</i> . ..	99

<b>Tabela 18</b> - ANOVA's aplicadas aos volumes de madeira estimados com as bandas espectrais (Bandas) e com os índices de vegetação (IV's) dos sensores TM/Landsat 5 e LISS-III/ResourceSat-1.....	107
<b>Tabela 19</b> - Volume de madeira de <i>Pinus elliottii</i> estimado pelo inventário florestal, e pelas bandas dos sensores LISS-III/ResourceSat-1 e TM/Landsat 5 (Os talhões cujos valores dos volumes médios estimados pelas imagens de satélite estão localizados dentro do IC são destacados pela cor cinza). .....	109
<b>Tabela 20</b> - Volume de madeira de <i>Pinus elliottii</i> estimado pelo inventário florestal, e pelos índices de vegetação dos sensores LISS-III/ResourceSat-1 e TM/Landsat 5 (Os talhões cujos valores dos volumes médios estimados pelas imagens de satélite estão localizados dentro do IC são destacados pela cor cinza). .....	110

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 A silvicultura brasileira e o <i>Pinus elliottii</i> .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 Sensoriamento remoto e a vegetação .....</b>	<b>22</b>
2.2.1 Interação da energia eletromagnética com as folhas .....	22
2.2.2 Interação da energia eletromagnética com o dossel florestal .....	24
2.2.3 Índices de Vegetação .....	27
<b>2.3 Uso de técnicas de sensoriamento remoto em povoamentos florestais .....</b>	<b>29</b>
<b>2.4 Tratamento de imagens de satélite.....</b>	<b>35</b>
2.4.1 Correções radiométricas e atmosféricas .....	35
2.4.1.1 Conversão radiométrica .....	35
2.4.1.2 Correção atmosférica .....	37
2.4.2 Correção geométrica.....	38
<b>2.5 Visão geral dos sensores LISS-III/ResourceSat-1 e TM/Landsat 5 .....</b>	<b>39</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
<b>3.1 Área de Estudo.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2 Trabalho de Campo.....</b>	<b>45</b>
3.2.1 Determinação do diâmetro das árvores .....	47
3.2.2 Determinação da altura das árvores.....	47
3.2.3 Cálculo do inventário florestal .....	48
<b>3.3 Algumas características do povoamento inventariado.....</b>	<b>48</b>
<b>3.4 Medidas encontradas nos plantios de <i>Pinus elliottii</i> adultos.....</b>	<b>50</b>
<b>3.5 Imagens de Satélite .....</b>	<b>52</b>
3.5.1 Conversão de nível digital para radiância espectral incidente ao sensor.....	52
3.5.2 Conversão de radiância espectral incidente ao sensor para reflectância de superfície	53
3.5.3 Correção geométrica.....	54
3.5.4 Bandas espectrais e índices de vegetação.....	55
<b>3.6 Avaliação e comparação dos sensores LISS-III/ResourceSat-1 e TM/Landsat 5.....</b>	<b>57</b>
<b>3.7 Análise da relação entre variáveis biofísicas e variáveis espectrais.....</b>	<b>57</b>
<b>3.8 Análise de regressão .....</b>	<b>59</b>
<b>3.9 Mapas de volume de madeira .....</b>	<b>61</b>
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>62</b>

<b>4.1 Avaliação e comparação das reflectâncias recuperadas dos sensores LISS-III/ResourceSat-1 e TM/Landsat 5 .....</b>	<b>62</b>
<b>4.2 Relação entre variáveis biofísicas e variáveis espectrais.....</b>	<b>71</b>
4.2.1 Análise das variáveis biofísicas .....	71
4.2.2 Relação entre o volume de madeira e as bandas espectrais.....	74
4.2.3 Relação entre o volume de madeira e os índices de vegetação .....	81
<b>4.3 Análise de regressão .....</b>	<b>91</b>
<b>4.4 Mapeamento do volume de madeira .....</b>	<b>99</b>
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>111</b>
<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>115</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Historicamente, no mundo todo, a produção de madeira através de florestas plantadas tem substituído a de florestas naturais. No Brasil ocorre fenômeno semelhante, principalmente no Rio Grande do Sul (RS) onde as florestas naturais foram exploradas até próximo da completa exaustão (FLORIANO, 2004).

As florestas plantadas destacam-se por representar a principal fonte de suprimento de madeira das cadeias produtivas de importantes segmentos industriais como os de celulose e papel, painéis reconstituídos, móveis, siderurgia a carvão vegetal, energia e produtos de madeira sólida (CÂMARA SETORIAL DE SILVICULTURA, 2009). Para a economia brasileira e para a sociedade em geral, o setor florestal contribui com uma parcela importante da geração de produtos, tributos, divisas, empregos e renda (ABRAF, 2011).

A espécie *Pinus elliottii* Engelm., dentre as do gênero, tem sido uma das mais utilizadas em plantios comerciais no Brasil, principalmente na produção de madeira serrada para movelaria e construção civil. *P. elliottii* é utilizado também na produção de celulose de fibra longa, usada para fabricação de embalagens, na produção de chapas de fibras de madeira e na de resina, da qual se extrai a terebintina (FLORIANO, 2004).

Segundo Buainain e Batalha (2007), a indústria de base florestal deve seguir uma tendência de crescimento nos próximos anos. Somente no RS a empresa Celulose Riograndense confirmou investimentos de 2,9 bilhões de dólares até 2015, o que vai empregar 7 mil trabalhadores (CORREIO DO POVO, 2012).

Assim, é notável a importância do *Pinus*, e das florestas plantadas em geral, para a economia gaúcha e brasileira. E, o sucesso da cadeia produtiva de base florestal depende fortemente de um plantio bem manejado, o qual possa oferecer um produto final de alta qualidade. Para isto, é essencial que se tenham informações do estado da floresta ao longo dos anos.

Isto exige do administrador florestal um monitoramento frequente do desenvolvimento das árvores dentro de uma unidade de produção. Somente assim ele poderá tomar decisões estratégicas para garantir que as árvores alcancem o fim da rotação atendendo aos objetivos estabelecidos (serraria, celulose, energia, etc.). Esse monitoramento é tradicionalmente feito através de dados levantados por amostragem nos inventários florestais.

Contudo, devido ao alto custo destes inventários, essa amostragem geralmente levanta menos de 2% da área florestal ou, muitas vezes, faz com que o administrador florestal tenha

que priorizar quais talhões serão levantados. Esses fatos, resultado do custo-benefício, tendem a criar vazios de informação. Alguns dados de inventário para estes vazios podem potencialmente serem obtidos por sensoriamento remoto (ARDÖ, 1992; TROTTER et al., 1997 ; MÄKELÄ e PEKKARINEN, 2004), o qual oferece um método ágil e econômico para estimar características florestais (MCDONALD et al., 1998).

A avaliação dos recursos florestais através de técnicas de sensoriamento remoto teve início na primeira parte do século vinte com o mapeamento de florestas com o suporte de fotografias aéreas. Desde 1972, com o lançamento do primeiro satélite para monitoramento dos recursos naturais ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*), também conhecido como Landsat 1, vem ocorrendo significantes avanços tecnológicos, os quais têm permitido avaliar os recursos florestais sobre áreas muito maiores através do uso dos sensores orbitais (BOYD e DANSON, 2005).

Muitos exemplos de uso de imagens neste setor são encontrados na literatura, tais como medidas de biomassa (ARDÖ, 1992; WATZLAWICK et al., 2009; MARTINS et al., 2011), porcentagem da cobertura de dossel (SALVADOR e PONS, 1998; CARREIRAS et al., 2006), volume de madeira (FAZAKAS et al., 1999; FERNANDES et al., 2011; BERRA et al., 2012a), diâmetro a altura do peito, altura ou área basal (LINHARES e PONZONI, 2001; ACCIOLY et al., 2002; GHAMRANY et al., 2012) ou índice de área foliar (SPANNER et al., 1990; XAVIER et al., 1998).

Tendo em vista este potencial, e dada a importância de se levantar informações sobre os plantios, justifica-se o interesse em testar a capacidade de imagens de satélite como uma ferramenta de auxílio ao inventário florestal em diferentes sítios, como já comentaram Ripple et al. (1991). Zakaria (2010) comentou que as imagens de satélite são um componente essencial no desenvolvimento de novas ferramentas para o manejo florestal.

Historicamente, imagens dos sensores da série Landsat vêm sendo empregadas nas estimativas de parâmetros biofísicos da vegetação, como demonstrado por diversos autores (KILKKI e PÄIVINEN, 1987; TOMPPO, 1990; TOKOLA et al., 1996; FAZAKAS et al., 1999; TURNER et al., 2004; MÄKELÄ e PEKKARINEN, 2004, TOMPPO et al., 2009; BERRA et al., 2012a). Contudo, a descontinuidade do programa Landsat a partir da interrupção de aquisição de imagens pelo Landsat 5 em 2011 (NASA, 2012a) criou, e vem criando, um vazio de informações na série histórica desta plataforma até que esteja em pleno funcionamento o Landsat 8, previsto para meados de 2013 (NASA, 2012b) e que foi lançado em 11/02/2013.

Em vista disso, surgiu uma demanda por imagens de satélite com características similares as encontradas no Landsat (inclusive na questão da aquisição de forma gratuita). Neste ponto, os satélites da série IRS (*Indian Remote Sensing satellite*) despontam como uma opção.

O sensor LISS-III (*Linear Imaging Self-Scanner III*), a bordo do satélite indiano ResourceSat-1, tem sido considerado o sensor que forneceu a melhor combinação com Landsat 5 em virtude de suas capacidades, características das bandas espectrais e acessibilidade dos dados e, por isso, foi considerado o mais adequado para preencher necessidades imediatas de dados com mínimas complicações (CHANDER e STENSAAS, 2008; ANDERSON et al., 2011).

Além disso, por ser um satélite recente e menos conhecido, comparado ao Landsat, não se tem conhecimento de estudos na área de estimativa de parâmetros biofísicos de florestas com as imagens do sensor LISS-III no Brasil. O que motiva a investigação do potencial destas imagens dentro deste enfoque. Também, dentro de uma perspectiva internacional, busca-se cada vez mais uma integração de dados de diferentes sensores (*cross-sensor integration*), sendo, portanto, muito oportuno a comparação de dois sensores observando o mesmo fenômeno.

A hipótese de pesquisa é que as alterações nas propriedades biofísicas dos plantios florestais devido ao crescimento das árvores alterem a quantidade de radiância espectral incidente nos sensores ópticos orbitais de tal maneira que se possa modelar essa relação. E, considerando sensores com características similares, tais modelos devem apresentar também precisão similar.

Nesse contexto, define-se o objetivo geral: Comparação das imagens dos satélites Landsat 5 e ResourceSat-1 na estimativa do volume de madeira de um povoamento de *Pinus elliottii*.

Como objetivos específicos destacam-se:

- Testar modificações em alguns índices de vegetação considerando a idade do plantio como fator de ajuste;
- Comparar as reflectâncias de superfície recuperadas pelos dois sensores;
- Investigar a relação entre o volume de madeira e os dados espectrais (reflectância espectral e índices de vegetação);
- Propor modelos de regressão linear simples e múltipla tendo como variável dependente o volume de madeira e como independentes as respostas espectrais;

- Gerar mapas de volume de madeira;
- Comparar a precisão estatística entre as estimativas geradas com os modelos ajustados, as geradas pelo inventário florestal clássico e as estimativas já publicadas na literatura científica.



muito agressivas, competindo intensivamente com as plantas ao redor. As sementes espalham-se na paisagem, podendo tornar-se invasora.

O *Pinus elliottii* Engelm. é uma das espécies, entre os *yellow pines*, de mais rápido crescimento e de maior importância comercial no sudeste dos EUA. Comumente plantada para madeira, têm crescido com sucesso em plantios na África, América do Sul e Austrália (NCSU, 2012).

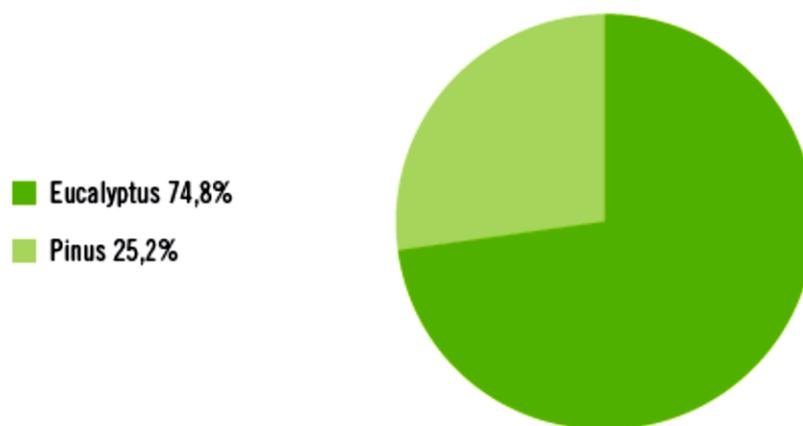
No Brasil a silvicultura foi introduzida no início do século passado, com o estabelecimento dos plantios florestais com espécies exóticas para substituição da extração da madeira das florestas nativas de difícil reposição. As principais espécies exóticas foram os eucaliptos, introduzidos pela Companhia Paulista de Estrada de Ferro em 1904, e as coníferas (*Pinus*), pela Companhia Melhoramentos de São Paulo em 1922 (CÂMARA SETORIAL DE SILVICULTURA, 2009).

A análise do histórico recente do setor florestal evidencia três fases distintas. A primeira fase (1960-1980), responsável pela formação da base florestal, resultou de uma “política estratégica” governamental de concessão de incentivos fiscais para formação de plantios florestais. A segunda fase (1980- 2000) faz referência à profissionalização do setor florestal. Na terceira fase (2000-2010) ocorreu a consolidação do Brasil como um grande *player* internacional do setor de florestas plantadas. Essa fase caracterizou-se pela ampliação das áreas de plantios e pela consolidação do processo de desenvolvimento tecnológico do setor (ganho de produtividade) (ABRAF, 2011).

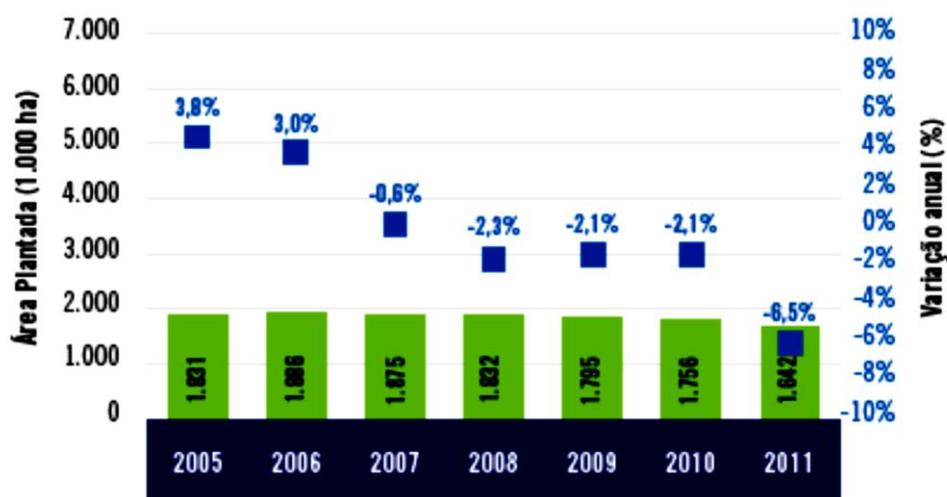
Em 2011, o setor de florestas plantadas no Brasil, atingiu um valor bruto de 53,91 bilhões de reais, sendo responsável por 0,5% da arrecadação nacional de tributos. O nível de emprego dos diversos segmentos da cadeia produtiva de base florestal plantada atingiu 4,73 milhões entre empregos diretos, indiretos e os devidos ao efeito-renda (ABRAF, 2012).

A área ocupada por plantios florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* no Brasil totalizou 6.515.844 ha em 2011, sendo 74,8% correspondente à área de plantios de *Eucalyptus* e 25,2% aos plantios de *Pinus*, Figura 2.

Uma tendência recente que vêm ocorrendo no Brasil é a substituição das áreas plantadas de *Pinus* por *Eucalyptus* (Figura 3). Mesmo assim, a área de plantios de *Pinus* no Brasil totalizou 1.641.892 ha em 2011, dos quais 164.806 ha localizam-se no Rio Grande do Sul (ABRAF, 2012).

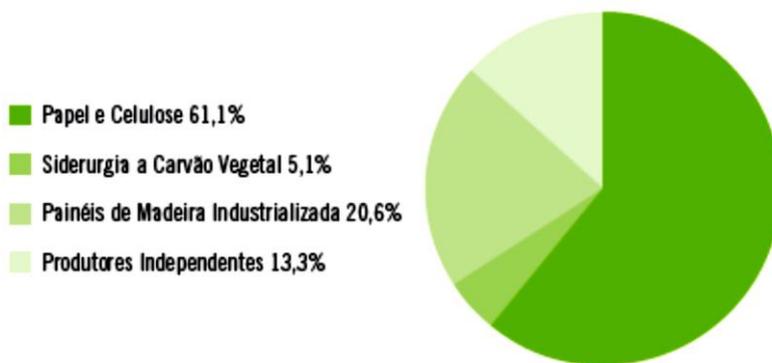


**Figura 2** - Distribuição da área de plantios florestais no Brasil por gênero, 2011.  
Fonte: ABRAF (2012).



**Figura 3** - Histórico da área de plantios florestais de Pinus no Brasil, 2005-2011.  
Fonte: ABRAF (2012)

A cadeia produtiva do Pinus e das florestas plantadas em geral, segundo Buainain e Batalha (2007), constitui uma atividade econômica complexa e diversificada de produtos e aplicações energéticas e industriais. A Figura 4 traz um panorama das principais destinos primários dos plantios de Pinus no Brasil em 2011. Destaca-se a participação dos segmentos de Papel e Celulose e Painéis de Madeira Industrializada, com 61,1% e 20,6%, respectivamente.



**Figura 4** - Distribuição de área de plantios florestais com Pinus das associadas individuais da ABRAF por segmento industrial, 2011.  
Fonte: ABRAF (2012)

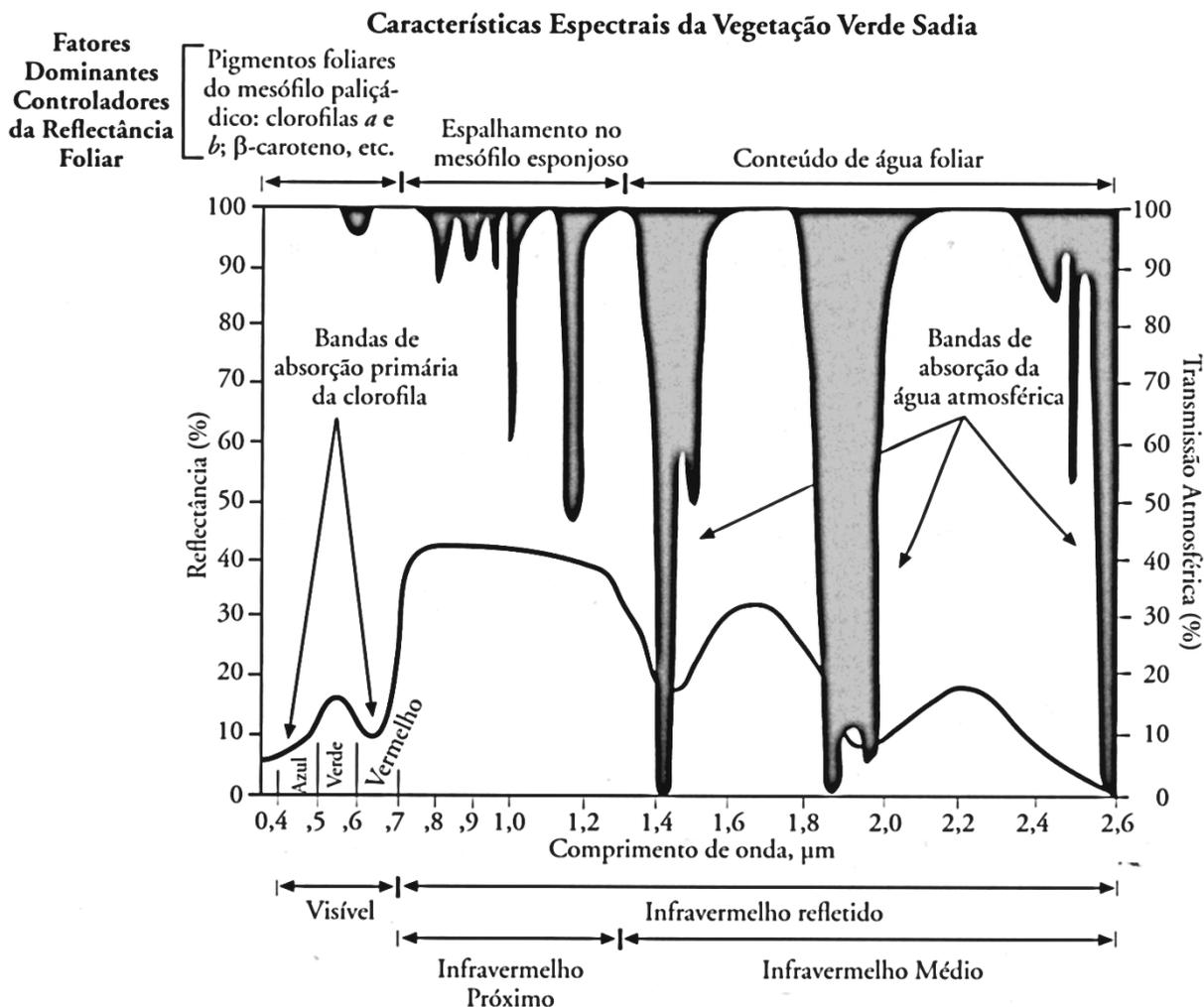
## 2.2 Sensoriamento remoto e a vegetação

### 2.2.1 Interação da energia eletromagnética com as folhas

Uma folha verde sadia intercepta o fluxo radiante incidente direto proveniente do sol ou da radiação difusa espalhada pela folha. Esta energia eletromagnética interage com os pigmentos, água e espaços celulares internos à folha vegetal. A quantidade de fluxo radiante refletido da folha, absorvido pela folha e transmitido através da folha pode ser mensurada por uma equação de balanço de energia (JENSEN, 2009).

Muitos sistemas de sensoriamento remoto funcionam na região de 0,35-3,0  $\mu\text{m}$  medindo principalmente a energia refletida. Esta pode ser quantificada pela porção de energia incidente que é refletida pela folha, a qual é medida em função do comprimento de onda e é chamada reflectância espectral  $\rho_\lambda$  (LILLESAND et al., 2008; JENSEN, 2009).

A folha de uma planta reflete e transmite a radiação incidente em uma maneira que é exclusivamente característica de células pigmentadas contendo soluções de água. As características marcantes do espectro da folha são a alta absortância no ultravioleta e no azul, a reduzida absortância no verde (relativa aos demais comprimentos de onda do visível), a alta absortância no vermelho, a muito baixa absortância e alta reflectância e transmitância no infravermelho próximo (IVP) (0,7 – 1,5  $\mu\text{m}$ ) e a muito alta absortância no infravermelho distante (GATES, 1970). A Figura 5 mostra a curva típica de reflectância espectral média de uma folha verde, madura e saudável.



**Figura 5** - Reflectância espectral característica da folha vegetal verde sadia, para o intervalo de comprimento de onda entre 0,4 e 2,6  $\mu\text{m}$ .  
Fonte: Jensen (2009)

A ausência de uma forte reflectância no intervalo do visível pela maioria das folhas pode ser atribuída aos pigmentos foliares os quais absorvem a radiação visível (WOOLLEY, 1971). Nos comprimentos de onda do visível, até aproximadamente 0,7  $\mu\text{m}$ , a absorção por clorofila e carotenóides influencia fortemente a magnitude da reflectância (MYERS, 1970), sendo que as principais bandas de absorção pela clorofila ocorrem em 0,43 - 0,45  $\mu\text{m}$  (região da luz azul) e em 0,65 - 0,66  $\mu\text{m}$  (região da luz vermelha). Uma relativa diminuição de absorção entre as duas citadas bandas de absorção produz um decréscimo na eficiência de absorção em aproximadamente 0,54  $\mu\text{m}$ , na porção verde do espectro eletromagnético (JENSEN, 2009).

Nos comprimentos de onda do infravermelho próximo até 1,3  $\mu\text{m}$ , na ausência da absorção pela clorofila e carotenóides, a estrutura fisiológica das plantas resulta em altos valores de reflectância e transmitância (MYERS, 1970). Segundo Gausman et al. (1969), a alta reflectância difusa da energia do infravermelho próximo é devida ao espalhamento interno causado pelas interfaces paredes celulares/ar de dentro da folha. Menos de 5 % da energia é absorvida para vários tipos de folhas no IVP (WOOLLEY, 1971). No dossel, os 45-50% da energia transmitida pela primeira camada de folhas pode ser refletida uma vez mais pelas folhas abaixo (reflectância aditiva) (JENSEN, 2009). No caso de múltiplas camadas de folhas (até aproximadamente 6 camadas), pode ocorrer um aumento da reflectância superior a 85% na região do IVP (MYERS, 1970).

Depois de a folha alcançar uma máxima reflectância, em torno de 50%, no intervalo 0,7-1,3  $\mu\text{m}$ , ocorre um decréscimo gradual até o menor valor ao redor de 2,7  $\mu\text{m}$  (KNIPLING, 1970). Acima de 1,3  $\mu\text{m}$ , absorção da radiação eletromagnética pelo conteúdo de água nos tecidos da planta influencia na magnitude da reflectância e transmitância (MYERS, 1970). Na região do infravermelho médio, a resposta da vegetação é modulada pelas bandas de absorção da água, que ocorrem em 1,40, 1,90 e 2,70  $\mu\text{m}$ , onde a banda de absorção 2,70  $\mu\text{m}$  é a maior delas (GATES, 1970; KNIPLING, 1970; WOOLLEY, 1971). Na região do infravermelho médio os picos de reflectância ocorrem em torno de 1,6 e 2,2  $\mu\text{m}$ . E, o aumento da umidade provoca um decréscimo da reflectância (WOOLLEY, 1971). Também, a presença da celulose provavelmente influencia a reflectância nestes comprimentos de onda acima de 1,3  $\mu\text{m}$  (MYERS, 1970).

### **2.2.2 Interação da energia eletromagnética com o dossel florestal**

Quando um grande número de folhas é disposto lado a lado o dossel será formado (MATLOOBI, 2012). O dossel é conceituado como uma série de camadas de folhas absorvedoras de radiação, onde cada uma delas atenua uma fração da radiação incidente de acordo com a lei de Beer-Lambert (GLENN et al., 2008).

Knipling (1970) citou que a reflectância de um dossel da vegetação em geral, numa base percentual, é consideravelmente menor que a de uma folha individual, embora o formato da curva seja semelhante, por causa da atenuação geral da radiação devido à variação no ângulo de incidência da radiação, orientação das folhas, resposta de outros elementos do dossel (truncos e galhos), sombras e superfícies de fundo como o solo.

Gates (1970) comentou que a qualidade espectral da radiação refletida ou absorvida pela vegetação depende não somente da reflectância espectral e transmitância da planta, mas também das características espectrais da radiação incidente. A radiação solar atravessando a atmosfera terrestre para alcançar a superfície é fortemente absorvida pelos gases atmosféricos e espalhados por moléculas de ar, aerossóis, e poeira afetando principalmente a radiância nos comprimentos de onda do visível e IVP (GATES, 1970; PANDYA et al., 2002).

De acordo com Guyot et al. (1989) interpretar dados de sensoriamento remoto de dosséis florestais demanda um adequado conhecimento dos fatores (externos ou internos) que afetam suas propriedades ópticas. Dentre os externos, os autores consideram importantes: tamanho da área de visada do sensor, ângulos azimutais e zenitais de iluminação e de visada, nebulosidade e velocidade do vento. Entre os fatores internos: orientação da linha (para florestas artificiais jovens), propriedades ópticas da superfície do solo (solo e sub-bosque) e arquitetura do dossel. A organização e arranjo espacial das folhas dentro do dossel afeta diretamente a quantidade de luz absorvida por esse sistema integrado (MATLOOBI, 2012).

A reflectância espectral da copa de uma planta é uma combinação da reflectância espectral dos componentes da planta e do solo, governado pelas propriedades ópticas desses elementos e troca de fótons com a copa (RONDEAUX et al., 1996). Quanto ao solo, de acordo com Gates (1970), a reflectância da radiação incidente desta superfície depende de sua coloração, textura, rugosidade, umidade, composição química e mineral, ângulo de iluminação, e grau de sombreamento por plantas, construções, etc.

A medida que a vegetação cresce, a contribuição do solo diminui progressivamente mas ainda pode permanecer significativa, dependendo da densidade das plantas, efeitos da linha de plantio, geometria da copa, efeitos do vento, e assim por diante (RONDEAUX et al., 1996). Huete et al. (1985) analisaram o comportamento espectral de dosséis de algodoeiro com vários níveis de densidade vegetal e quatro tipos de solo entre as linhas. Eles encontraram que a razão de bandas IVP/vermelho foi fortemente dependente do brilho do solo até aproximadamente 60% da cobertura vegetal. Eles concluíram que os espectros do solo e da planta se misturam interativamente de uma maneira não aditiva e parcialmente correlacionada para produzir a composição espectral do dossel.

A estrutura do dossel governará o grau com o qual o solo subjacente é visto de cima e consequentemente as propriedades fotométricas da superfície solo-planta (GATES, 1970). Franklin (1986) analisou a estrutura e composição de floresta de coníferas usando dados TMS (*Thematic Mapper Simulator*). Ela encontrou que a característica dominante afetando a

reflectância espectral foi o fechamento de copas, ou o montante de brilho do plano de fundo (*background*) coberto pelo dossel dentro de um pixel. Os efeitos da reflectância do *background* são dominantes em baixas coberturas de dossel (MCDONALD et al., 1998). Contudo, como observado por Nilson e Peterson (1994), uma vez que o fechamento do dossel ocorre, parece não haver um simples fator dominando a reflectância do povoamento.

Segundo Ponzoni e Shimabukuro (2009) a reflectância bidirecional de dosséis vegetais é fortemente influenciada por sombras. Com o crescimento das árvores e envelhecimento da floresta aumentam os sombreamentos causados pelas copas e dentro destas, acarretando uma redução na radiância medida por um sensor nas bandas do visível, IVP e IVM (SPANNER et al., 1990; FRANKLIN, 1986). Em situações de dossel fechado, o soto-bosque escuro dominou a resposta espectral (SPANNER et al., 1990). Quando a cobertura vegetal atinge uma alta densidade, as sombras podem ocasionar oscilações inesperadas nos valores de reflectância das bandas espectrais, criando comportamento de respostas anômalas, ou seja, menores valores de reflectância aparecerão em florestas mais densas (PONZONI e SHIMABUKURO, 2009).

A quantidade de sombras é influenciada também pela posição do sol no instante do imageamento. MCDONALD et al. (1998) usaram modelos de reflectância para investigar informações espectrais em floresta de coníferas e observaram que quando o ângulo zenital solar aumentou de 30° para 60°, a proporção da cena associada com sombras aumentou, por conseguinte diminuindo a reflectância em todo intervalo de cobertura de dossel. Além disso, essa variação não foi linear nas diferentes bandas espectrais. Estes fatos perturbam a resposta espectral do dossel diminuindo a sensibilidade do dado espectral em detectar mudanças biofísicas na cobertura vegetal.

O entendimento da reflectância da folha e do dossel vegetal pode gerar vários tipos de informações espacializadas e georreferenciadas sobre áreas florestais (SHIMABUKURO et al., 2009), como, por exemplo, a área foliar (MADUGUNDU et al., 2008), a porcentagem de cobertura do dossel (CARREIRAS et al., 2006), a biomassa (LE MAIRE et al., 2011), o tipo de cobertura vegetal (FRANKLIN, 1986), o volume de madeira (RIPPLE et al., 1991; ORUÉ, 2002), diâmetro do tronco (XAXIER, 1998) e altura e área basal (PUHR e DONAGHUE, 2000).

Há normalmente uma relação inversa entre a quantidade de vegetação e a reflectância no visível (0,4 – 0,7  $\mu\text{m}$ ) e infravermelho médio (1,3 – 2,6  $\mu\text{m}$ ) por causa da alta absorvância dos pigmentos das plantas e forte absorção da água pelas folhas, respectivamente

(FRANKLIN, 1986; SPANNER et al., 1990; RIPPLE et al., 1991; ARDÖ, 1992). Por outro lado, a reflectância do IVP tem uma relação direta com a quantidade de vegetação devido ao aumento das reflexões e refrações sucessivas da radiação eletromagnética no interior do mesófilo (das folhas) das várias camadas de folhas (WOOLLEY, 1971). Pesquisadores tem demonstrado que esta relação direta do IVP com o aumento da biomassa de coníferas nem sempre existe. A resposta do IVP pode ser não significativa (FRANKLIN, 1986; PETERSON et al., 1987; CARREIRAS et al., 2006) ou inversa (ARDÖ, 1992; PUHR e DONOGHUE, 2000).

Ponzoni e Shimabukuro (2009) comentaram que seria de se esperar que quanto maior o IAF (Índice de Área Foliar) de um dossel menor sua reflectância na região do visível e maior no IVP. Porém, essa dinâmica não é linear e haverá um valor de IAF acima do qual não mais se observará alteração nos valores de reflectância do dossel, tanto para o visível (ele teria assumido o valor mínimo), quanto para o infravermelho próximo (ele teria assumido seu valor máximo). Esses valores são denominados pontos de saturação e tendem a serem maiores no IVP e menores no visível.

### 2.2.3 Índices de Vegetação

Na imagem, os alvos podem ser caracterizados pela reflectância em cada uma das bandas espectrais ou através de índices. Para o estudo de vegetação, os índices de vegetação (IV) são transformações radiométricas amplamente utilizadas (PONZONI e SHIMABUKURO, 2009), podendo ser usados como um indicador biofísico (GAMON et al., 1995; MENG et al., 2007). Jensen (2009) comenta que desde a década de 1960 os IV's são utilizados para modelar vários parâmetros biofísicos da vegetação.

O uso da razão simples (SR- *Simple Ratio*) IVP/vermelho como método para estimar biomassa ou índice de área foliar foi primeiro reportado por Jordan (1969), o qual usou a razão das radiâncias 0,800/0,675 $\mu$ m para derivar o índice de área foliar para dosséis florestais em uma floresta tropical. Mais tarde, Rouse et al. (1973), com dados Landsat MSS, normalizaram essa razão desenvolvendo o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), criando e batizando um novo termo: Índice de Vegetação (IV).

Índices de vegetação derivados de satélite são medidas ópticas do “verdor” (*greenness*) do dossel, uma propriedade composta pelo conteúdo de clorofila foliar, área foliar, cobertura do dossel e estrutura (GLENN at al., 2008). Os IV's são medidas

radiométricas dos padrões espaciais e temporais da atividade fotossintética da vegetação que são relacionados com variáveis biofísicas tais como IAF, fração da cobertura vegetal, biomassa, área basal, volume, etc. (FRANKLIN, 1986, BARET et al., 1989; ARAÚJO et al., 2000; GILABERT et al., 2002; MACIEL et al., 2007). Além de identificar a vegetação, de acordo com Glenn et al. (2008), quando se trabalha com classificação de imagens os IV's podem ser empregados para gerar classes tais como água e solo.

Índices de vegetação espectrais usam a forma característica bem conhecida do espectro da vegetação verde, combinando a baixa reflectância do espectro no visível com a alta reflectância no infravermelho próximo. Essa combinação pode ser na forma de uma razão, uma inclinação, ou alguma outra formulação (RONDEAUX et al., 1996). Ao final, obtêm-se um único valor indicando a quantidade ou vigor da vegetação dentro de um pixel (CAMPBELL, 1996).

Estas combinações algébricas, segundo Gilabert et al. (2002), são designadas para minimizar o efeito de influências externas na resposta espectral do dossel da vegetação tais como mudanças na irradiância solar devido aos efeitos atmosféricos ou variações nas propriedades ópticas da classe de fundo (*soil background*). Com isso, melhorando o sinal da vegetação (JACKSON e HUETE, 1991).

Para Rondeaux et al. (1996) as três principais variáveis independentes que afetam um IV são: a reflectância do solo, a quantidade de vegetação (IAF) e a arquitetura do dossel (ângulo médio de inclinação foliar). Sombreamento, diferenças de umidade, variações da rugosidade ou diferentes teores de matéria orgânica podem ocasionar considerável variação de brilho, por conseguinte mudando o IV na área desta variação (HUETE, 1988; JACKSON e HUETE, 1991). Os efeitos de solo são predominantes em dosséis parcialmente vegetados (CARREIRAS et al., 2006). À medida que o dossel vai ficando mais denso, de acordo com Ponzoni e Shimabukuro (2009), a reflectância tende a não acompanhar o aumento do IAF, saturando. Este fato limita fortemente o comportamento esperado de um IV em relação a densidade da vegetação.

McDonald et al. (1998) concluíram que as mudanças mais significativas nos índices de vegetação por eles analisados estiveram associadas com a cobertura do dossel, contudo mudanças associadas ao ângulo zenital solar e reflectância do solo também foram importantes para os IV analisados.

Índices podem ser, de forma geral, separados em três categorias: 1) índices intrínsecos (como SR e NDVI), os quais não envolvem qualquer outro fator externo além das

reflectâncias espectrais medidas; 2) índices relacionados à linha de solo, os quais incluem parâmetros da linha de solo, tais como PVI, WdVI, SAVI, TSAVI e MSAVI; e 3) índices corrigidos para a atmosfera como o ARVI e GEMI (RONDEAUX et al., 1996). Alguns autores modificaram o NDVI, trocando a banda do vermelho pela banda do verde (GITELSON et al., 1996) ou pela do infravermelho médio (SOUZA e PONZONI, 1998) testando o melhor arranjo para caracterizar a vegetação sob análise.

Teoricamente, há centenas de razões de bandas, as quais podem ser usadas em análises de dados de imagens (MENG et al., 2007). Baseado em dados Landsat TM, Foody et al. (2003) usaram mais de uma centena de diferentes razões de banda incluindo 10 IV's comumente utilizados e estimaram a correlação entre as razões de banda e biomassa em três diferentes áreas de estudos. Eles observaram diferenças significativas entre os IV's e, também, que os IV's melhores correlacionados em uma área de estudo não foram os mesmos para as outras áreas de estudo, indicando a dificuldade de determinar um IV único com aplicabilidade em diferentes fitofisionomias.

A escolha ótima de um IV é ainda muito relacionada ao propósito do estudo e tipo de vegetação considerada bem como o montante de informação disponível *a priori* (RONDEAUX et al., 1996). McDonald et al. (1998) apontam como vantagens dos IV's a facilidade de uso e a possibilidade de desenvolvê-los para fornecer relações empíricas com os parâmetros desejados minimizando, ao mesmo tempo, a sensibilidade a variações periféricas.

### **2.3 Uso de técnicas de sensoriamento remoto em povoamentos florestais**

Estudos de sensoriamento remoto em inventário florestal têm em comum que, com exceção da banda do infravermelho próximo, a reflectância das bandas espectrais dos sensores multiespectrais a bordo de satélites apresentam, geralmente, uma correlação negativa com as variáveis florestais (FRANKLIN, 1986; RIPPLE et al., 1991; ARDÖ, 1992; BERRA et al., 2012a). Na banda do infravermelho próximo as correlações se apresentam bastante variáveis. Podem ser positivas (SPANNER et al., 1990; SALVADOR e PONS, 1998; BERRA et al., 2012a), negativas (RIPPLE, 1991; ARDÖ, 1992; DANSON e CURRAN, 1993; PUHR e DONOGHUE, 2000), ou ainda não significativas (FRANKLIN, 1986; PETERSON et al., 1987; GHARAMANY et al., 2012).

Spanner et al. (1990) encontraram correlação positiva para altos índices de área foliar em florestas de dossel fechado, enquanto correlações negativas foram observadas em florestas

de dossel aberto quando o sub-bosque tem maior reflectância que o dossel no infravermelho próximo. Uma provável explicação para a fraca relação entre o IVP e a estrutura florestal é que o aumento da reflectância no IVP associado com o crescimento das árvores e fechamento de copas é mais ou menos neutralizado (contrabalanceado) por um decréscimo na reflectância associado com reduções na quantia da vegetação do plano de fundo visível ao sensor (RIPPLE, 1986).

Segundo Puhr e Donaghue (2000), este processo de neutralização também ocorre no IVM, mas no IVP aumentos na reflectância relacionados com o desenvolvimento da copa tem um efeito de anulamento muito mais forte no decréscimo da reflectância relacionado às reduções na vegetação do sub-bosque visível ao sensor, principalmente porque o albedo do espalhamento simples na folha (*leaf single scattering albedo*) é muito maior no IVP que no IVM. Em outras palavras, decréscimos dominam sobre aumentos da reflectância no IVM, enquanto no IVP os dois efeitos tendem a se anular um ao outro.

Muitos estudos têm identificado a região do infravermelho médio como a mais sensível às modificações das variáveis florestais; o uso da reflectância no IVM forneceu a mais forte relação com a biomassa total da floresta (BOYD et al., 1999), com o IAF (SPANNER et al., 1990) e com volume de madeira (ARDÖ, 1992; SOUZA e PONZONI, 1998). Contudo, essa relação nem sempre é tão promissora; para Franklin (1986) a banda do IVM apresentou a mais fraca correlação com área basal (-0,12) em comparação as outras bandas individualmente. Horler e Ahren (1986) sugeriram que o sombreamento é um fator, no mínimo, tão importante quanto o conteúdo de água das folhas na influência da reflectância espectral de florestas na região do infravermelho de ondas curtas.

Investigações da relação da cobertura ou densidade florestal com reflectância (FRANKLIN, 1986; SPANNER et al., 1990; SALVADOR e PONS, 1998; CARREIRAS et al., 2006) e das características da reflectância de outros tipos de vegetação com fechamento incompleto do dossel (ROBINOVE et al., 1981; HUETE et al., 1985) indicam que quando a cobertura vegetal é incompleta, o sinal espectral mais forte é do brilho do solo ou sub-bosque, modificado pelo montante de dossel cobrindo ele.

Puhr e Donoghue (2000) destacaram o problema de usar imagens de satélite para prever parâmetros de povoamentos com árvores maduras quando do fechamento do dossel. Eles observaram que quaisquer predições para povoamentos de coníferas com altura superior a 13 m e área basal excedendo 40 m<sup>2</sup>/ha são duvidosos. Este problema também foi notado por outros autores (WILLIAMS e NELSON, 1986; ARDÖ, 1992; DANSON e CURRAN, 1993;

NILSON e PETERSON, 1994) e é particularmente importante em aplicações em florestas comerciais onde mapas detalhados de árvores atingindo o fim da rotação são necessários (PUHR e DONOGHUE, 2000).

Florestas plantadas ou comerciais tendem a ser aquelas onde as taxas de crescimento são altas, os volumes de madeira são grandes, e o dossel pode fechar bem antes da maturidade (DANSON e CURRAN, 1993; BROCKHAUS e KHORRAM, 1992). Uma vez que o dossel fecha, o volume de madeira é relacionado com a reflectância do dossel apenas através das variações no IAF (DANSON e CURRAN, 1993; FRANKLIN, 1986), o qual exibe uma relação assintótica com a reflectância em altos volumes de madeira (SPANNER et al., 1990). Práticas de manejo, como desbastes, modificam o volume de madeira do talhão, porém, essa variação nem sempre é detectada pelos dados de sensores remotos (SOUZA e PONZONI, 1998) e poderia enfraquecer ainda mais as relações entre volume de madeira e reflectância (TROTTER et al., 1997). Florestas desde baixos até altos volumes de madeira terão uma baixa reflectância e um intervalo dinâmico de reflectância reduzido, fatores que são considerados contributivos para as dificuldades em estimar rendimentos de plantações florestais por sensoriamento remoto (DE WULF et al. 1990; DANSON, 1987; ORUÉ, 2002)

Apesar das dificuldades, segundo Trotter et al. (1997), o elevado valor econômico das plantações florestais explica o grande interesse em utilizar o sensoriamento remoto para auxiliar o inventário florestal de campo, pois, mesmo onde eles existem, a intensidade amostral abrange, geralmente, de 2 a 3% da área.

A seguir são resgatados alguns trabalhos a partir da década de 90 que estudaram as relações entre parâmetros florestais e dados de satélite em várias fisionomias florestais.

Ardö (1992) encontrou uma forte correlação negativa entre o volume de talhões florestais de coníferas e a radiância espectral em todas as bandas do TM/Landsat 5. O autor comentou que as sombras foram provavelmente uma causa contributiva para esta relação; as correlações entre o volume de madeira e a radiância espectral foram maiores nos talhões com volumes menores; nos maiores volumes as correlações tiveram seus valores significativamente diminuídos.

Imagens TM/Landsat (30 x 30m) e SPOT-1 *High Resolution Visible* (HRV) (20 x 20m) de dosséis de floresta temperada composta de coníferas em Oregon, EUA, foram comparadas em suas relações com o volume de madeira usando correlação e análise de regressão por Ripple et al. (1991). Relações significativas foram encontradas entre o volume de madeira e todas as bandas espectrais de ambos os sensores ( $p < 0,01$ ), sendo todas

inversas. A resolução espacial mais detalhada do sensor HRV melhorou a correlação somente no IVP. As mais altas correlações foram encontradas entre o logaritmo do volume e as bandas do infravermelho próximo (HRV banda 3,  $r = -0,89$ ; TM banda 4,  $r = -0,83$ ). Os autores inferiram que as relações inversas com as bandas do IVP foram causadas por (1) aumento do sombreamento causado pelas copas dentro de povoamentos mais velhos, e (2) decréscimo do brilho do sub-bosque com o fechamento do dossel das coníferas (concordando com SPANNER et al., 1990).

Trotter et al. (1997) investigaram a relação entre dados de inventário florestal de plantios de *Pinus radiata* na Nova Zelândia com dados TM/Landsat-4. Os autores argumentaram que a correlação negativa encontrada entre reflectância e volume de madeira é consistente com a interpretação física de que os componentes daquele sub-bosque (gramíneas e xaxim) são mais reflectivos que o dossel, resultando em baixas correlações ao nível de pixel.

Salvador e Pons (1998) usaram imagens TM/Landsat, combinado com levantamento de campo, para estimar variáveis dendrométricas (cobertura de dossel, área basal e volume de madeira) de florestas heterogêneas com predomínio de *Quercus ilex* L., *Pinus sylvestris* L. e *Pinus nigra salzmannii* Franco. Os modelos de regressão linear simples foram consistentes com a resposta espectral esperada da vegetação; nos casos em que uma banda do visível (TM1, TM2 ou TM3) ou infravermelho médio (TM5 e TM7) foi significativa ( $p < 0,05$ ), uma inclinação negativa foi encontrada. Nos modelos onde a banda IVP (TM4) ou um IV foi significativa como variável independente, as inclinações foram positivas. Os autores constataram que quando foram utilizadas unidades amostrais homogêneas, em relação a espécie, os ajustes, geralmente, foram melhores.

Com o satélite IRS-1B, Srivastava et al. (1999) estimaram o volume de *Shorea robusta*. As radiâncias das bandas correspondentes ao azul e ao vermelho entraram como variáveis independentes nas equações de regressão múltipla e apresentaram  $R^2$  com valores de 0,71.

Puhr e Donoghue (2000) investigaram a relação entre a reflectância e a estrutura da floresta em 52 plantios de coníferas na Escócia com idade entre 5 a 40 anos. Os coeficientes angulares das equações de regressão relacionando os dados espectrais (TM 1, TM 2, TM 3, TM 4, TM 5 e TM 7) com área basal e altura foram sempre negativos, indicando que a reflectância decresceu com a aumento da área basal e altura. Os autores ressaltaram que a força dessas relações decresceu substancialmente após ocorrer o fechamento do dossel, sendo

uma evidência clara que a vegetação do sub-bosque visível ao sensor foi o principal fator controlando a reflectância das plantações de coníferas estudadas.

A estimativa de parâmetros estruturais de uma floresta tropical primária utilizando dados orbitais obtidos pelo satélite TM/Landsat 5 e o relacionamento com dados obtidos no campo, foi realizado por Maciel (2002). Os resultados mostraram uma alta correlação entre área basal, biomassa e volume e as variáveis reflectância da banda 4 e SAVI. O autor acrescentou ainda que a estimativa de parâmetros biométricos com emprego de dados orbitais associados a dados de campo apresentou-se satisfatória, mostrando que os valores obtidos das imagens TM/Landsat 5 permitem caracterizar a estrutura da floresta primária em termos de biomassa e volume.

Xu et al. (2003) avaliaram a capacidade de dados TM para estimar o fechamento de copa de florestas de carvalho na estação seca na Califórnia. Os resultados apontaram que a banda do vermelho obteve as melhores relações com as medidas de fechamento de copa ( $r=-0,83$ ,  $R^2=0,69$ ), ao contrário da banda do IVP ( $r=0,22$ ,  $R^2=0,05$ ). As correlações foram positivas apenas com a banda IVP. O NDVI apresentou um coeficiente de correlação de 0,84 e coeficiente de determinação de 0,7.

Carreiras et al. (2006) também estimaram a cobertura do dossel de espécies de carvalho utilizando imagens Landsat TM, porém, em floresta aberta em Portugal. Eles observaram correlação negativa não linear entre as bandas do visível e do infravermelho de ondas curtas com a cobertura do dossel, já o IVP não apresentou correlação significativa. Este último resultado os autores atribuíram ao fato de tanto as copas quanto o sub-bosque (gramíneas secas à época) e solo apresentarem ambos altos valores de reflectância no IVP, assim, esta banda não pôde ser sensível à variação das diferentes classes de cobertura de copas de árvores. Consequentemente os índices de vegetação NDVI e ARVI também foram influenciados pela classe de fundo, uma vez que foram constatados diferentes valores de IV para unidades amostrais com a mesma cobertura de dossel. Os IV se correlacionaram positivamente com o fechamento do dossel. A melhor equação linear (obtida por *stepwise*) incluiu as bandas Landsat TM 3, 4, 5 e 7 ( $R^2=0,74$ ), o NDVI obteve desempenho similar ( $R^2=0,72$ ). Os resultados apontaram que a detecção de coberturas de dossel com fechamento baixo ou médio, naquela área de estudo, pode ser feita com o apoio de imagens TM.

Pinheiro et al. (2009) trabalharam com imagem TM do Landsat 5 na estimativa de biomassa aérea no cerrado (cerrado *stricto sensu* e cerradão). Os autores obtiveram índices de correlação negativos para as bandas do visível (TM1, TM2 e TM3) e positivos para a banda

do infravermelho próximo (TM4), tanto no cerrado *stricto sensu*, como no cerradão. Já nas bandas do infravermelho de ondas curtas (TM5 e TM7) os comportamentos foram controversos; no cerrado *strictu sensu* a correlação foi negativa e no cerradão positiva. Os autores inferiram que isso se deve à grande diversidade florística, entre outros. As correlações entre os IV's e a biomassa aérea foram positivas; no cerrado *strictu sensu* variaram de 0,15 (OSAVI) até 0,36 (RDVI); no cerradão variou de 0,44 (EVI) até 0,54 (RDVI). Os autores concluíram que os IV's melhoram a predição de biomassa, porém, a correlação permaneceu entre fraca e moderada, indicando limitações dessa metodologia para estimar a biomassa de fitofisionomias do cerrado.

Além da variabilidade causada pela diversidade florística, também a influência da topografia neste tipo de estimativa tem sido estudada. Canavesi e Ponzoni (2007) avaliaram a influência da topografia na relação entre dados radiométricos extraídos de imagens TM do Landsat 5 e dados de volume de madeira estimados de povoamentos de *Eucalyptus* spp. Quando as classes de iluminação foram consideradas, os coeficientes de correlação aumentaram das classes escuras para as melhor iluminadas. Os autores concluíram que a iluminação influenciou nas relações entre dados radiométricos e biofísicos. Os dados da banda 4 do sensor TM/Landsat 5 foram os que apresentaram as maiores correlações com o volume de madeira. Quando foram consideradas as diferentes classes de iluminação, as correlações com os dados da banda 4 foram ainda maiores, especialmente nas classes mais iluminadas.

Ghahramany et al. (2012) avaliaram a capacidade do sensor *High Resolution Geometric* (HRG) do satélite SPOT-5 para estimar área basal (m<sup>2</sup>/ha) em floresta heterogênea manejada com predominância de *Quercus* sp. no Iran. Considerando todas as unidades amostrais (n=287), dentre as bandas espectrais, os melhores coeficientes de correlação foram com a banda do verde (r= -0,60; p=0,01), depois a banda do vermelho (r= -0,52; p=0,01); já com o IVP não houve correlação significativa (r= 0,06). Eles inferiram que esses resultados podem ser devido a alta densidade arbórea e baixa reflectância do solo. Quanto aos índices de vegetação, o NDVI e o SAVI obtiveram o mesmo valor de correlação (r= 0,55; p=0,01).

Mohamedain et al. (2012) estimaram volume de madeira de *Acacia senegal* no Sudão integrando dados de inventário florestal e NDVI derivado do sensor ASTER. Os resultados mostraram que o volume estimado pelo NDVI não foi significativamente diferente do calculado pelos dados de campo e concluíram que os dados de sensoriamento remoto junto com dados de campo foram úteis e efetivos na estimação de volume florestal naquela área de estudo.

## **2.4 Tratamento de imagens de satélite**

### **2.4.1 Correções radiométricas e atmosféricas**

A reflectância de “alvos” da superfície terrestre é um parâmetro intrínseco dos objetos sensoriados e, assim, em muitas situações, deve ser utilizada em lugar dos valores de “níveis de cinza” normalmente encontrados nas imagens de satélite. Para obter a reflectância de alvos de imagens de satélite é necessário eliminar a interferência atmosférica e realizar uma série de cálculos que envolvem parâmetros do sensor e informações da própria imagem (GURTLER et al, 2005).

Satélites recebem a resposta espectral integrada dos alvos dentro de uma largura espectral designada e os dados são fornecidos para o usuário na forma de números digitais, os quais não correspondem quantitativamente a unidades físicas, tais como radiância ou reflectância (ROBINOVE, 1982). Assim, estudos pretendendo usar dados de sensoriamento remoto para quantificar características da superfície terrestre, como índice de área foliar e biomassa, requerem a conversão dos números digitais em reflectância de superfície (PANDYA et al., 2002).

Unidades físicas, de acordo com Price (1987), também são necessárias para estudos que usam imagens multitemporais ou multissensores, desta maneira os resultados podem ser comparados. A conversão dos números digitais para reflectância de superfície no comprimento de onda da radiação solar (0,4–3,0  $\mu\text{m}$ ) é alcançado através da conversão radiométrica e correção atmosférica (PANDYA et al., 2002).

#### **2.4.1.1 Conversão radiométrica**

A habilidade de detectar e quantificar mudanças no ambiente terrestre depende de sensores com capacidade de prover medidas calibradas (acurácia e precisão conhecidas) e consistentes das características da superfície terrestre através do tempo (CHANDER et. al., 2009a). Caracterização e calibração radiométrica é um pré-requisito para criar dados científicos de alta qualidade e, conseqüentemente, derivar produtos de alto nível (CHANDER et. al., 2009a).

A radiância total refletida por um alvo na superfície terrestre, após atravessar e interagir com a atmosfera, é detectada pelo sensor, cuja resposta (sinal de saída) é transmitida

à estação de recepção terrestre, onde é convertida em número digital. Isto é, o nível de cinza ou número digital é uma função da radiância incidente ao sensor (SCHOTT, 2007).

O cálculo da radiação espectral incidente ao sensor é a etapa fundamental em converter dados de imagens oriundos de múltiplos sensores e plataformas em uma escala radiométrica comum com significado físico. A calibração radiométrica de sensores envolve o reescalonamento dos números digitais brutos (Q) transmitidos do satélite para números digitais calibrados ( $Q_{cal}$ ), os quais possuem a mesma escala radiométrica para todas as cenas processadas em terra para um período específico (CHANDER et. al., 2009a).

Durante a calibração radiométrica os valores dos pixels dos dados das imagens brutas, sem processamento (Q) são convertidos para unidades de radiância espectral absoluta. Os valores de radiância absoluta são então escalonados para números de 7 bits (IRSP6/LIS III,  $Q_{calmax}=127$ ) e 8 bits (TM,  $Q_{calmax}=255$ ) representando  $Q_{cal}$  antes de sair para os meios de distribuição. A conversão de  $Q_{cal}$  de volta para radiância espectral incidente ao sensor ( $L_{\lambda}$ ) (produtos nível 1) requer conhecimento dos limites inferiores e superiores dos fatores de reescalonamento originais (CHANDER et. al., 2009a).

A Equação 1, descrita por Markham e Barker (1986) e por Chander et al. (2009a), é usada para realizar a conversão de  $Q_{cal}$  para  $L_{\lambda}$ :

$$L_{\lambda} = L_{min\lambda} + \left( \frac{(L_{max\lambda} - L_{min\lambda}) * Q_{cal}}{Q_{calmax}} \right) \quad (1)$$

Onde:

$L_{\lambda}$ = Radiância Bidirecional aparente (radiância espectral na abertura do sensor ou incidente ao sensor) [ $W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$ ];

$L_{min \lambda}$ = radiância espectral mínima no sensor [ $W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$ ];

$L_{max \lambda}$ = radiância espectral máxima no sensor [ $W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$ ];

$Q_{cal}$ = número digital a ser convertido;

$Q_{calmax}$ = número digital máximo (dependente da resolução radiométrica do sensor).

Uma redução na variabilidade entre cenas pode ser conseguida pela conversão da radiância espectral na abertura do sensor ( $L_{\lambda}$ ) para reflectância exoatmosférica no topo da atmosfera (TOA – *Top Of Atmosphere*), também denominada reflectância aparente. Quando se está comparando imagens de diferentes sensores há três vantagens em usar reflectância aparente ao invés de  $L_{\lambda}$ . Primeiro, ela remove o efeito do cosseno de diferentes ângulos zenitais solares devido às diferenças de tempo entre as datas de aquisição. Segundo, a reflectância aparente compensa para diferentes valores de irradiância solar exoatmosférica

chegando nas diferentes bandas espectrais. Terceiro, a reflectância TOA corrige as variações da distância Terra-Sol entre diferentes datas de aquisição. Essas variações podem ser significantes geograficamente e temporalmente (CHANDER et al., 2009a).

A conversão dos valores de radiância bidirecional aparente para valores de reflectância TOA (ou reflectância aparente) pode ser feita pela Equação 2 descrita por Markham e Barker (1986) e Chander et. al. (2009a):

$$\rho_a = \frac{\pi \times L_\lambda \times d^2}{E_{sun(\lambda)} \times \cos\theta} \quad (2)$$

Onde:

$\rho_a$  = Fator de reflectância bidirecional (FRB) aparente ou reflectância planetária no topo da atmosfera, adimensional;

$\pi$  = Constante matemática igual a 3,14159;

$L_\lambda$  = Radiância espectral que chega ao sensor [ $W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$ ];

$d$  = Distância de Terra-Sol em unidades astronômicas;

$E_{sun\lambda}$  = Irradiância solar exoatmosférica média [ $W/(m^2 \mu m)$ ];

$\theta$  = Ângulo zenital solar, em graus.

#### 2.4.1.2 Correção atmosférica

A transformação de  $L_\lambda$  para  $\rho_a$  não leva em consideração as influências atmosféricas e assume um terreno plano e observação vertical, representando uma simplificação da realidade. Por isso é denominada de reflectância aparente, pois o valor calculado seria só a reflectância captada pelo sensor, porém não a realmente mensurável na superfície (CHUVIECO, 1990).

Os sinais de radiação eletromagnética coletados por satélites no espectro solar são modificados pelo espalhamento e absorção de gases e aerossóis enquanto viajam através da atmosfera da superfície da Terra até o sensor (SONG et al., 2001). Vários estudos reportaram a influência da atmosfera na determinação da reflectância (KAUFMAN, 1989; HUETE e LIU 1994; HADJIMITSIS et al., 2010; SONG et al., 2001). Spanner et al. (1990) analisando o efeito das correções atmosféricas e de geometria sol-superfície-sensor aplicados a dados TM encontraram que o espalhamento atmosférico contribuiu com aproximadamente 50% da radiância de um povoamento florestal de coníferas na banda 3, 20% na banda 4 e menos de 10% na banda 5.

Por isso, segundo Hadjimitsis et al. (2010), é essencial considerar os efeitos da atmosfera pela aplicação de um método de correção atmosférico confiável e eficiente durante

o pré-processamento dos dados digitais. Os métodos de correção atmosféricos podem ser divididos em físicos, os quais são os mais completos e baseados na teoria da transferência radiativa, e os alternativos ou empíricos, os quais são mais simplificados e geralmente assumem a interferência da atmosfera como aditiva (FREIRE, 1996; MATHER, 1999).

O DOS (*Dark Object Subtraction*) (CHAVEZ, 1988) é o método empírico mais simples e amplamente usado (ANTUNES et al., 2003; EKSTRAND, 1994). O modelo MODTRAN 4 (BERK et al., 2003) é um dos códigos de transferência radiativa mais amplamente usados em simulações acuradas de transferência radiativa atmosférica (GUANTER, 2006).

#### **2.4.2 Correção geométrica**

As imagens geradas por sensores remotos estão sujeitas a uma série de distorções que podem ser corrigidas através de técnicas denominadas de correção geométrica. Existem dois níveis de correção (IBGE, 2001):

a) correção dos erros sistemáticos: os erros sistemáticos são aqueles devidos às características próprias do sensor, instabilidade da plataforma, distorção panorâmica e à distorção causada pela curvatura e rotação da Terra. Todas estas correções são feitas na estação de recepção do satélite, usando dados de efemérides e as especificações do sensor e da órbita.

b) correção de precisão: esta é a correção geométrica propriamente dita, que remove os erros residuais, depois que os erros sistemáticos forem corrigidos. A correção geométrica produz o georreferenciamento da imagem, ou seja, estabelece uma relação geométrica entre os pixels da imagem e as coordenadas cartográficas da área correspondente. Através da correção de precisão a imagem adquire propriedades de um mapa, com todos os pixels referenciados a um sistema de Projeção Cartográfica. O registro é o ajuste de uma imagem ao sistema de coordenadas de outra imagem.

Segundo Dikshit e Roy (1996), a imagem e os dados de referência de campo devem ser coregistrados mais convenientemente georreferenciando a imagem no mesmo sistema de coordenadas dos dados de referência de campo. Assim, de acordo com Schowengerdt (2007), mais correções para retificar a imagem, que já vem corrigida num sistema de projeção, podem ser feitas por funções de distorção polinomial e GCP's (*Ground Control Points*).

Após localizar os GCP's na imagem e escolhida a função polinomial, a etapa final deste processo consiste em decidir qual técnica de interpolação deve ser utilizada para gerar a nova imagem georreferenciada (RICHARDS e JIA, 2006):

-Vizinho mais próximo: simplesmente escolhe o pixel que tem seu centro próximo do ponto locado na imagem.

-Bilinear: utiliza três interpolações lineares sobre os quatro pixels rodeando o ponto encontrado na imagem.

-Convolução cúbica: usa os 16 pixels vizinhos.

## 2.5 Visão geral dos sensores LISS-III/ResourceSat-1 e TM/Landsat 5

O satélite Landsat 5 opera em uma órbita circular, repetitiva, sol-síncrona e quase polar, com uma inclinação de 98,2°, a uma altitude nominal de 705 km no Equador. Órbita sol-síncrona significa que todas as aquisições em uma determinada área ocorrem na mesma hora do dia. A hora do cruzamento equatorial durante a passagem descendente (passagens descendentes são no lado iluminado da Terra e passagens ascendentes são no lado escuro da órbita) é nominalmente entre 09:30 e 10:00 local. Circulando a Terra a 7,5 km/s, cada órbita gasta aproximadamente 99 minutos. O satélite completa 14 órbitas por dia, cobrindo toda a Terra a cada 16 dias entre os 81° de latitude norte e sul, completando 233 órbitas por ciclo no sistema de referência mundial 2 (WRS-2, do inglês *World Reference System-2*) (CHANDER et al., 2008). Informações mais detalhadas são encontradas em NASA (2012a).

O sensor TM do Landsat 5 (L5 TM) é um sensor imageador terrestre que foi lançado em 1º de março de 1984. Ele incorporou avanços nas capacidades espectrais, radiométricas e geométricas relativas aos scanners multiespectrais presentes nos satélites Landsat prévios. As bandas 1-5 e 7 do L5 TM têm 16 detectores com comprimento de onda central aproximadamente em 0,49, 0,56, 0,66, 0,83, 1,67 e 2,24  $\mu\text{m}$ , respectivamente (NASA, 2006).

Resourcesat-1 (também chamado IRS-P6), lançado em outubro de 2003, é o 10º satélite da série IRS (*Indian Remote Sensing satellites*) construído pela Organização de Pesquisa Espacial Indiana (MANJUNATH e MURALIKRISHNAN, 2008).

ResourceSat-1 está em órbita a 817 km de altitude com uma inclinação de 98,7°. O satélite tem um período orbital de 101,35 minutos. A hora do cruzamento equatorial do satélite é 10:30  $\pm$  5 min. (hora local) e a trilha na terra (*ground track*) é mantida dentro de  $\pm$  1 km (SESHADRI, 2004). A carga útil do ResourceSat-1 inclui três sensores imageadores:

LISS-IV, com uma resolução espacial de 5,8 m; LISS-III, com uma resolução espacial de 23,5 m e AWiFS, com uma resolução espacial de 56 m no nadir (MANJUNATH e MURALIKRISHNAN, 2008).

O P6 LISS-III é um sensor multiespectral operando em quatro bandas espectrais, duas bandas no visível, uma no IVP e uma na região do infravermelho de ondas curtas, com uma largura de faixa imageada de 141 km. Apresenta visada no nadir com um ciclo de revisita de 24 dias (NRSA, 2003). A Tabela 1 resume algumas características dos sensores TM e LISS-III.

O sistema Landsat, colocado em órbita pela primeira vez em 1972, contribuiu significativamente para o entendimento do ambiente terrestre (WILLIAMS et al., 2006) com aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento. Contudo, a descontinuidade do programa Landsat a partir da interrupção de aquisição de imagens pelo Landsat 5 em 2011 (NASA, 2012a) criou, e vem criando, um vazio de informações na série histórica desta plataforma até que o novo Landsat disponibilize imagens multiespectrais do ambiente terrestre, o que está previsto para meados de 2013 (NASA, 2012b).

Neste ponto, os satélites da série IRS despontaram como uma opção. O sensor LISS-III, foi considerado o sensor que forneceu a melhor combinação com Landsat 5 em virtude de suas capacidades, características das bandas espectrais e acessibilidade dos dados e, por isso, foi considerado o mais adequado para preencher necessidades imediatas de dados com mínimas complicações (CHANDER e STENSAAS, 2008; ANDERSON et al., 2011).

Assim, a descontinuidade do Landsat 5, a similaridade do LISS-III com o TM e a distribuição de forma gratuita pelo INPE ([www.inpe.br](http://www.inpe.br)) fez com que a comunidade científica brasileira passasse a utilizar o LISS-III nestes últimos anos (CORRAZA et al., 2011; PULLIZA et al., 2011; RUIZ et al., 2012).

**Tabela 1** - Características do sensor TM a bordo do satélite Landsat 5 e do sensor LISS-III a bordo do satélite ResourceSat-1.

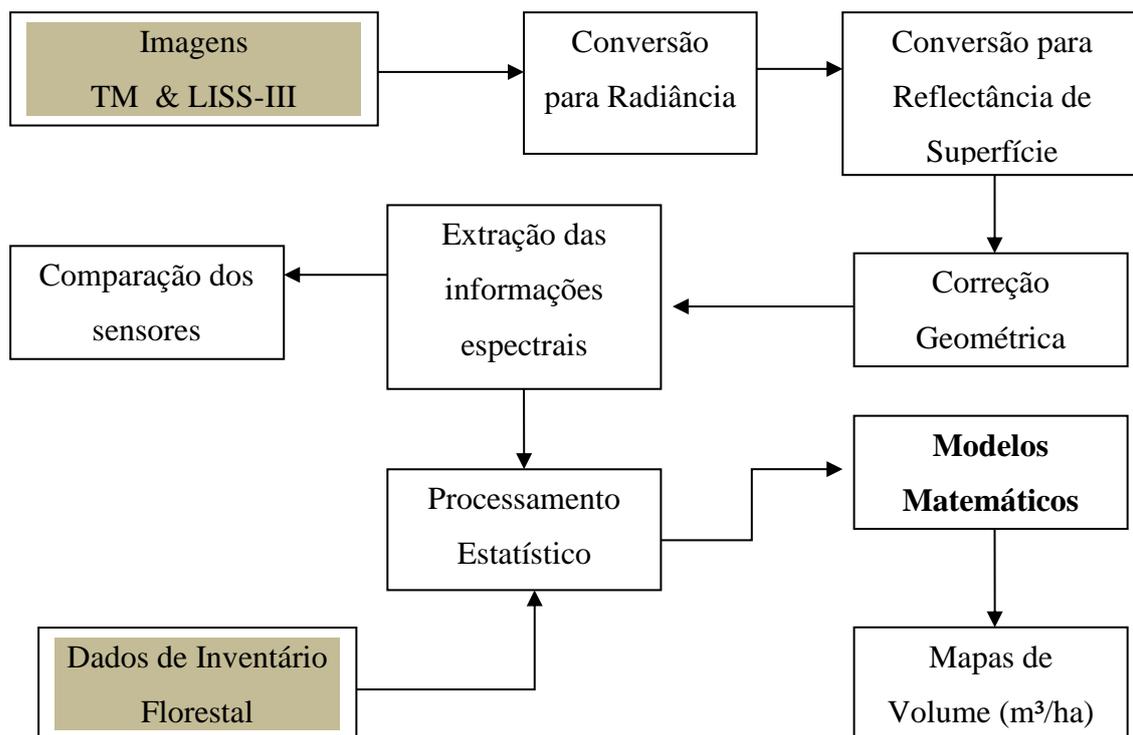
Banda	Landsat 5 TM	ResourceSat-1 LISS III
	Resolução espectral ( $\mu\text{m}$ )	
1	0,45 - 0,52	-
2	0,52 - 0,60	0,52-0,59
3	0,63 - 0,69	0,62-0,68
4	0,76 - 0,90	0,77-0,86
5	1,55 - 1,75	1,55-1,70
7	2,08 - 2,35	-
Resolução espacial (m)		
	30	23,5
Resolução radiométrica (bits)		
	8	7
Resolução temporal (dias)		
	16	24

Fonte: Chander et. al. (2009a) e NASA (2012a).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

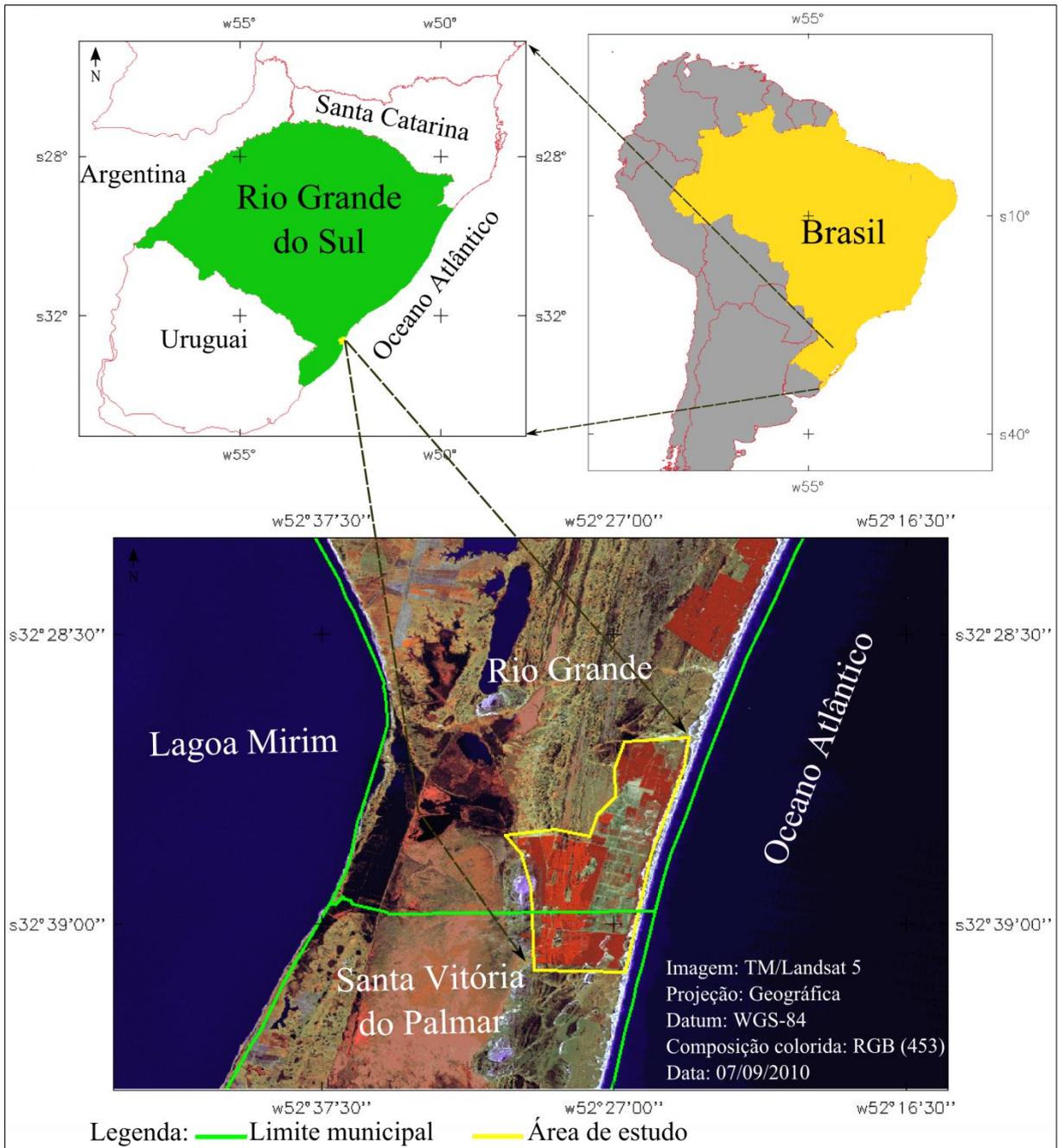
A metodologia proposta pode ser visualizada na forma de um fluxograma, o qual está apresentado na Figura 6. Neste fluxograma são destacados os dados originais a serem utilizados no estudo, quer seja, as imagens de satélite e os dados do inventário florestal. Detalhes das etapas deste fluxograma são explicados no transcorrer da metodologia.

**Figura 6** - Fluxograma da metodologia a ser utilizada.



#### 3.1 Área de Estudo

A área de estudo, pertencente à empresa TREFLOR, cobre, aproximadamente, 15 quilômetros de costa marítima. A área ocupa uma estreita faixa da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, entre a Lagoa Mirim e Oceano Atlântico, distribuindo-se entre os municípios de Rio Grande e Santa Vitória do Palmar (Figura 7). A Planície Costeira do Rio Grande do Sul, uma das quatro províncias morfológicas do Estado (CARRARO et al. 1974), localiza-se entre os paralelos de 29°18' e 33°48' de latitude Sul ocupando uma faixa adjacente ao Oceano Atlântico, com 650 km de extensão por cerca de 70 km de largura média.



**Figura 7** - Mapa de localização da área de estudo.

O clima da região, segundo o sistema de classificação de Köppen-Geiger é subtropical úmido do tipo Cfa, apresentando a temperatura do ar média anual de 18,3°C para o município de Rio Grande (RS) e de 16,8°C para o município de Santa Vitória do Palmar (RS). No município de Rio Grande a temperatura média do ar dos meses mais quentes (janeiro e fevereiro) é de 23,7°C e a dos meses mais frios (junho e julho) de 13,2°C. Em Santa Vitória do Palmar a temperatura do ar média do mês mais quente (janeiro) é de 22,4°C e do mês mais

frio (julho) de 11,1°C. Em Rio Grande tem-se uma precipitação média anual de 1155,6 mm (para Santa Vitória do Palmar não consta esta informação) (CEMETRS, 2012).

O relevo da área apresenta-se bastante plano em toda a extensão (EMBRAPA, 1990), elevando-se apenas alguns metros acima do nível do mar. A verificação do modelo digital de elevação, extraídos dos dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) para área de estudo, permitiu verificar que as altitudes variam entre 01 e 25m (WEBER et al., 2004). Altitudes também observadas por Berra (2010) e Krebs (2010) durante o inventário florestal realizado na área de estudo.

A vegetação natural da região está enquadrada segundo a classificação da vegetação proposta pelo projeto RADAMBRASIL (1986) nas áreas das Formações Pioneiras, com ocorrência de duas comunidades pioneiras: Vegetação com Influência Marinha (restinga) e Vegetação com Influência Marinha (restinga) Herbácea. Nas comunidades de restinga ocorrem várias formações vegetais campestres, florestais e palustres. Nas formações campestres predominam espécies típicas de savanas do cerrado brasileiro (TEIXEIRA et al. 1986). As formações florestais podem se desenvolver tanto em áreas palustres (matas paludosas) como em áreas arenosas secas. As matas paludosas se caracterizam pela presença de espécies higromórficas, megáfilas, malacófilas ou mesmo com adaptações mais especializadas, como pequenas raízes respiratórias (WAECHTER, 1985).

A área de estudo encontra-se numa região onde podem ocorrer três tipos de solos, que de acordo com EMBRAPA (1999) são classificados em Neossolo Quartzarênico, Neossolo Quartzarênico Hidromórfico e Gleissolo Melânico Eutrófico. De acordo com IBGE (2007), Neossolos são constituídos por material mineral ou material orgânico pouco espesso (menos de 30 cm de espessura), sem apresentar qualquer tipo de horizonte B diagnóstico, já Gleissolos são solos característicos de áreas alagadas ou sujeitas a alagamento. Ainda segundo este autor, quartzarênico refere-se a composição por areias quartzosas e melânico refere-se a horizonte hístico, húmico, proeminente e chernozêmico.

A TREFLOR cultiva duas espécies florestais, sendo que o tipo de solo define qual espécie a ser implantada. Os solos arenosos com baixo teor de matéria orgânica são utilizados para o plantio de *Pinus elliottii*, já os solos mais heterogêneos, com alguma concentração de matéria orgânica (popularmente chamados de solos turfosos), são utilizados para o plantio de *Eucalyptus* sp.

A Figura 8 mostra alguns talhões de *Pinus elliottii*, bem como a área em seu entorno. Esta fotografia ilustra os plantios chegando até próximo a praia (em torno de 200m do mar) e

evidencia o solo arenoso onde estão implantadas as árvores. No lado esquerdo da foto percebe-se uma drenagem saindo do meio do plantio; essas drenagens espalham-se entre os talhões formando uma malha retangular e tem por finalidade o escoamento do excesso de água dos plantios, principalmente nos períodos de altas taxas de precipitação. Ao fundo, tem-se a fisionomia característica da região: áreas de campo com capões de mato.



**Figura 8** - Fotografia aérea da área de estudo, sentido leste-oeste.

Fonte: TREFLOR

### **3.2 Trabalho de Campo**

Os dados de inventário florestal foram levantados por Berra (2010) e Krebs (2010) nos plantios da TREFLOR. Os dados foram coletados durante os meses de setembro e outubro de 2010 em povoamentos jovens de *Pinus elliottii*, plantados entre os períodos de 2002 a 2005.

Os talhões inventariados estão destacados na Figura 9. O inventário foi sistemático com alocação de unidades de amostra proporcional à área, na intensidade de uma unidade a cada 6 hectares. Cada unidade amostral (U.A.) tinha área fixa de 420m<sup>2</sup>, com lados proporcionais ao espaçamento de plantio de 20 x 21m (Figura 10).

Talhões de *Pinus elliottii* inventariados em setembro e outubro de 2010

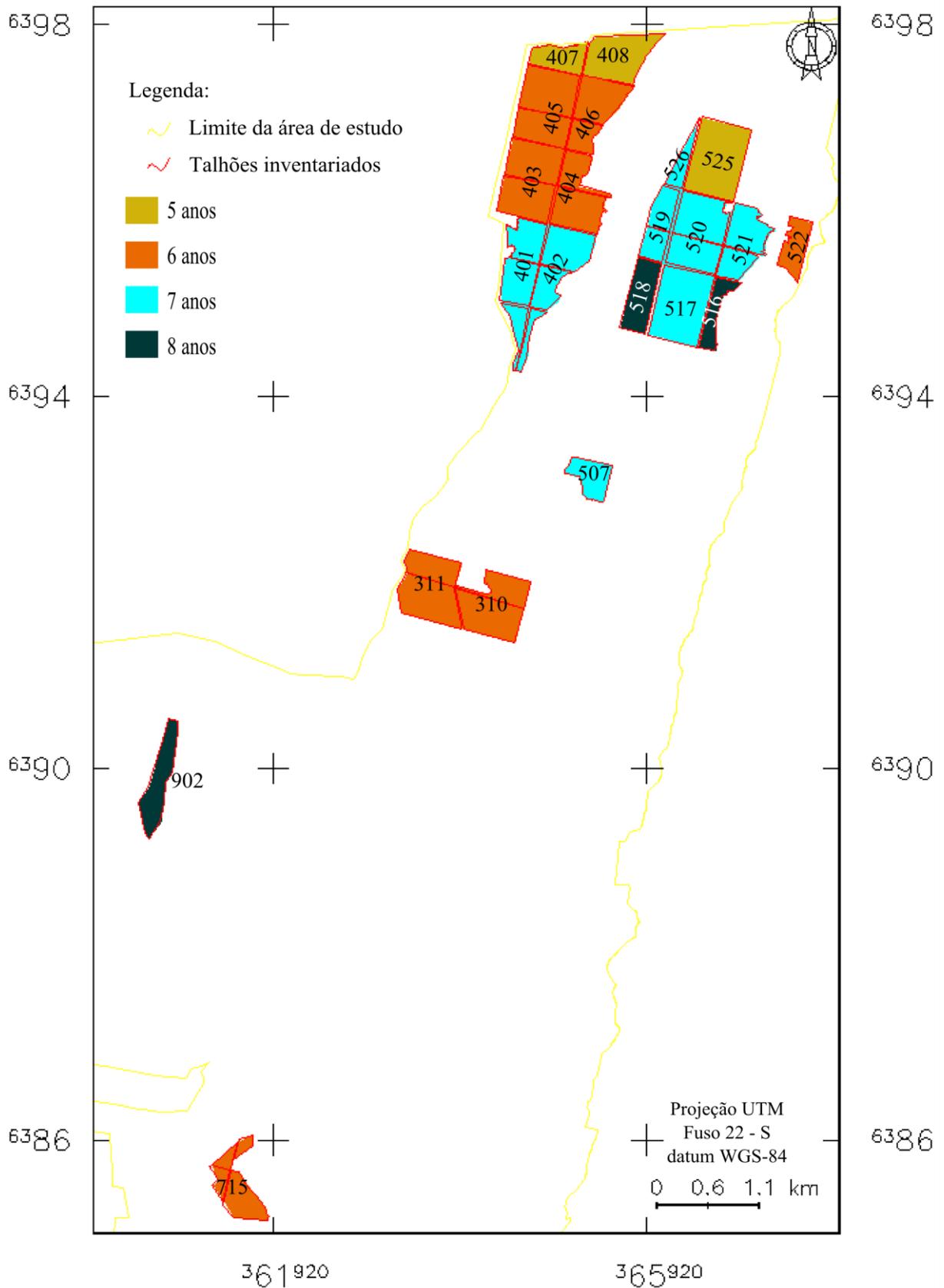
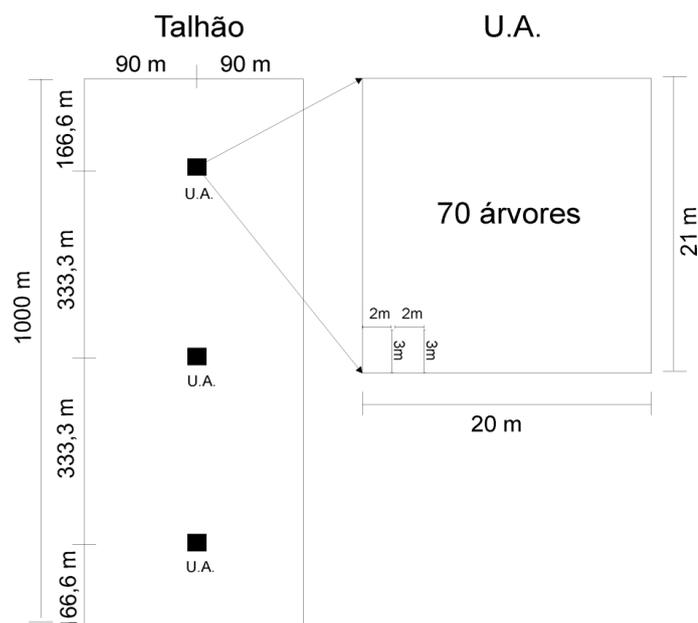


Figura 9 - Talhões de *Pinus elliottii* inventariados com idades entre 5 a 8 anos.



**Figura 10** - Croqui da disposição das unidades amostrais (U.A.) em um talhão simulado de 18 ha.

O tamanho padrão de cada U.A. foi definido em função do espaçamento padrão dos plantios das espécies florestais utilizados pela empresa, 3 x 2m e com área dentro da faixa de tamanho ótimo para unidades amostrais em povoamentos homogêneos determinado em pesquisas. Cada U.A. representou um número teórico de 70 árvores, onde cada árvore possuiria um espaço vital de 6 m<sup>2</sup> (70 árv. x 6 m<sup>2</sup> = 420 m<sup>2</sup>), conforme ilustrado na Figura 10.

O GPS Garmim Etrex Legend® foi empregado para a localização da U.A. no sistema de coordenadas UTM *datum* SIRGAS-2000. A coordenada foi tomada no centro da U.A.

### 3.2.1 Determinação do diâmetro das árvores

O diâmetro a altura do peito (dap) das árvores vivas foi medido com a suta dendrométrica. Cada diâmetro foi obtido pela média de duas medidas cruzadas a altura do dap (1,30 m) e anotado em formulário padronizado, com a respectiva altura. Foram contabilizados os dap's maiores ou iguais a 8 cm.

### 3.2.2 Determinação da altura das árvores

Para a determinação da altura das árvores (h) foi utilizada uma Prancheta Dendrométrica confeccionada na empresa. Foi feita uma visada no topo e na base da árvore, a

uma distância de 10m da mesma, determinada com o uso de uma trena. Nesta situação os valores marcados pelo pêndulo na régua correspondiam à medida da altura parcial, com uma precisão de 0,5m. Pelo fato dos talhões se encontrarem em terreno plano não foi necessário corrigir o efeito da declividade sobre as medições.

### 3.2.3 Cálculo do inventário florestal

Para a determinação dos valores estimados no inventário, com base nos dados obtidos a campo, através da amostragem, utilizaram-se as equações matemáticas descritas a seguir (FINGER, 1992):

- Área Basal

$$G = \frac{10000}{420} \times \sum_{i=1}^n \pi \frac{d_i^2}{4} \quad (3)$$

Onde:

G= Área basal por hectare (m<sup>2</sup>/ha);

10000= Área de 1 ha;

420= Área da Unidade Amostral (20 x 21m);

$\pi$  = Valor de PI (3,141593);

d<sub>i</sub>= Diâmetro a altura do peito, em metros, da árvore i.

- Volume de madeira (toras)

$$V = \frac{10000}{420} \times \sum_{i=1}^n g_i \times h_i \times 0,5 \quad (4)$$

Onde:

V= Volume por hectare (m<sup>3</sup>/ha);

10000= Área de 1 ha;

420= Área da Unidade Amostral (20 x 21m);

g<sub>i</sub>= Área basal da árvore i;

h<sub>i</sub>= Altura da árvore i;

0,5= Fator de forma.

### 3.3 Algumas características do povoamento inventariado

A área de *Pinus elliottii* inventariada corresponde a um plantio de 2ª rotação, ou seja, é a segunda vez que a espécie é implantada na mesma área. Assim, as mudas desta 2ª rotação foram implantadas em um solo com grande acúmulo de material orgânico (serapilheira), herança da 1ª rotação. A Figura 11 ilustra essa situação, onde está detalhado um dos talhões inventariados quando este possuía mudas com aproximadamente um ano de idade. Nota-se

solo exposto (Areia) na estrada; já dentro do talhão aparecem somente algumas manchas esporádicas de solo exposto e, nas demais partes têm-se mudas ou serapilheira cobrindo o solo.

O plantio é efetuado em talhões, também definido como unidades de produção, com o objetivo de produzir árvores homogêneas dentro dos limites do mesmo. Neste, são implantadas mudas da mesma espécie e com a mesma idade, resultando em um povoamento comercial equiâneo. Além disso, técnicas de manejo, como poda e desbastes, são utilizadas de forma a produzir árvores mais homogêneas possíveis dentro do talhão.

Contudo, percebeu-se em alguns talhões inventariados alta variabilidade nos dados amostrados. O que pode ser explicado, principalmente, pelos efeitos de sítio e presença de leiras dentro dos talhões.



**Figura 11** - Imagem de um dos talhões inventariados quando o mesmo possuía em torno de um ano de idade.

Fonte: Modificado de Google Earth (2013)

Diferentes condições de sítio foram observadas internamente em alguns talhões. Isto faz com que plantas com o mesmo potencial (mesma idade e mesma espécie) cresçam a taxas diferentes. Assim, enquanto U.A's levantadas em sítios relativamente bons apresentaram altos valores de volume de madeira, U.A's levantadas em sítios ruins apresentaram baixos valores de volume, para um mesmo talhão. Este fato gera dados com alta variabilidade, quando a população considerada é o talhão. A Tabela 2 mostra este fato, onde se observa, por exemplo, a U.A. 8 com 11,41 m<sup>3</sup>/ha enquanto que a U.A. 6 apresenta 62,28 m<sup>3</sup>/ha.

**Tabela 2** - Exemplo de um talhão inventariado com alta variabilidade (coeficiente de variação de 51%) (Projeto 4 – Talhão 8).

Unidade Amostral	Volume de madeira (m <sup>3</sup> /ha)
1	19,84
2	18,36
3	26,59
4	48,68
5	46,30
6	62,28
7	43,13
8	11,41
9	18,99
10	30,17

Outro fator que contribuiu para a alta variabilidade dos dados inventariados foram as leiras, as quais são ilustradas na Figura 11. No sistema de colheita adotado na 1ª rotação, as árvores eram cortadas, retiradas as toras e os restos culturais eram empilhados em linhas (leiras). E, como o plantio é realizado, geralmente, no ano subsequente à colheita os restos culturais das leiras não conseguem se decompor, impossibilitando o plantio nestes locais na 2ª rotação. Assim, a cada 6-8 linhas plantadas, o que corresponde entre 18-24m, havia 1-2 linhas vazias devido aos restos culturais. Isso implica em efeito de borda para as árvores plantadas ao lado da leira, ou seja, crescimento superior tanto em altura como em diâmetro, quando comparado às demais árvores.

Assim, a presença das leiras deve afetar a resposta espectral nas imagens. Contudo, como as leiras são espaçadas sistematicamente dentro dos talhões, esse efeito deve estar presente em todos os talhões considerados, influenciando nos resultados finais de forma similar.

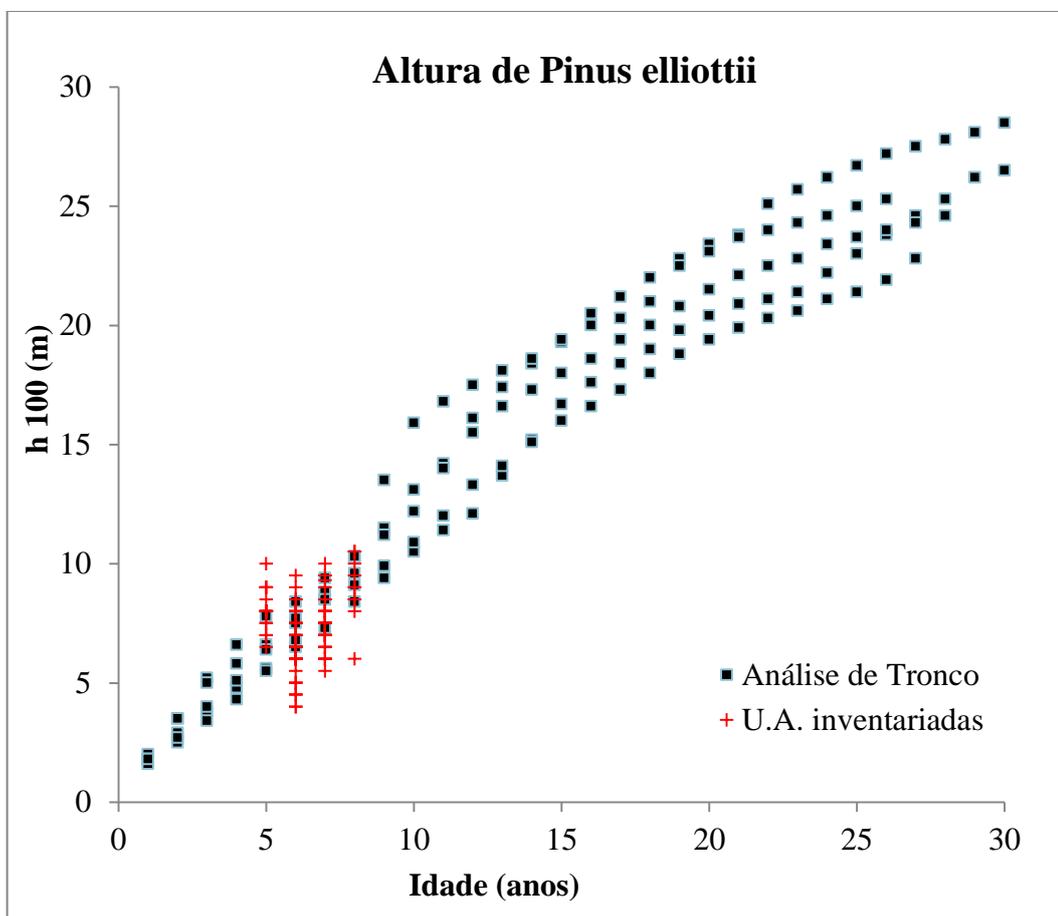
### **3.4 Medidas encontradas nos plantios de *Pinus elliottii* adultos**

Além da amostragem da altura e dap nos povoamentos jovens, Berra (2010) e Krebs (2010) selecionaram algumas árvores adultas (fechando um ciclo de rotação), prontas a serem colhidas, para realizar a análise de tronco. Esta técnica permite observar como foi o crescimento da árvore no passado.

Na Figura 12 são apresentadas as alturas dominantes h100 (sendo uma técnica de estimativa das alturas das 100 árvores mais grossas por hectare) medidas no inventário (U.A.

inventariadas) e as reconstituídas de árvores adultas (Análise de Tronco). Observa-se que as árvores alcançam 30 anos de idade, com uma altura final variando entre 20-30 metros, dependendo das condições do sítio. O sítio também influencia no dap, onde nos melhores sítios foram constatados dap's em torno de 50 cm e nos piores sítios dap's em torno de 25 cm ao final da rotação.

Quanto ao volume de madeira produzido nos povoamentos ao fim de um ciclo de rotação a Tabela 3 apresenta a faixa aproximada de valores. Com base em alguns talhões colhidos nos anos de 2011 e 2012, os resultados apontam talhões menos produtivos retornando em torno de 250 m<sup>3</sup>/ha, enquanto talhões mais produtivos passam dos 550 m<sup>3</sup>/ha.



**Figura 12** - Distribuição das alturas dominantes (h100) observadas em amostras temporárias do inventário florestal (U.A. inventariadas) e estimadas pela análise de tronco de 5 árvores. Onde h100 refere-se a altura das 100 árvores mais grossas por hectare. Fonte: Adaptado de Berra (2010)

**Tabela 3** - Estimativa do volume de madeira de *Pinus elliottii* colhido por hectare na TREFLOR, Rio Grande, RS.

ID	Ano de colheita	Volume (m <sup>3</sup> /ha)
III 1	2012	603,02
III 2	2012	590,56
III 5	2011	536,77
III 6	2011	330,08
X 6	2011	222,41
VII 6	2011	329,48
VI 35	2012	648,43
VI 36	2012	407,83
VI 37	2012	265,26
VI 38	2012	576,63

Nota: Os valores de m<sup>3</sup>/ha foram estimados a partir das toneladas de madeira (toras) pesadas na balança da empresa considerando uma densidade média de 800 kg/m<sup>st</sup> e fator de conversão de m<sup>3</sup> para m<sup>st</sup> de 1,4. Além disso, foram adicionados 50 m<sup>3</sup>/ha referentes às pontas das toras que ficam no campo.

### 3.5 Imagens de Satélite

Foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 5 e ResourceSat-1. Quanto ao Landsat 5, foram utilizadas imagens do sensor TM, órbita-ponto 221/83 do dia 07 de setembro de 2010. Quanto ao ResourceSat-1, foram utilizadas as imagens do sensor LISS-III, órbita-ponto 328/103 na data de 26 de setembro de 2010. Desta maneira, as duas cenas coincidem com o período de realização do inventário florestal (setembro e outubro de 2010).

Ressalta-se que o critério inicial para escolha das imagens de satélite foi a disponibilidade de dados de média resolução espacial (melhor que 30 m) de forma gratuita disponível na data de interesse. Assim, como os dois sensores, LISS-III e TM, haviam imageado a área de estudo resolveu-se utilizar os dados de ambos dentro de um enfoque comparativo de resultados.

Como o sensor LISS-III possui 4 bandas espectrais, foram selecionadas somente as 4 bandas equivalentes do sensor TM para as análises, a fim de possibilitar a comparação dos resultados.

#### 3.5.1 Conversão de nível digital para radiância espectral incidente ao sensor

Nesta etapa os valores de nível digital (ND) da imagem original foram transformados em valores de radiância espectral em cada banda, que é um valor com significado físico.

Para fazer a transformação de ND em radiância, foi resolvida a equação de regressão linear simples para cada banda espectral (Equação 1), utilizando os parâmetros que são fornecidos (e atualizados) pelos responsáveis pelo satélite (LUIZ et al., 2003), os quais são expostos na Tabela 4. Assim, tem-se como saída valores de radiância em watts/m<sup>2</sup>.esterradiano.mm no topo da atmosfera (ou no sensor) nos intervalos correspondentes às bandas espectrais.

**Tabela 4** - Parâmetros de calibração radiométrica do sensor TM/Landsat 5 e LISS-III/ResourceSat-1 com os intervalos espectrais, radiância mínima ( $L_{\min\lambda}$ ) e máxima ( $L_{\max\lambda}$ ) e irradiância solar exoatmosférica média ( $ESUN_{\lambda}$ ).

<sup>1</sup> Sensor TM						
Banda	Intervalo espectral	Comprimento de onda central	Largura da banda	$L_{\min\lambda}$	$L_{\max\lambda}$	$ESUN_{\lambda}$
Unidades	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	W/m <sup>2</sup> sr	W/m <sup>2</sup> sr	W/m <sup>2</sup>
2	0,528 - 0,609	0,569	0,081	-2,84	365,00	1826,00
3	0,626 - 0,693	0,660	0,067	-1,17	204,30	1554,00
4	0,776 - 0,904	0,840	0,128	-1,51	206,20	1036,00
5	1,567 - 1,784	1,676	0,217	-0,37	27,19	215,00
<sup>2</sup> Sensor LISS-III						
2	0,520-0,590	0,561	0,072	0	120,64	1846,77
3	0,620-0,680	0,655	0,066	0	151,31	1575,50
4	0,770-0,860	0,817	0,090	0	157,57	1087,34
5	1,550-1,700	1,629	0,138	0	69,03	236,65

Nota: Fonte: <sup>1</sup>Chander et. al. (2009a) e <sup>1</sup>NASA (2012 c)  
<sup>2</sup>Chander et. al. (2008) e <sup>2</sup>Pandya et. al. (2007)

### 3.5.2 Conversão de radiância espectral incidente ao sensor para reflectância de superfície

Radiâncias no sensor foram então convertidas para reflectância de superfície corrigindo tanto os efeitos solares como os atmosféricos. Tal etapa foi realizada utilizando o módulo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) do software Envi v.4.5, o qual provê meios acurados de compensação dos efeitos atmosféricos considerando a elevação, vapor d'água e aerossol (ADLER-GOLDEN et al., 1999). O FLAASH incorpora o código de transferência radiativa MODTRAN4 (*Moderate Resolution*

*Atmospheric Transmission*) (ENVI, 2008), o qual é descrito por alguns autores (BERK et al., 2003, 1998; ALDER-GOLDEN et al., 1999). Zakaria (2010) descreve com maiores detalhes o funcionamento do FLAASH.

Além de parâmetros da própria imagem, foram definidos, para os dois sensores, os seguintes parâmetros de entrada no FLAASH:

- *Atmospheric model*: Mid-Latitude Summer;
- *Aerosol model*: Rural;
- *Aerosol retrieval*: None;
- *Initial Visibility* (km): 100.

Como resultado de saída obtiveram-se imagens reflectância de superfície (Fator de Reflectância Bidirecional de superfície) em cada banda espectral.

### 3.5.3 Correção geométrica

O georreferenciamento das imagens com informação de reflectância de superfície foi feito com a finalidade de localizar espacialmente as Unidades Amostrais inventariadas sobre as imagens para que se pudessem relacionar os dados espectrais com os dados do inventário florestal.

O georreferenciamento foi feito a partir de 12 pontos de controle levantados na área de estudo. A coleta foi feita com um GPS Garmin Etrex Legend® no sistema de coordenadas UTM *datum* SIRGAS-2000.

O interpolador bilinear foi utilizado durante o processo de reamostragem da imagem original. O RMSE (*Root Mean Square Error*) do georreferenciamento foi menor que 0,5 pixel para as imagens dos dois sensores.

Sabe-se que o interpolador vizinho mais próximo apresenta a vantagem de conservar o atributo do pixel durante a reamostragem, sendo, por isso, amplamente utilizado. Contudo, como neste caso pretende-se relacionar a reflectância da imagem com uma variável biofísica e, dada as dimensões da U.A. (20 x 21m), o erro da localização da U.A. e o erro da localização dos pontos de controle corre-se grande risco, usando vizinho mais próximo, de não se identificar corretamente a reflectância pertencente à área U.A. Já ao se utilizar a média dos 4 pixels mais próximos com o interpolador bilinear tem-se como vantagem a grande probabilidade de que a reflectância da área amostrada em campo está contida na localização da U.A.

Além disso, a escolha do interpolador teve como base o fato de que para esta mesma área de estudo e com a mesma cena TM/Landsat 5 descrita na seção 3.5, Berra et al. (2012c) compararam a precisão das estimativas de volume de madeira geradas por NDVI oriundo de imagem georreferenciada utilizando o interpolador vizinho mais próximo e utilizando o bilinear; os resultados apontaram que tanto o erro padrão da estimativa quanto o desvio foram menores com o interpolador bilinear.

### 3.5.4 Bandas espectrais e índices de vegetação

Na área de estudo, o pixel da imagem contendo a unidade amostral, nos dois sensores, foi identificado e a reflectância das quatro bandas espectrais extraída. As bandas espectrais foram utilizadas tanto individualmente como na forma de índices de vegetação para caracterizar espectralmente a floresta sob análise. Os IV's compostos a partir das quatro bandas espectrais são expostos na Tabela 5.

Da Tabela 5, têm-se dois IV's clássicos, o SR e NDVI, os quais exploram o fato da vegetação ser altamente reflectiva no IVP e absorver fortemente no visível. O MVI substitui a banda do visível do NDVI por uma do infravermelho médio. Segundo Carreiras et al. (2007), o MVI é sensível a umidade da vegetação, melhorando o contraste entre a vegetação e áreas secas, e é menos afetado por efeitos atmosféricos. Já o GNDVI usa a região espectral do verde ao invés da região do vermelho do NDVI, para aumentar a sensibilidade quanto à presença de clorofila (GITELSON et al., 1996). Huete (1988) desenvolveu o SAVI para minimizar os efeitos induzidos pelo solo (*background*), especialmente em áreas de dossel aberto.

A partir destes IV's já estabelecidos na literatura (aqui ditos IV's originais para diferenciação) foram testados os IV's ajustados. Com exceção do SAVI, os demais índices foram modificados ou ajustados, os quais são identificados pela extensão “\_i” logo após o IV, Tabela 5. Para o SAVI não foi aplicada modificação alguma em virtude deste já possuir um fator de ajuste (L).

Estudos demonstram que índices de vegetação não acompanham o aumento da biomassa florestal a partir de determinados valores, ou seja, saturam (BARET e GUOYT, 1991; RONDEAUX et al., 1996; SOUSA, 1997). A hipótese assumida foi que, como a idade do povoamento (i) começa em 0 anos (plantio) e vai aumentando naturalmente até o corte, ou Idade de Rotação (IR), a idade possa ser usada como um fator de ajuste para os IV's, afim de que os valores destes novos IV's continuem crescendo com o aumento da biomassa. Uma vez que a idade é correlacionada positivamente com a biomassa (DACOSTA, 2008) e é de fácil

obtenção em plantios comerciais em virtude da sua importância para as práticas de manejo (ENCINAS et al., 2005). Desta forma espera-se que o ajuste pela idade possa melhorar o sinal do IV no alvo florestal.

**Tabela 5** - Índices de Vegetação testados.

Índice de vegetação	Fórmula	Autor
SR	$\frac{\rho_{IVP}}{\rho_V}$	Jordan (1969)
SR_i	$\frac{\rho_{IVP}}{\rho_V} \times \frac{i}{IR}$	
NDVI	$\frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V}$	Rouse et al. (1973)
NDVI_i	$\frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V} \times \frac{i}{IR}$	
SAVI	$\frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V + L} \times (1 + L)$	Huete et al. (1988)
GNDVI	$\frac{\rho_{IVP} - \rho_{verde}}{\rho_{IVP} + \rho_{verde}}$	Gitelson et al. (1996)
GNDVI_i	$\frac{\rho_{IVP} - \rho_{verde}}{\rho_{IVP} + \rho_{verde}} \times \frac{i}{IR}$	
MVI	$\frac{\rho_{IVP} - \rho_{IFM}}{\rho_{IVP} + \rho_{IFM}}$	Souza e Ponzoni (1998)
MVI_i	$\frac{\rho_{IVP} - \rho_{IFM}}{\rho_{IVP} + \rho_{IFM}} \times \frac{i}{IR}$	

Nota:  $\rho_{IVP}$  = Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) no infravermelho próximo  
 $\rho_V$  = FRB no vermelho  
 $\rho_{IFM}$  = FRB no infravermelho médio  
 $\rho_{verde}$  = FRB no verde  
 $L = 0,5$  (Constante que minimiza o efeito do solo e pode variar de 0 a 1)  
 \_i = Sinal indicando que o índice de vegetação foi ajustado pela idade  
 $i$  = Idade do povoamento (variou de 5 a 8 anos)  
 $IR$  = Idade de rotação do povoamento (30 anos)

Assim, foi testada a idade do povoamento como fator de ajuste nos IV's originais gerando os IV's ajustados (IV\_i).

### 3.6 Avaliação e comparação dos sensores LISS-III/ResourceSat-1 e TM/Landsat 5

A avaliação e comparação foram realizadas com os valores de reflectância de superfície. Portanto, a avaliação foi realizada somente com um alvo, ou seja, a resposta da vegetação coincidente com a localização das 111 U.A's dos plantios de *Pinus elliottii*.

Uma vez que todos os valores de reflectância estavam selecionados, os mesmos foram plotados em gráficos do tipo dispersão. Em cada gráfico, a reflectância de uma banda do sensor TM foi comparado com a reflectância da banda equivalente do sensor LISS-III. A linha de reflectância esperada 1:1 também foi plotada para referência. Um ajuste por mínimos quadrados foi feito para os dados em cada banda, retornando o ganho e o desvio da calibração cruzada como os coeficientes da equação linear.

Gráficos representando as diferenças em porcentagem nas observações usando LISS-III relativas aos dados TM foram construídos. A reflectância do TM foi plotada no eixo das abscissas, e a diferença percentual na reflectância do LISS-III relativa ao TM foi plotado no eixo das ordenadas. A diferença percentual refere-se a:

$$\text{Diferença (Bx)} = \frac{(Bx_{\text{LISS-III}} - Bx_{\text{TM}})}{Bx_{\text{TM}}} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

Diferença (Bx) = Diferença (%) entre as bandas espectrais equivalentes Bx;

$Bx_{\text{(LISS-III)}}$  = Banda espectral x do sensor LISS-III;

$Bx_{\text{(TM)}}$  = Banda espectral x do sensor TM.

Análises de Variância (ANOVA) foram realizadas a 5% de probabilidade, para cada uma das bandas espectrais, considerando-se dois tratamentos (TM e LISS-III), cada um com 111 repetições (111 U.A's). O valor de reflectância espectral em cada U.A. foi considerado como uma unidade amostral de um experimento inteiramente casualizado. O objetivo foi identificar a ocorrência de diferenças estatísticas entre os dois tratamentos, que indicariam a sensibilidade da variável em questão quando observada por diferentes sensores.

### 3.7 Análise da relação entre variáveis biofísicas e variáveis espectrais

Dois conjuntos de dados foram utilizados na análise das relações entre os dados oriundos do plantio e os dados espectrais oriundos dos sensores LISS-III e TM:

- 1) Dados biofísicos: dap (cm), altura (m), volume de madeira (m<sup>3</sup>/ha) e área basal (m<sup>2</sup>/ha);
- 2) Dados espectrais: reflectância de superfície das bandas espectrais e índices de vegetação.

A primeira etapa consistiu na análise estatística somente dos dados biofísicos. Esta consistiu de estatística descritiva, análise de correlação linear de Pearson e gráficos de dispersão.

Como foi observado um significativo e forte correlacionamento linear entre as variáveis biofísicas escolheu-se somente uma delas para se investigar as relações com os dados espectrais. Em termos de importância, o volume torna-se a variável em destaque uma vez que indica a produtividade do povoamento, além do que, a equação alométrica estimadora do volume já utiliza o dap e a altura em sua formulação, contemplando, portanto, as duas variáveis medidas no inventário.

Desta forma optou-se por investigar a relação entre os dados espectrais e o volume de madeira. Para isso, foram plotados gráficos de dispersão entre o volume e as reflectâncias espectrais e entre volume e os IV's, para cada sensor.

Primeiramente, nos gráficos de dispersão entre as reflectâncias e o volume, uma curva de regressão foi ajustada para verificar a linearidade da relação. Após, foram calculados os coeficientes de correlação linear de Pearson ( $r$ ) para este conjunto de dados. Como neste tipo de estudo são esperadas tanto relações lineares como não lineares, os valores de correlação linear entre o volume e as reflectâncias foram calculados de duas maneiras, tal como Ardö (1992): 1) com as variáveis na forma natural e, 2) com o logaritmo natural das variáveis. O objetivo foi observar em quais conjuntos de variáveis e em que magnitude o logaritmo melhorou o  $r$ .

As significâncias das diferenças nas associações lineares encontradas pelos dois sensores foram testadas pela estatística  $Z$ . A significância da diferença de coeficientes de correlação ( $\rho$ ) de duas amostras (para  $n > 25$ , onde  $n$  refere-se aos pares de dados) pode ser testada por (MONTGOMERY et al., 2006; LIRA, 2004):

$$H_0 : \rho_1 - \rho_2 = 0$$

$$H_1 : \rho_1 - \rho_2 \neq 0$$

A estatística do teste é definida pela Equação 7:

$$Z = \frac{Z_1 - Z_2}{\sqrt{\hat{\sigma}_{Z_1}^2 + \hat{\sigma}_{Z_2}^2}} \quad (7)$$

Onde  $\hat{\sigma}_{Z_1}$  e  $\hat{\sigma}_{Z_2}$  são obtidos pelas Equações 8 e 9, respectivamente:

$$\hat{\sigma}_{Z_1} = \frac{1}{\sqrt{n_1 - 3}} \quad (8)$$

$$\hat{\sigma}_{Z_2} = \frac{1}{\sqrt{n_2 - 3}} \quad (9)$$

Os valores de  $Z_1$  e  $Z_2$  podem ser obtidos substituindo-se os valores de  $\rho_1$  e  $\rho_2$  nas Equações 10 e 11, respectivamente:

$$Z_1 = \frac{1}{2} \times \ln \left[ \frac{1 + \rho_1}{1 - \rho_1} \right] \quad (10)$$

$$Z_2 = \frac{1}{2} \times \ln \left[ \frac{1 + \rho_2}{1 - \rho_2} \right] \quad (11)$$

A tabela de Distribuição Normal Padrão Acumulada fornece os valores das probabilidades de  $Z$  para decidir sobre as hipóteses. Rejeita-se  $H_0$  quando  $Z > 1,96$ , a um nível de confiança de 95%.

Na sequência, foram investigadas as relações entre os IV's e o volume de madeira. Gráficos de dispersão foram feitos entre cada IV e o volume. Em cada gráfico duas regressões foram ajustadas: uma linear e uma curvilínea. O objetivo foi comparar os ajustes dos índices de vegetação originais frente aos índices de vegetação ajustados pela idade, principalmente quanto à linearidade das relações.

Na sequência os valores dos coeficientes de correlação linear foram calculados com as variáveis na forma natural e na forma logarítmica. Com os valores de  $r$ , comparações gráficas foram feitas para observar as diferenças encontradas entre as associações lineares produzidas por cada IV, nos dois sensores. A estatística  $Z$ , Equação (7), foi utilizada para testar a significância das diferenças entre os coeficientes de correlação linear.

### 3.8 Análise de regressão

Para determinar quais as variáveis provenientes das imagens de sensoriamento remoto que melhor estimam o volume de madeira se utilizou análise de regressão. Foram consideradas como variáveis independentes as espectrais e como dependente o volume de

madeira observado. Este tipo de relação estatística pode ser classificada como empírica (STENBERG et al., 2004; ZAKARIA, 2010).

Na análise de regressão aplicada em imagens de sensoriamento remoto, a variável causal física resulta em um comportamento espectral capaz de ser observado através das imagens. Então, a medida biofísica assume a posição de variável dependente ou a ser estimada (BORBA, 2003).

Utilizou-se regressão linear simples e múltipla. Algumas variáveis foram utilizadas na forma logarítmica e outras na forma natural, de acordo com as análises das correlações lineares e gráficos de dispersão descritos na seção anterior. Tradicionalmente, transformam-se as variáveis de alguns modelos não-lineares de forma a linearizar a relação e a permitir a sua análise através da regressão linear (ESTEVES, 2010).

Na regressão linear simples, descrita por Montgomery et al. (2006), uma única banda espectral ou um único IV foi utilizado como variável dependente. Para a análise envolvendo todos os dados provenientes das imagens que melhor estimassem os valores da variável dependente utilizou-se a análise de regressão múltipla, empregando-se para tanto o modelo de regressão *stepwise*, explicado por De Veaux (1995).

Das regressões ajustadas, visando julgar qual equação que estimou mais acuradamente a variável em campo foram analisados o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj.}$ ), erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ), valor de F calculado, desvio e distribuição dos resíduos. Este procedimento corrobora com outros autores (SCHNEIDER, 1997; ORUÉ, 2002; FERNANDES et al., 2011). Em geral, conforme Ahamed et al. (2011), um alto valor de  $R^2$  ou baixo  $S_{yx}$  frequentemente indica um bom modelo.

De acordo com Gomes e Garcia (1993) quando se tem equações com número diferentes de parâmetros, os valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) não são diretamente comparáveis. Para torná-los comparáveis, é usual calcular o coeficiente de determinação ajustado  $R^2_{aj.}$ , dado pela Equação (12):

$$R^2_{aj.} = 1 - \frac{n-1}{n-p-1} \times (1 - R^2) \quad (12)$$

Onde:

$R^2_{aj.}$  = Coeficiente de determinação ajustado;

$R^2$  = Coeficiente de determinação;

$n$  = É o número de níveis da variável independente, e;

$p$  = É o número de coeficientes de variáveis na equação de regressão.

O erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ) e o desvio foram usados para comparar os volumes de madeira estimados com os valores oriundos do inventário florestal. O  $S_{yx}$  e o desvio foram calculados da seguinte maneira (MÄKELÄ e PEKKARINEN, 2004):

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (13)$$

$$\text{Desvio} = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{y}_i - y_i}{n} \quad (14)$$

Onde:

$\hat{y}_i$  = É o valor estimado;

$y_i$  = É o valor observado;

$n$  = É o número de observações.

Ao final, foram selecionados os modelos com os melhores ajustes. Foram selecionados dois modelos estimadores de volume de madeira para o sensor TM e dois modelos para o sensor LISS-III.

### 3.9 Mapas de volume de madeira

As equações selecionadas na etapa anterior foram utilizadas para a inversão dos valores de reflectância, ou IV's, das imagens de satélite em valores de volume de madeira em m<sup>3</sup>/ha. Desta forma os valores dos pixels passaram a representar uma variável biofísica.

Esta etapa gerou como produto dois mapas de volume de madeira, um para cada sensor. Além da informação qualitativa, uma tabela de volume foi organizada para comparar as estimativas alcançadas pelo inventário florestal com as estimativas obtidas pelo TM e LISS-III.

Dos dados do inventário florestal foram resgatados, por talhão, a média dos volumes de madeira estimados, o Intervalo de Confiança (IC) para esta média e o coeficiente de variação. Dos mapas de volume de madeira estimado pelos dois sensores foram calculados, também por talhão, o volume médio e o respectivo coeficiente de variação. Desta forma, foi possível observar em quais talhões as estimativas alcançadas pelas imagens de satélite estavam dentro do IC do inventário.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Avaliação e comparação das reflectâncias recuperadas dos sensores LISS-III/ResourceSat-1 e TM/Landsat 5

A Tabela 6 mostra que as bandas das imagens multiespectrais que apresentaram uma maior amplitude são as correspondentes às bandas do infravermelho médio (B5), seguido da banda do infravermelho próximo (B4), enquanto a banda do verde (B2) apresenta a menor amplitude. Esses resultados corroboram com resultados encontrados por Orué (2002) trabalhando com ETM+. Já o coeficiente de variação (CV) foi maior para as bandas do vermelho (B3). As bandas do LISS-III apresentaram uma menor variabilidade comparada com as do TM.

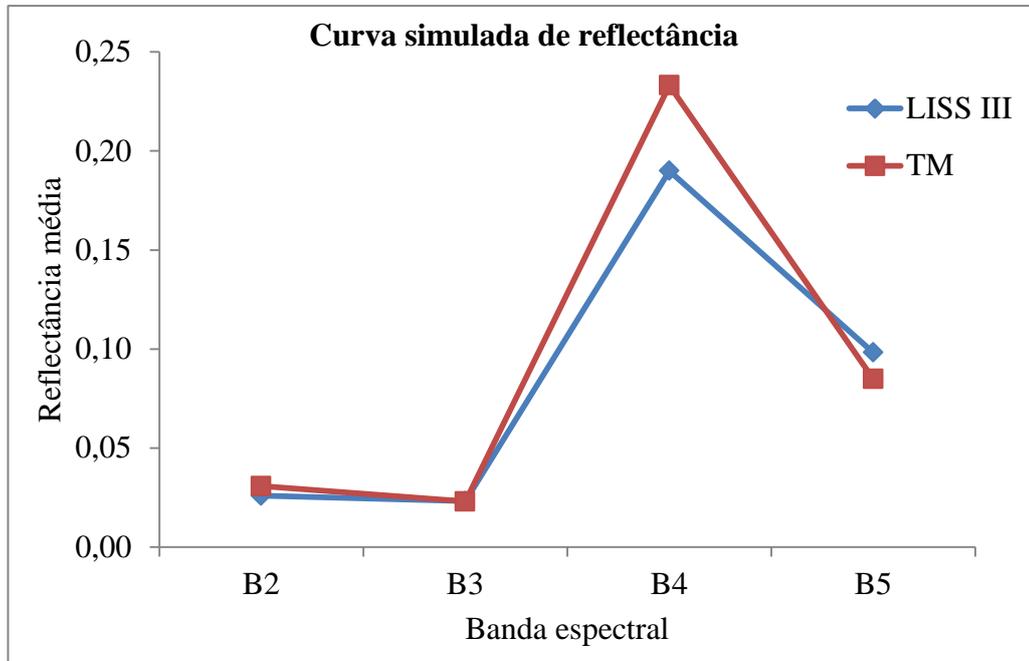
**Tabela 6** - Estatísticas descritivas da reflectância espectral de superfície das bandas equivalentes dos sensores LISS-III e TM de 111 pixels de um povoamento de *Pinus elliottii*.

Banda	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Amplitude	CV (%)
LISS B2	0,0259	0,0051	0,0197	0,0418	0,0222	19,52
LISS B3	0,0232	0,0092	0,0117	0,0561	0,0444	39,55
LISS B4	0,1900	0,0203	0,1397	0,2349	0,0951	10,66
LISS B5	0,0982	0,0307	0,0628	0,2131	0,1503	31,27
TM B2	0,0307	0,0065	0,0205	0,0497	0,0292	21,16
TM B3	0,0230	0,0112	0,0078	0,0614	0,0536	48,47
TM B4	0,2332	0,0267	0,1576	0,2905	0,1329	11,46
TM B5	0,0848	0,0320	0,0496	0,2114	0,1618	37,77

Nota: B2 = Referente à banda espectral do verde  
 B3 = Referente à banda espectral do vermelho  
 B4 = Referente à banda espectral do infravermelho próximo  
 B5 = Referente à banda espectral do infravermelho médio  
 Amplitude = Máximo – Mínimo  
 CV = Coeficiente de variação

Com os valores médios das reflectâncias espectrais, Tabela 6, construiu-se o gráfico da Figura 13. Este gráfico apresenta o comportamento espectral das amostras de *Pinus elliottii* nas bandas do verde (B2), do vermelho (B3), IVP (B4) e infravermelho médio (B5). A curva simulada com os valores de reflectância é característica de coberturas vegetais (para uma vegetação verde e sadia), uma vez que se observa baixa reflectância no visível (vermelho

absorvendo mais que o verde), um aumento da reflectância no IVP e um novo decréscimo da reflectância no IVM. Este resultado indica que a recuperação dos valores de reflectância a partir dos ND das imagens originais foi coerente. As duas curvas apresentaram a mesma tendência (direção), com uma diferença mais acentuada de magnitude na banda do IVP (B4).

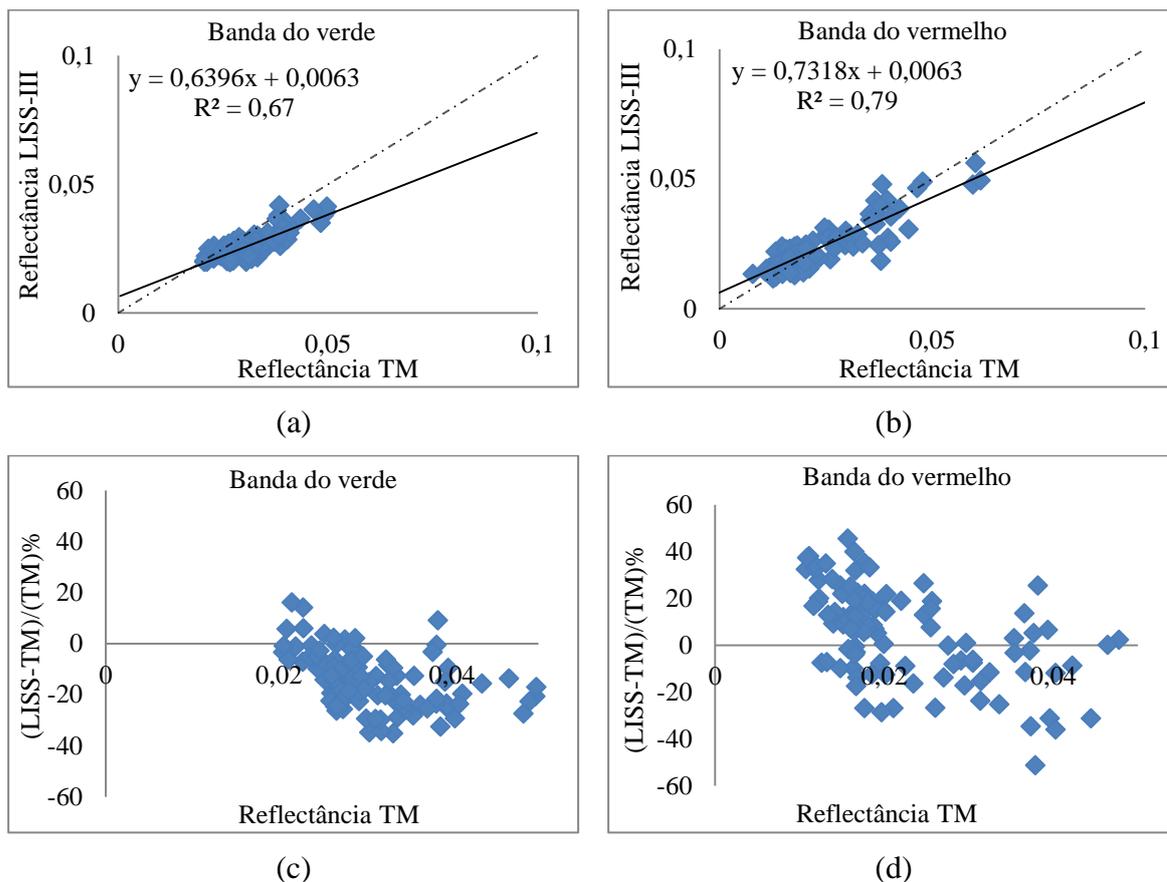


**Figura 13** – Média da reflectância espectral de superfície de 111 pixels (111 unidades amostrais) em povoamento de *Pinus elliottii* nas quatro bandas espectrais equivalentes dos sensores LISS-III e TM.

Nota: B2 = Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) no verde  
 B3 = FRB no vermelho  
 B4 = FRB no infravermelho próximo  
 B5 = FRB no infravermelho médio

Os resultados das comparações das bandas equivalentes com a respectiva regressão ajustada são apresentados na Figura 14 e Figura 15. Em cada figura, nos gráficos superiores (letras a e b) a reflectância do TM é plotado no eixo x, e a reflectância do LISS-III é plotada no eixo y. A linha 1:1 (linha pontilhada) indica o perfeito ajuste entre as medidas de reflectância obtidas por ambos os sensores para uma particular banda. O coeficiente angular da regressão representa a relação de ganho entre os dois sensores. Os gráficos na parte inferior das figuras (letras c e d) representam as diferenças em percentagem nas observações usando LISS-III relativas aos dados TM. A reflectância do TM é plotada no eixo x, e a diferença percentual na reflectância do LISS-III relativa ao TM é plotado no eixo y.

Na banda do verde (Figura 14 a) a maioria dos pontos se localiza abaixo da linha 1:1. A diferença aumentou à medida que os valores de reflectância crescem, com a inclinação da reta de regressão (0,63). No gráfico das diferenças percentuais, Figura 14 (c), predominam valores negativos, indicando que o sensor LISS-III recuperou menor reflectância do que o TM (em média 14,7% menos). Pela ANOVA, Tabela 7, as reflectâncias observadas na banda 2 são estatisticamente diferentes entre os dois sensores.



**Figura 14** - Comparação das reflectâncias entre as bandas equivalentes nos sensores TM e LISS-III: a) Banda do verde, b) Banda do vermelho, c) diferença percentual referente a banda do verde e, d) diferença percentual referente a banda do vermelho.

A Figura 14 (b) resume os resultados da comparação da reflectância para a banda do vermelho (banda 3), a qual apresentou padrão semelhante à banda 2. Em média o LISS-III detectou 6,3% mais reflectância que o TM. Contudo, nota-se que os valores mais baixos de reflectâncias estão acima da linha 1:1 e, à medida que as reflectâncias vão aumentando, os dados tendem a aparecer abaixo da linha 1:1. Esta tendência é mensurada pela inclinação da reta de regressão (0,73). No gráfico das diferenças percentuais os pontos ora se localizam

acima e ora abaixo da diferença zero. Esse comportamento explica o resultado da ANOVA, Tabela 7, onde as reflectâncias detectadas pelo TM não foram estatisticamente diferentes das detectadas pelo LISS-III na banda do vermelho.

**Tabela 7** - ANOVA's aplicadas às bandas espectrais 2 e 3 do TM e LISS-III.

Banda 2	SQ	gl	QM	F	Banda 3	SQ	gl	QM	F
Tratamento	0,0012	1	0,00128	37,83*	Tratamento	1,07E-06	1	1,07E-06	0,01 <sup>ns</sup>
Resíduo	0,0074	220	0,00003		Resíduo	2,29E-02	220	1,04E-04	
Total	0,0087	221			Total	2,29E-02	221		

Nota: \* Significativo ao nível de confiança de 95%  
 ns = Não significativo ao nível de confiança de 95%  
 SQ= Soma de quadrados  
 gl= Graus de liberdade  
 QM= Quadrado médio  
 F= Valor de F calculado

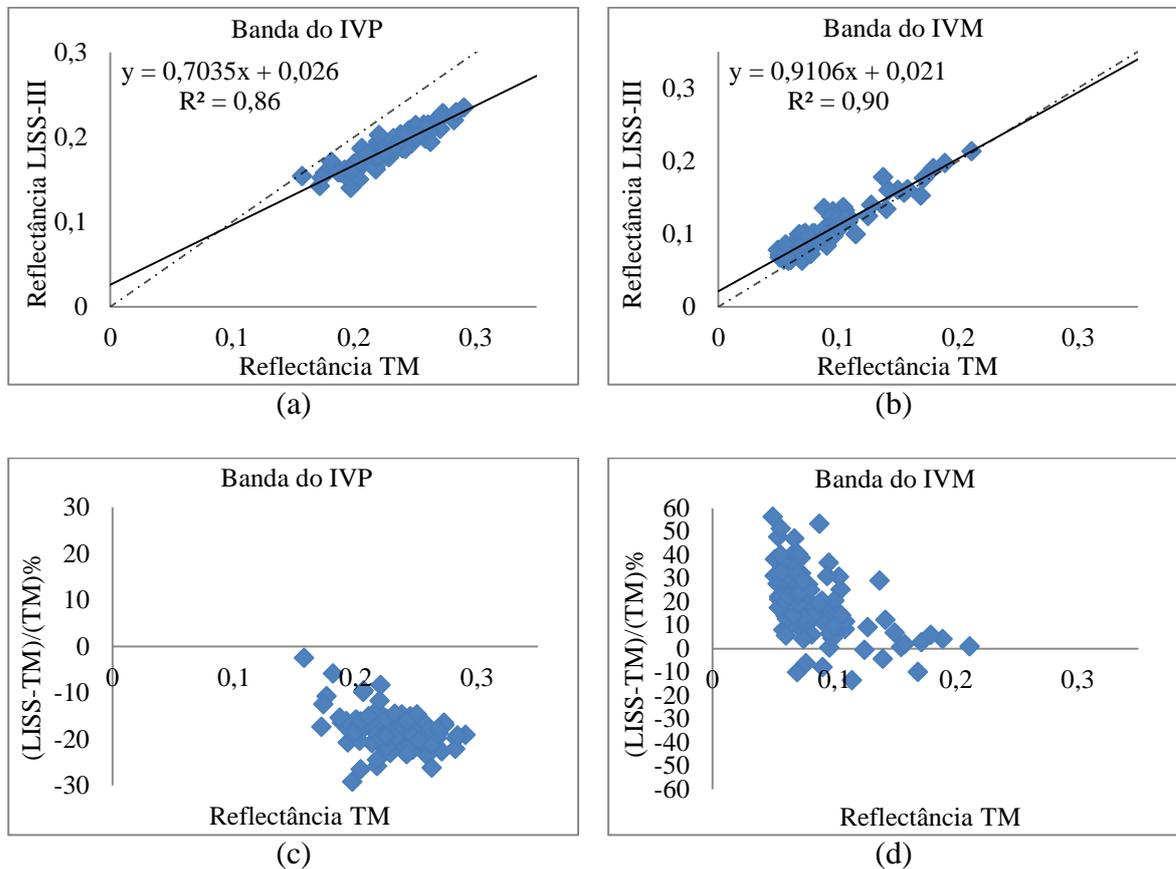
Para a banda do IVP (Banda 4), mostrada na Figura 15, todos os pontos estão abaixo da linha 1:1. Em média, o sensor LISS-III detectou 18,3% menos reflectância que o TM, o que pode ser observado nas diferenças percentuais sempre negativas (Figura 15 c). A inclinação da linha de regressão para a banda 4 foi 0,70 e a ANOVA, Tabela 8, confirmou que as reflectâncias observadas na banda 4 são estatisticamente diferentes para os dois sensores.

Na banda do infravermelho médio (Banda 5) a maioria dos pontos, apesar de muito próximos, mostravam valores acima da linha 1:1. O sensor LISS-III estimou em média 18,4% mais reflectância do que o TM, como pode ser também visualizado no gráfico das diferenças percentuais (Figura 15 d). Nesta banda houve tendência semelhante à verificada nas bandas 2 e 3, sendo a inclinação da regressão de 0,91. Para a banda 5 as reflectâncias foram estatisticamente diferentes, Tabela 8.

Os coeficientes angulares menores que 1 em todas as bandas espectrais indicaram que, a medida que os valores de reflectância dos plantios foram aumentando, o sensor TM recuperou valores mais elevados de reflectância que o LISS-III. Ainda nas Figuras 14 e 15, os coeficientes de determinação variando entre 0,67 ( $r=0,81$ ) a 0,90 ( $r=0,95$ ) indicam que, em geral, as bandas equivalentes apresentaram alta similaridade.

Alguns trabalhos anteriores compararam a resposta dos sensores LISS-III/ResourceSat-1 e TM/Landsat 5 e reportaram a similaridade existente: Chander et al. (2008) reportaram valores de  $R^2$  de 0,99 para cada banda, com diferenças na reflectância em todas as bandas de cerca de 13%; Anderson et al. (2011) compararam dados dos dois sensores através

de valores de NDVI durante três anos. Para o ano de 2005 encontraram um  $R^2=0,85$ , em 2006 um  $R^2=0,81$  e 2007 um  $R^2=0,52$ . Os autores explicaram que em 2007 houve intensa atividade antrópica na área de estudo.



**Figura 15** - Comparação das reflectâncias entre as bandas equivalentes nos sensores TM e LISS III: a) Banda do infravermelho próximo (IVP), b) Banda do infravermelho médio (IVM), c) diferença percentual referente a banda do IVP e, d) diferença percentual referente a banda do IVM.

**Tabela 8** - ANOVA's aplicadas às bandas espectrais 4 e 5 do TM e LISS-III.

Banda 4	SQ	gl	QM	F	Banda 5	SQ	gl	QM	F
Tratamento	0,1034	1	0,10343	183,98*	Tratamento	0,009	1	9,95E-03	10,11*
Resíduo	0,1236	220	0,00056		Resíduo	0,216	220	9,85E-04	
Total	0,2271	221			Total	0,226	221		

Nota: \* Significativo ao nível de confiança de 95%

SQ= Soma de quadrados

gl= Graus de liberdade

QM= Quadrado médio

F= Valor de F calculado

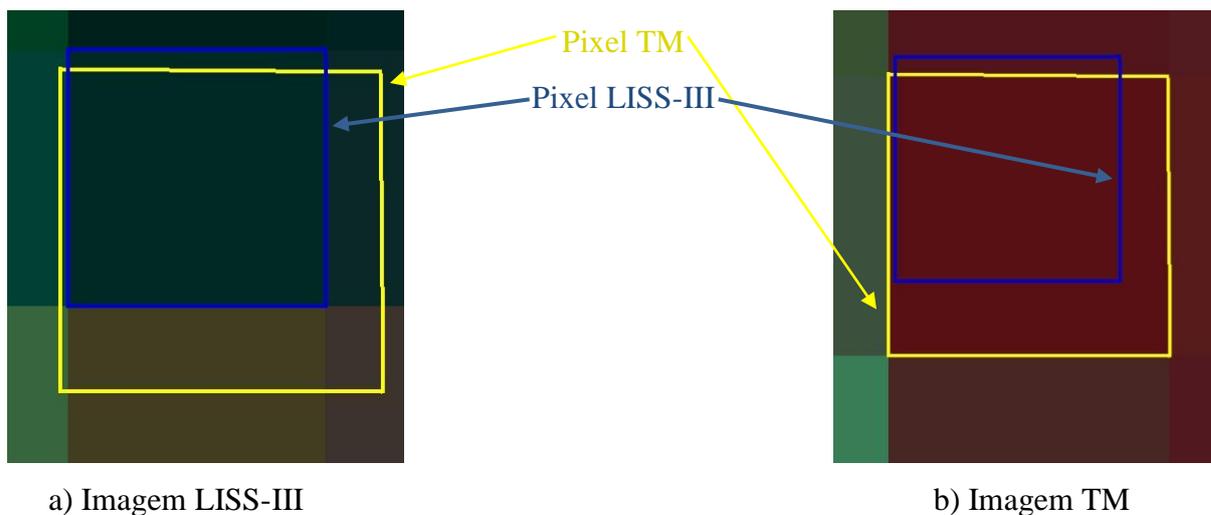
Ripple et al. (1991) utilizaram imagens TM/Landsat 5 e HRV/SPOT de dosséis de coníferas em Oregon, EUA, com uma diferença de 5 dias. Para as bandas equivalentes encontraram um  $r$  de 0,93 para o verde, 0,87 para o vermelho e 0,97 para o IVP.

Apesar da similaridade entre os sensores, os gráficos das diferenças relativas (Figura 14 e 15) evidenciam as diferenças nas bandas supostamente equivalentes. O que era esperado, uma vez que existem vários fatores que podem contribuir para a variabilidade das informações geradas. Chander et al. (2009b) compararam a reflectância no topo da atmosfera dos sensores AWiFS/ResourceSat-1 e TM/Landsat 5 e comentaram que as diferenças entre os dois sensores são provavelmente causadas pela combinação da assinatura espectral do alvo terrestre, composição atmosférica e as características da curva da resposta espectral relativa (RSR – *Relative Spectral Response*) de cada sensor. Estudos reportaram a influência do solo (GAO et al., 2000; HUETE et al., 1994; HUETE, 1988), da atmosfera (KAUFMAN, 1989; HUETE e LIU, 1994), geometria de visada (PANDYA et al., 2000; BURGESS e PAIRMAN, 1997; EPIPHANIO e HUETE, 1995) e características do sensor (PANDYA et al., 2007; GALVÃO et al., 2000, TEILLET et al., 2001) na determinação de reflectância.

Assim, uma combinação de fatores age em conjunto na determinação da resposta espectral final, os quais delimitam a precisão dos resultados. Abaixo são destacados alguns pontos como explicativos das diferenças encontradas.

Primeiro tem-se que as larguras das bandas equivalentes dois sensores são diferentes. Pandya et al. (2007) comentam que um dos parâmetros influenciando a resposta espectral do sensor, usualmente representada como uma curva RSR, é dado pela largura de banda. Assim, dois sensores recebendo a mesma radiância devem produzir uma resposta espectral diferente.

Outro fator contributivo das diferenças pode ser as distintas resoluções espaciais dos sensores. Enquanto o TM possui um pixel de 30x30m, o LISS-III tem 23,5x23,5m, ou seja, a razão da resolução espacial entre os dois sensores é 1,27 (30/23,5), ilustrada na Figura 16. Isto significa que um pixel do TM está integrando a radiância de uma área de 900 m<sup>2</sup> enquanto o pixel do LISS-III integra uma área de 552 m<sup>2</sup>. Para a área de estudo, sabendo que o plantio está espaçado em 3x2m, significa que o pixel TM integra a resposta espectral de aproximadamente 150 árvores, enquanto o pixel LISS-III integra aproximadamente 92 árvores. Mesmo o plantio sendo homogêneo quanto à composição de espécies, cada árvore tende a ser estruturalmente diferente da outra, mesmo que minimamente. Isso faz com que amostras de tamanhos diferentes devam apresentar respostas espectrais diferentes umas das outras.



**Figura 16** – Porção da imagem LISS-III (a) e da imagem TM (b) ilustrando as diferenças entre as dimensões do pixel LISS-III, em azul, e as dimensões do pixel TM, em amarelo.

Outra fonte das diferenças decorre da data do imageamento: A imagem TM utilizada é do dia 07/09/2010 (às 10:09 hs, hora local) enquanto a LISS-III é do dia 26/09/2010 (às 10:39 hs, hora local), portanto há um intervalo de 19 dias entre as datas e, em relação ao horário, uma diferença de 30 min. Neste sentido, Chander et al. (2008), comparando sensores do Landsat e ResourceSat-1, utilizaram imagens desses satélites do mesmo dia, apenas com a diferença de 30 minutos entre as passagens. Ainda assim, os autores comentam que uma fonte de erro nos resultados pode ter sido a suposição de que a reflectância do terreno nas cenas de estudo foi submetida a alterações mínimas entre as passagens dos satélites. Segundo os autores, isto pode não ser verdade para algumas áreas incluindo regiões com água, terras cultiváveis em condições instáveis de vento e áreas próximas a nuvens que podem ter tido mudanças drásticas na umidade entre as passagens dos satélites.

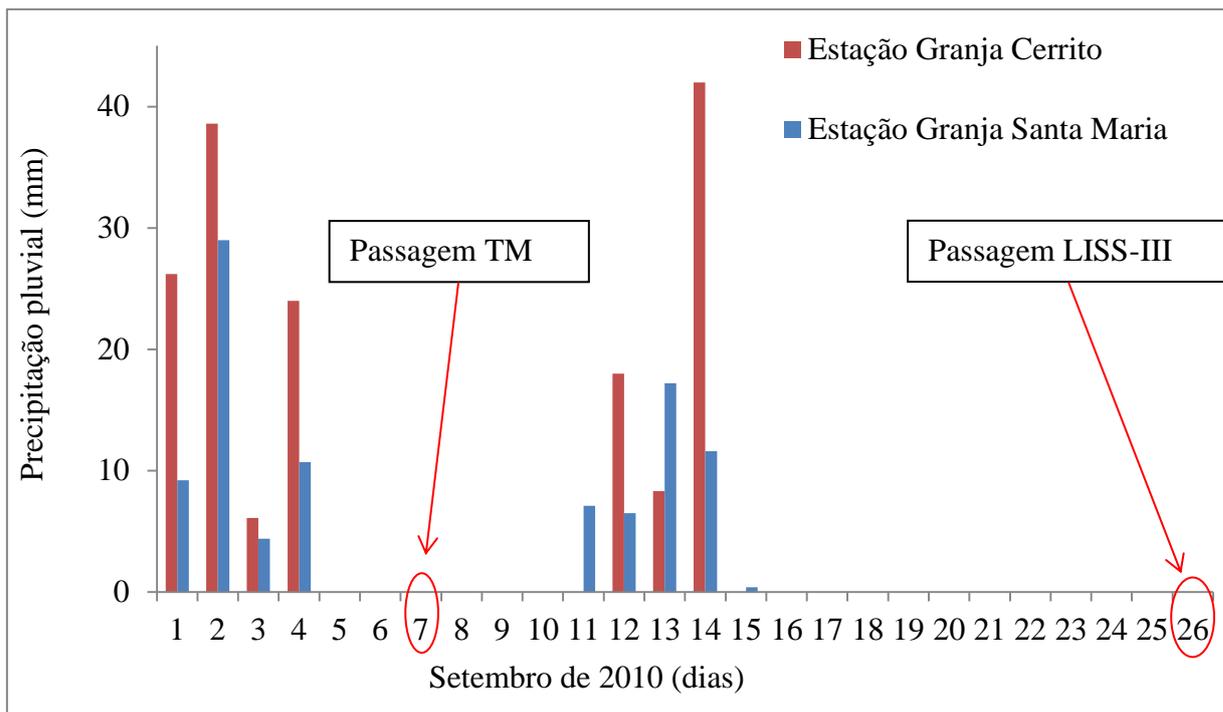
Agora, considerando a escala de tempo de 19 dias neste estudo, é grande a probabilidade de que a reflectância do terreno (dossel) tenha sofrido considerável alteração. Apesar da reflectância de superfície ter sido estimada no ambiente FLAASH, o qual leva em consideração as características de espaço e tempo do satélite, além da condição de visibilidade no dia do imageamento, os efeitos da interferência atmosférica são apenas minimizados. Os principais constituintes da atmosfera que afetam a radiação nos comprimentos de onda do visível e IVP são moléculas, aerossóis, gases permanentes, ozônio e vapor d'água. A estimativa de todas essas fontes de ruídos atmosféricos requer medidas detalhadas *in situ* e

modelagem baseada em equações de transferência radiativa (PANDYA et al., 2002). Também, o vento, a umidade e a temperatura controlam o microclima dentro da floresta, o que influencia nas taxas fotossintéticas das folhas e conseqüentemente na quantidade de energia solar absorvida e/ou refletida.

Além disso, o teor de umidade da classe de fundo (neste caso a serapilheira) influencia na quantidade de energia refletida e, sabendo que este teor é influenciado pela ocorrência de chuvas, foram investigados junto às estações de monitoramento da Agência Nacional das Águas (<http://portalsnirh.ana.gov.br/>) a ocorrência de chuvas nos dias precedentes à passagem do Landsat 5 (07/09/2010) e do ResourceSat-1 (26/09/2010). Duas estações foram localizadas à aproximadamente 25 km a noroeste da área de estudo (Estação Granja Cerrito e Estação Granja Santa Maria), cujos dados estão expostos na Figura 17. Nesta figura percebe-se a ocorrência de chuva entre os dias 01 e 04, permanecendo seco até o dia 07 quando o Landsat 5 realizou a passagem; voltou a chover entre os dias 11 e 15, permanecendo sem chuvas até a passagem do ResourceSat-1, no dia 26. Assim, o TM observou a área de estudo após dois dias sem chuva e o LISS-III após 10 dias sem chuva, donde se pode inferir que no dia 07 de setembro o teor de umidade da classe de fundo deva ser diferente do teor de umidade no dia 26 de setembro. Este fato deve propiciar, portanto, uma interação entre a REM e a classe de fundo de maneira diferenciada em cada uma das datas.

Outro fator que merece destaque é resolução radiométrica. O TM possui  $2^8$  bits e o LISS-III tem  $2^7$  bits. Desta maneira, o TM apresenta maior sensibilidade para detectar pequenas diferenças na energia refletida em relação ao LISS-III. Esse parâmetro ajuda a explicar as diferenças obtidas nos intervalos das reflectâncias apresentados na Tabela 6. Observa-se que o intervalo entre o valor mínimo e máximo de reflectância foi sempre maior para o TM em todas as bandas espectrais, em relação ao LISS-III. Este fato evidencia a maior capacidade do TM de caracterizar ou separar espectralmente a floresta sob análise.

Como fatores contributivos para as diferenças podem ainda ser citados a interferência de ruídos nas bandas onde a sinal é baixo (CHANDER et al., 2004) (como na banda do vermelho onde observou-se o maior CV, Tabela 6), a degradação da sensibilidade do sensor após o lançamento (KAMEI et al. 2012; PANDYA et al., 2007; CHANDER et al., 2008) e o acúmulo de incertezas no processo de georreferenciamento (BERRA et al., 2012c). Foody et al. (2003) comentam que incertezas podem ir se acumulando em cada estágio do processamento das imagens e que esses problemas são inevitáveis.



**Figura 17** – Precipitação pluviométrica diária em duas estações de monitoramento ao sul do município de Rio Grande, RS.  
 Fonte: ANA (2013)

## 4.2 Relação entre variáveis biofísicas e variáveis espectrais

### 4.2.1 Análise das variáveis biofísicas

A Tabela 9 apresenta um resumo das características das variáveis biofísicas medidas e estimadas pelo inventário florestal nos povoamentos de *Pinus elliottii*. Observa-se que uma variação de 4 anos na idade do povoamento gera uma amplitude notável entre os valores máximos e mínimos das variáveis observadas, o que é típico de árvores de rápido crescimento. Parte das variações pode ser devida também às diferentes condições de sítio.

**Tabela 9** - Análise descritiva das variáveis biofísicas de povoamentos de *Pinus elliottii*.

	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV (%)
Idade (anos)	6,3	0,9	5,0	8,0	14,29
dap <sub>médio</sub> (cm)	12,3	3,2	5,6	17,9	26,02
h <sub>médio</sub> (m)	6,2	1,3	3,1	8,8	20,97
G (m <sup>2</sup> /ha)	17,9	10,2	2,2	44,9	56,98
Vol (m <sup>3</sup> /ha)	63,2	44,7	3,7	200,3	70,73

Nota: Mínimo = Valor mínimo observado

Máximo = Valor máximo observado

dap<sub>médio</sub> = Média do diâmetro a altura do peito dentro da Unidade Amostral

h<sub>médio</sub> = Média da altura total dentro da Unidade Amostral

G = Área basal estimada por hectare

Vol = Volume de madeira com casca estimado por hectare

CV = Coeficiente de variação

A análise da correlação entre as variáveis biofísicas mostrou que todas estão significativamente associadas (Tabela 10). Todas as correlações são diretas, estando de acordo com o desenvolvimento natural esperado de uma árvore (até antes da senescência), ou seja, à medida que passa o tempo (Idade) a árvore cresce em diâmetro (dap<sub>médio</sub>) e altura (h<sub>médio</sub>), aumentando a área basal (G) e volume de madeira (Vol). Os menores valores de correlação são observados nos pares de dados envolvendo a idade, cujo comportamento é analisado a seguir.

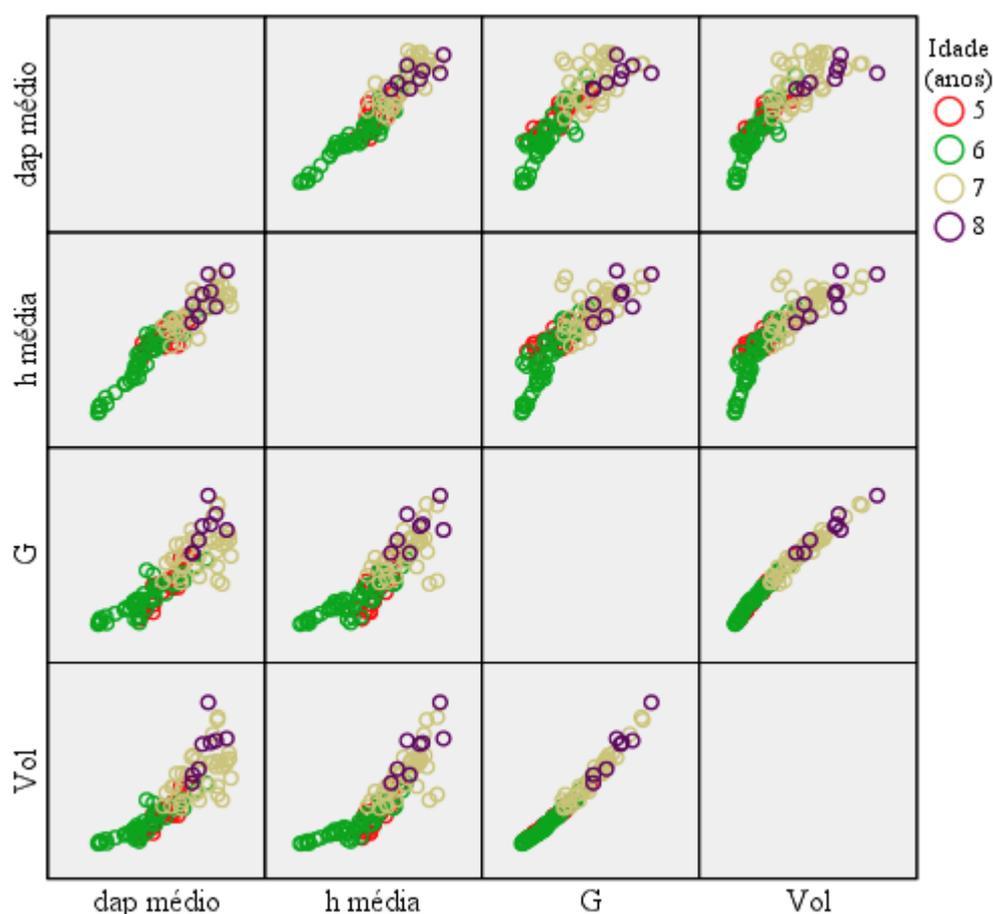
A Figura 18 apresenta uma matriz com gráficos de dispersão entre as variáveis biofísicas, onde fica ilustrado o relacionamento diretamente proporcional entre elas. Nestes gráficos, os pontos de dados estão destacados pela idade em anos, onde se observa um comportamento inesperado. Algumas U.A's com 6 anos apresentaram menores valores que U.A's de povoamentos com 5 anos de idade. Uma provável explicação para este fato, além

das diferentes condições de sítio, pode estar associada às diferentes disponibilidades hídricas anuais, o que, segundo Meng et al. (2007), pode gerar efeitos aleatórios nos dados.

**Tabela 10** - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as variáveis florestais.

	dap <sub>médio</sub>	h <sub>médio</sub>	G	Vol.	Idade
dap <sub>médio</sub>	1				
h <sub>médio</sub>	0,945**	1			
G	0,869**	0,861**	1		
Vol.	0,870**	0,876**	0,990**	1	
Idade	0,557**	0,507**	0,645**	0,661**	1

Nota: \*\* Significativo ao nível de confiança de 99%



**Figura 18** - Matriz de dispersão entre as variáveis biofísicas de um povoamento de *Pinus elliottii*, destacadas pela idade.

Nota: dap médio = Média do diâmetro a altura do peito dentro da Unidade Amostral

h médio = Média da altura total dentro da Unidade Amostral

G = Área basal estimada por hectare

Vol = Volume de madeira com casca estimado por hectare

Berra et al. (2012b) investigaram a relação entre o incremento volumétrico anual deste povoamento relacionando-o com dados de precipitação. Os resultados indicaram que para os talhões implantados em 2004 (6 anos) houve um incremento em volume abaixo do esperado, modificando a tendência esperada do comportamento do incremento médio anual (IMA) no tempo. O que pode ser explicado pelos dados de precipitação, os quais apontaram a ocorrência de seca no fim de 2004 e começo de 2005, o que deve ter prejudicado o desenvolvimento das mudas implantadas em 2004 acarretando em perdas de produtividade.

Assim, os moderados valores de correlação entre a idade e as demais variáveis, Tabela 10, podem ser atribuídos a este crescimento deficitário nos povoamentos com 6 anos de idade. Além disso, a variável idade apresenta somente 4 valores discretos (5, 6, 7 ou 8 anos) para serem associados à 111 diferentes valores contínuos das demais variáveis biofísicas.

Ainda sobre os resultados da Tabela 10, correlações diretas entre volume, área basal, idade, dap e altura têm sido demonstradas em diversos trabalhos. Em plantios de *Pinus* spp., Linhares e Ponzoni (2001) encontraram correlação significativa do volume com a idade (0,71), com o dap (0,74), com a altura (0,89) e com área basal (0,54); Machado et al. (2008) encontraram correlação entre volume e área basal de 0,83 em povoamento de *Mimosa scabrella* Benth.; Puhr e Donoghue (2000) em plantio de coníferas encontraram correlação entre área basal e altura de 0,84, entre área basal e idade de 0,77 e entre altura e idade de 0,87. Danson e Curran (1993) em floresta plantada de *Pinus nigra* var. *maritima* encontraram correlação de 0,83 entre idade e dap médio, e de 0,84 entre idade e altura média. Eles comentaram que essas relações foram, claramente, funcionalmente relacionadas com o crescimento e se aplicam tanto ao nível de árvores individuais quanto de povoamento.

Em vista deste forte correlacionamento entre as variáveis biofísicas (Tabela 10 e Figura 18) escolheu-se apenas o volume de madeira para investigar as relações com os dados espectrais. Mohamedain et al. (2012) comenta que o volume é a variável mais importante numa avaliação florestal. Franklin (1986) optou por investigar as relações entre área basal (G) e dados TMS (*Thematic Mapper Simulator*), mas comenta que G é intimamente relacionado com volume de madeira, biomassa e outras medidas estruturais da floresta.

#### 4.2.2 Relação entre o volume de madeira e as bandas espectrais

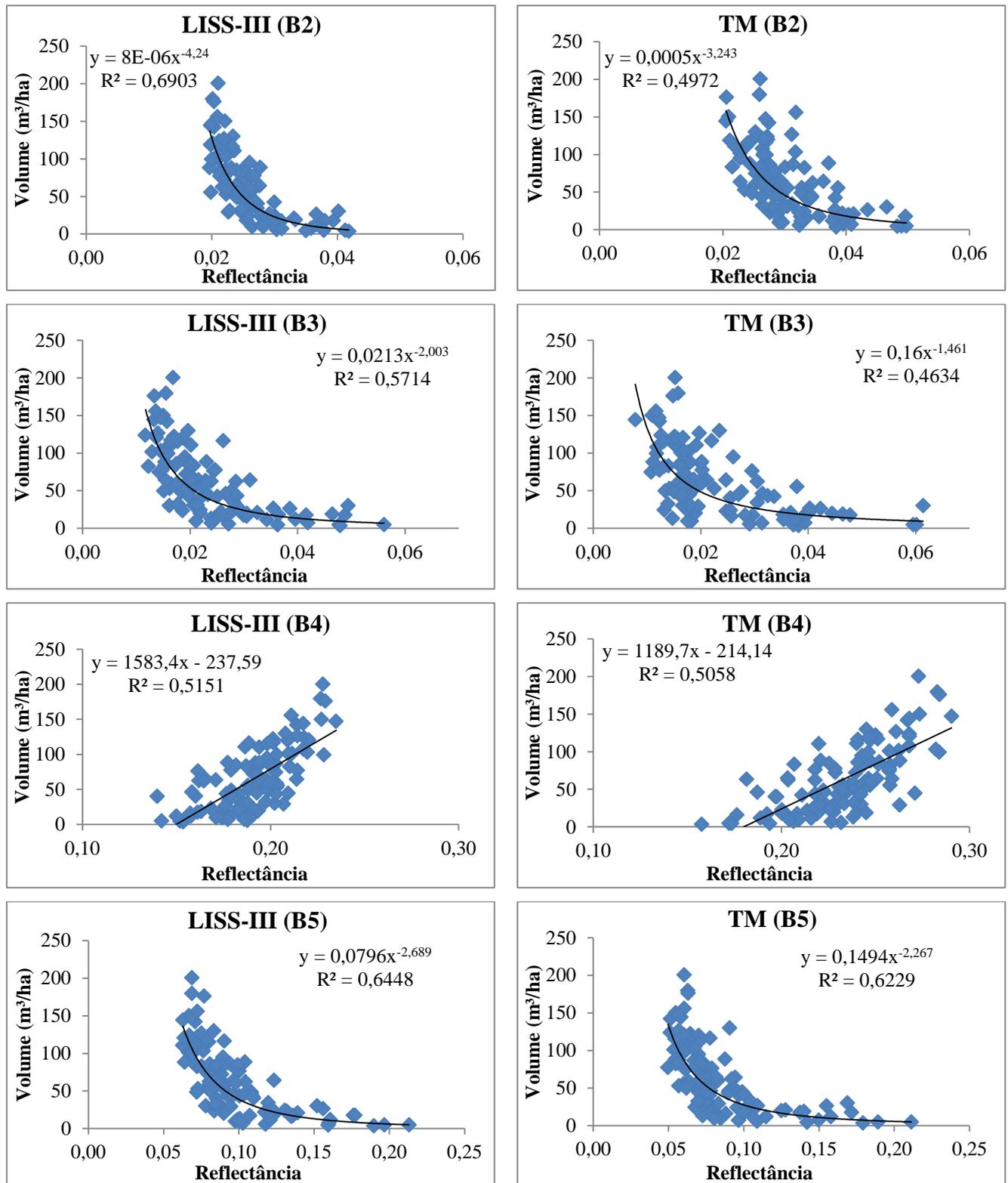
A Figura 19 apresenta os gráficos de dispersão para os pares de dados compostos pelo volume de madeira e as bandas espectrais dos sensores TM e LISS-III. Os ajustes com dados TM produziram  $R^2$  menores que aos ajustes com LISS-III. Estes menores  $R^2$  podem estar relacionados aos maiores coeficientes de variação do TM em relação ao LISS-III, Tabela 6.

No geral, as bandas dos dois sensores apresentaram as mesmas tendências, quer sejam relações diretas com as bandas do IVP e relações inversas com as demais bandas. Jensen (2009) comenta que desde 1960 pesquisadores observam essa tendência entre respostas espectrais e variáveis relacionadas com biomassa de plantas.

O crescimento em altura e diâmetro dos troncos aumenta o volume de madeira, Tabela 10. Este crescimento aumenta, conseqüentemente, a quantidade de folhas verdes nas copas (isto é válido para povoamentos jovens) modificando a intensidade dos sinais recebidos pelos sensores da seguinte maneira (Figura 19): nas bandas do visível (B2 e B3), o aumento do volume acarretou uma diminuição da reflectância, a qual pode ser atribuída ao aumento da absorção da radiação visível pelos pigmentos foliares (MYERS, 1970; GATES, 1970; WOOLLEY, 1971); no infravermelho médio (B5) a situação é a mesma, mas o aumento da absorção pode ser atribuído a presença de água nos tecidos vivos (GATES, 1970; KNIPLING, 1970; WOOLLEY, 1971); já no IVP (B4) o aumento de volume de madeira acarretou um aumento da reflectância, consequência do forte espalhamento e fraca absorção pelas folhas da copa (GAUSMAN et al., 1969; WOOLLEY, 1971).

De acordo com a consulta bibliográfica, em trabalhos de associação entre dados de campo florestais e imagens de satélite, são esperadas relações inversas entre as variáveis biofísicas florestais e as bandas espectrais do visível e IVM (FRANKLIN, 1986; RIPPLE et al., 1991; ARDÖ, 1992; BERRA et al., 2012a), já para o IVP as relações podem ser variadas (FRANKLIN, 1986; PETERSON et al., 1987; SPANNER et al., 1990; PUHR e DONOGHUE, 2000).

A relação direta encontrada entre o IVP e volume de madeira, Figura 19, pode ser atribuída a dois fatores fundamentais que caracterizam a floresta sob análise: a idade e forma de manejo. Os trabalhos que reportam relação inversa entre a banda do IVP e as variáveis florestais atribuem essa relação, principalmente, a presença de sub-bosque e/ou sombreamento (TROTTER et al., 1997; RIPPLE et al., 1991; PUHR e DONOGHUE, 2000). Spanner et al. (1990) observaram forte relação linear positiva entre IAF e a radiância da banda TM 4 somente nos povoamentos onde tinha pouca ou nenhuma contribuição do sub-bosque.



**Figura 19** - Gráficos de dispersão entre as reflectâncias espectrais e o volume de madeira para os sensores TM e LISS-III.

Nota: B2 = Banda espectral correspondente à região do verde  
 B3 = Banda espectral correspondente à região do vermelho  
 B4 = Banda espectral correspondente à região do infravermelho próximo  
 B5 = Banda espectral correspondente à região do infravermelho médio

O povoamento de *P. elliotii* onde foi realizado o inventário florestal foi manejado para não oportunizar o desenvolvimento de sub-bosque, ou mato-competição, na entrelinha de plantio, até o fechamento das copas. Assim, analisando a resposta espectral dentro de um talhão, e tendo em mente o conceito de pixel mistura, é de se esperar que: 1) a reflectância espectral da porção vegetação em um pixel deve ser devida apenas à copa das árvores de *P. elliotii*; 2) a reflectância espectral da porção solo deve ser devida a serapilheira acumulada no talhão, uma vez que esta cobre totalmente o solo arenoso onde está implantado o povoamento; 3) quanto às sombras, a influência deve ser mínima, por se tratar de um povoamento jovem, onde na maior parte das U.A's não tinha ocorrido o fechamento do dossel e também, em relação ao talhão, as árvores (mesma espécie e mesma idade) apresentam relativa homogeneidade em relação à altura, ou seja, todas as copas estão em um mesmo estrato evitando que uma sobreie a outra com grande intensidade (o que normalmente ocorre em florestas nativas e povoamentos comerciais mais velhos). Além do fato do terreno ser plano.

Assim, a ausência de sub-bosque, pouco sombreamento, uma camada de serapilheira constante e dossel aberto na maioria das U.A's fez com que a reflectância no IVP aumentasse com o aumento do volume. Quando a cobertura vegetal é incompleta, o sinal espectral mais forte é do brilho do solo ou sub-bosque, modificado pela quantidade de vegetação cobrindo ele (FRANKLIN, 1986). Peterson et al. (1986) concluíram que a área basal total pôde ser predita com maior sucesso em povoamentos jovens equiâneos; A radiância espectral ampla dos talhões com pequenos volumes ( $<150 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ ) pode ser explicado parcialmente pela quantidade menor de sombras, as quais resultarão em uma maior contribuição para a radiância espectral oriunda do solo e da cobertura vegetal (ARDÖ, 1992).

Ainda, como não tem sub-bosque, apenas serapilheira, tende a ocorrer um grande contraste entre o brilho da copa das árvores e o da serapilheira. Este fato pode ser bastante positivo, uma vez que, as diferenças nas respostas espectrais do dossel nas diferentes idades devem ser devido ao aumento do fechamento das copas (aumento da cobertura verde ou da porção vegetação). Carreiras et al. (2006) estimando cobertura de dossel de árvores por sensoriamento remoto adquiriram imagens no fim do verão, período onde o sub-bosque encontrava-se seco. Eles comentaram que este é um período adequado para a aquisição de imagens, pois permite um melhor contraste espectral entre o dossel e o sub-bosque.

Para Carreiras et al. (2006) a maior ou menor reflectância no IVP ou vermelho é relacionado com o tipo de classe de fundo (*background*). Eles observaram que, um aumento

na cobertura do dossel arbóreo, dentro do mesmo tipo de classe de fundo, mostrou um aumento da reflectância no IVP (TM 4) e um decréscimo no vermelho (TM 3).

Retornando aos gráficos da Figura 19, nota-se que, a partir de, aproximadamente, 150 m<sup>3</sup>/ha os valores de reflectância espectral tendem a saturar. Valores em torno e acima de 150 m<sup>3</sup>/ha foram levantados nos povoamentos com idade de 7 para 8 anos, sendo essas idades coincidentes com o começo do fechamento completo do dossel na área de estudo. Deste ponto em diante a influência da classe de fundo (serapilheira) na resposta espectral do dossel passa a ser mínima tendendo a dificultar a modelagem dos parâmetros biofísicos florestais por imagem de satélite, pois, uma vez que o dossel fecha, o volume de madeira é relacionado com a reflectância do dossel apenas através das variações no IAF (DANSON e CURRAN, 1993; FRANKLIN, 1986). Puhr e Donoghue (2000) concluíram que por causa da forte dependência da classe de fundo na reflectância da floresta é muito difícil prever a estrutura florestal a partir de dados Landsat TM uma vez que o fechamento da copa tenha ocorrido.

Ardö (1992) estudou as relações entre a radiância do TM/Landsat 5 e dados de volume de florestas produtivas (com valores entre 1 a 300 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>), cujas espécies dominantes eram *Pinus silvestris* e *Picea abies*. Ele separou o volume em duas classes (1-150 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>; 151-300 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>) e encontrou que as correlações com Ln TM5 (Logaritmo natural da banda 5 do TM) foram significativamente diferentes para as duas classes. Para a classe com menor volume houve uma melhor correlação ( $r=-0,81$ ), já a floresta com maior volume apresentou fraca correlação ( $r=-0,45$ ). Ardö (1992), concordando com Franklin (1986), explica que isso ocorre devido ao efeito de saturação que ocorre no sinal do sensor a partir do momento que a cobertura vegetal se aproxima dos 100%, haja vista que a área basal (e conseqüentemente o volume) continua aumentando com o envelhecimento do povoamento, porém o sinal recebido no sensor não é afetado por este aumento porque ele é mais sensível ao grau de fechamento das copas. Este comportamento tende a gerar relações não lineares entre as variáveis biofísicas e as espectrais.

Da Figura 19, observa-se comportamento não linear para os pontos de dados, com exceção da banda do IVP (B4). Esta alternância entre relações lineares e não lineares também foi encontrada por Puhr e Donoghue (2000), para os quais as relações entre a reflectância do TM nas bandas 1, 2 e 4 e as variáveis estruturais de floresta de coníferas foram lineares ou quase lineares, já com as bandas 3, 5 e 7 foram não lineares.

Comportamento não linear (mais especificamente curvilíneo ou log-linear) entre variáveis florestais e as derivadas de imagens de satélite também foram observadas por outros

autores (SPANNER et al., 1990; RIPPLE et al., 1991; ARDÖ, 1992; SALVADOR e PONS, 1998; BACCINI et al., 2004; GHAHRAMANY et al., 2012), sendo usual aplicar logaritmo nas variáveis para analisá-las por técnicas lineares e melhorar os resultados.

Em vista disso, as duplas de variáveis com comportamento curvilíneo, Figura 19, foram modeladas por equações na forma de potência, as quais são intrinsecamente lineares, ou seja, linearizáveis pela logaritimização. Spanner et al. (1990) também utilizou equações na forma de potência para modelar a relação entre IAF de floresta de coníferas com dados TM/Landsat 5.

A Tabela 11 apresenta os valores de correlação linear entre o volume e as bandas espectrais em dois formatos: 1) com as variáveis na forma natural e, 2) com o logaritmo natural das variáveis. Assim, pode-se observar na Tabela 11 em quais conjuntos de variáveis e em que magnitude o logaritmo aumentou o coeficiente de correlação linear de Pearson (r).

**Tabela 11** - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre o volume de madeira (Vol.) de *Pinus elliottii* e as bandas espectrais dos sensores TM e LISS-III.

Sensor e banda	Vol.	Sensor e banda	Ln (Vol.)
LISS_B2	-0,721**	Ln (LISS_B2)	-0,831**
LISS_B3	-0,641**	Ln (LISS_B3)	-0,756**
LISS_B4	0,718**	Ln (LISS_B4)	0,688**
LISS_B5	-0,675**	Ln (LISS_B5)	-0,803**
TM_B2	-0,627**	Ln (TM_B2)	-0,705**
TM_B3	-0,592**	Ln (TM_B3)	-0,681**
TM_B4	0,711**	Ln (TM_B4)	0,716**
TM_B5	-0,636**	Ln (TM_B5)	-0,789**

Nota: \*\* Correlação significativa ao nível de confiança de 99%

Ln= Logaritmo natural

B2 = Banda espectral correspondente à região do verde

B3 = Banda espectral correspondente à região do vermelho

B4 = Banda espectral correspondente à região do IVP

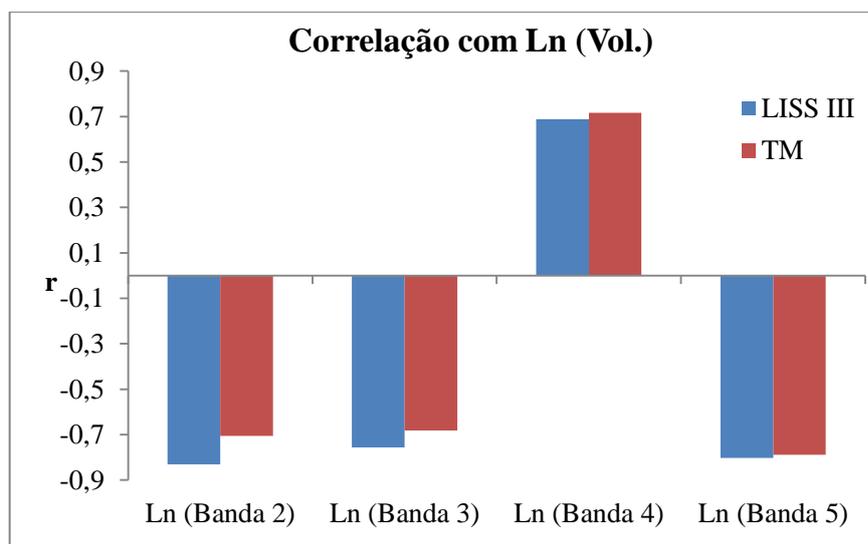
B5 = Banda espectral correspondente à região do infravermelho médio

Analisando os coeficientes de correlação linear entre as variáveis na forma natural, Tabela 11, observa-se que a banda do IVP, para os dois sensores, apresentou os maiores valores absolutos em relação às outras bandas. O que era de se esperar dado que foi a única banda com relacionamento linear com o volume, como apresentado nos gráficos de dispersão da Figura 19. Esses resultados coincidem com os de Ahern et al. (1991), Ripple et al. (1991), Trotter et al., (1997) e Orué (2002), que encontraram a refletância no infravermelho próximo como sendo a melhor correlacionada com o volume.

Já na análise com o logaritmo das variáveis, Tabela 11, os valores absolutos dos coeficientes de correlação aumentaram para todas as variáveis, exceto na banda do IVP (em virtude dela já apresentar associação linear com o volume, Figura 19). Assim, para o sensor LISS-III a mais forte correlação com o volume passou a ser com a banda do verde (B2) e a mais fraca com a banda do IVP (B4); para o sensor TM a mais forte correlação passou a ser com a banda do IVM (B5), já a mais fraca correlação foi com a banda do vermelho (B3).

Para Ripple et al. (1991), as transformações logarítmicas do volume de madeira de coníferas aumentaram os coeficientes de correlação para a maioria das bandas espectrais do HRV e TM. Segundo esses autores, isto foi provavelmente devido à natureza assintótica dessas relações. Para Ardö (1992) as correlações de volume de coníferas contra radiância espectral e contra o logaritmo da radiância espectral foram maiores que -0,70 para todas as bandas TM ( $p < 0,001$ ), exceto para TM 4, sendo que todos os resultados foram melhores com as transformações logarítmicas.

Visto que, à exceção da banda do IVP, Tabela 11, os valores de  $r$  obtidos pelo logaritmo foram maiores, estes foram escolhidos para compor o gráfico na Figura 20. A banda do IVP apresentou associação linear direta e as bandas do visível e a do infravermelho médio apresentaram associações inversas com a variável florestal, para os dois sensores, confirmando as tendências observadas na Figura 19.



**Figura 20** - Correlação linear de Pearson ( $r$ ) entre o logaritmo natural (Ln) do volume de madeira (Vol.) e o logaritmo natural das bandas espectrais.

Com exceção da banda 4, os valores de correlação obtidos pelo sensor LISS-III foram maiores em comparação ao TM, Figura 20 e Tabela 11. Alguns autores comentam que resoluções espaciais mais finas tendem a gerar melhores correlações com as variáveis biofísicas (DE WULF et al.,1990; RIPPLE et al., 1991; FRANKLIN e MCDERMID, 1993). Imagens Landsat TM (30 x 30m) e SPOT-1 *High Resolution Visible* (HRV) (20 x 20m) de dosséis de floresta de coníferas foram comparadas em suas relações com o volume de madeira por Ripple et al. (1991). Com exceção da banda do vermelho, os dados HRV obtiveram correlações ligeiramente superiores com volume de madeira do que os dados TM. Segundo os autores, isto foi provavelmente devido a maior resolução espacial do HRV, embora diferenças na localização e largura das bandas ou razão sinal ruído podem também ser fatores. Trotter et al. (1997) comentaram que uma melhora nas relações entre as variáveis florestais e os dados TM poderiam ser alcançadas utilizando dados pancromáticos do SPOT, devido a melhor resolução espacial.

Contudo, as diferenças dos valores de  $r$  só foram estatisticamente significativas na banda do verde (Banda 2), Tabela 12, o que reforça a similaridade existente entre os dois sensores. A Figura 20 ilustra a maior diferença na banda do verde e, pela Tabela 12, observa-se que, enquanto no LISS-III a banda do verde apresentou o maior valor de  $r$  (-0,83), no TM a banda do verde apresentou um dos menores valores de  $r$  (-0,70).

**Tabela 12** - Análise da significância das diferenças entre os coeficientes de correlação linear de Pearson entre as bandas espectrais equivalentes dos sensores TM e LISS-III.

Bandas	n	$r_{TM}$	$r_{LISS\ III}$	Z
Ln (Banda 2)	111	-0,705	-0,831	2,31
Ln (Banda 3)	111	-0,681	-0,756	1,15
Ln (Banda 4)	111	0,716	0,688	0,41
Ln (Banda 5)	111	-0,789	-0,803	0,28

Nota: Rejeita-se  $H_0: r_{TM} - r_{LISS\ III} = 0$  quando  $Z > 1,96$  a  $\alpha=0,05$

### 4.2.3 Relação entre o volume de madeira e os índices de vegetação

As Figuras 19, 20, 21 e 22 apresentam os gráficos de dispersão para os pares de dados compostos pelo volume de madeira e os índices de vegetação derivados das imagens dos sensores TM e LISS-III. No eixo das abscissas encontram-se os diferentes IV's e no eixo das ordenadas o volume de madeira. Em cada gráfico de dispersão foram ajustadas duas regressões, uma linear e outra curvilínea (potência ou exponencial).

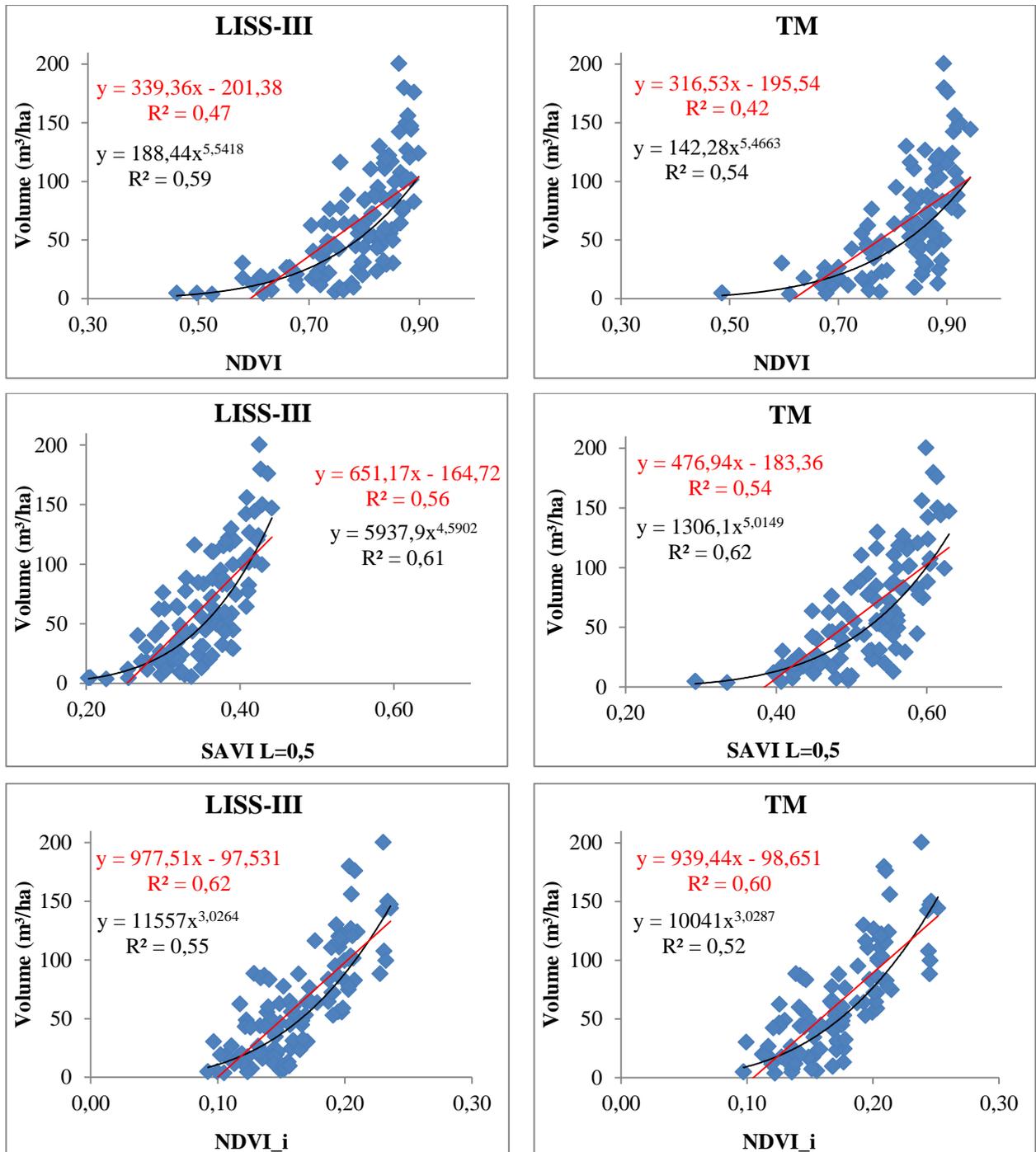
Uma análise geral de todos os gráficos mostra que a relação entre os IV's e volume está de acordo com o esperado para uma floresta plantada jovem, ou seja, um aumento do volume de madeira aumenta os valores dos IV's. Essa tendência entre variáveis biofísicas florestais e IV's foi também encontrada por outros autores (TUCKER, 1979; PETERSON et al., 1986; SALVADOR e PONS, 1998; MCDONALD et al., 1998; FOODY et al., 2003; GONÇALES et al., 2010; FERNANDES et al., 2011; BERRA et al., 2012a).

Outro aspecto geral observado nos gráficos das Figuras 19, 20, 21 e 22 é a não linearidade das relações, principalmente no caso dos IV's originais. McDonald et al. (1998) associando curvas dos índices NDVI e SR com todo o intervalo dinâmico da cobertura de um dossel de coníferas observaram que estes índices aumentaram com o aumento da cobertura do dossel. Contudo, esse aumento não foi linear, seguiu uma assíntota.

Analisando cada figura individualmente têm-se, primeiramente, na Figura 21 os seguintes índices de vegetação: NDVI, SAVI e NDVI<sub>i</sub>. Para o NDVI, nos dois sensores, a equação na forma de potência melhor se ajustou aos dados em comparação a linear. Como já comentado, o povoamento sob análise é jovem (dossel aberto) com bastante influência da serapilheira na resposta espectral do pixel, assim, quando se aplicou o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI<sub>L=0,5</sub>) observou-se que: a) Para o LISS-III, na equação linear, o valor de R<sup>2</sup> aumentou de 0,47 para 0,56 e na equação potência, o valor de R<sup>2</sup> apenas aumentou de 0,59 para 0,61; b) Para o TM, o R<sup>2</sup> da equação linear aumentou de 0,42 para 0,54 já na potência o aumento foi de 0,54 para 0,62. Assim, essa melhora nos ajustes das equações entre os pares de dados composto pelo SAVI<sub>L=0,5</sub> evidencia a influência do solo (serapilheira) na resposta espectral deste dossel.

Xavier (1998) estimando propriedades biofísicas de plantações de eucaliptos a partir de dados TM/Landsat 5 verificou que o SAVI apresentou melhor correlação com o IAF que o NDVI. Segundo o autor, isto se explica pelo fato de que o SAVI é mais sensível às variações de exposição do solo, enquanto que o NDVI não leva este fator em consideração,

concordando com outros autores (HUETE, 1988; 1989; BARET e GUYOT, 1991). E, este comportamento é mais intenso em baixas coberturas de dossel (MCDONALD et al., 1998).



**Figura 21** - Gráficos de dispersão entre o NDVI, SAVI<sub>L=0,5</sub>, NDVI<sub>i</sub> e o volume de madeira para os sensores TM e LISS-III.

Por último, na Figura 21, o NDVI ao invés de ser ajustado pelo fator de correção do solo L (SAVI<sub>L=0,5</sub>) foi ajustado pela idade das árvores amostradas (NDVI<sub>i</sub>). Observa-se que os pares de dados passaram a variar de forma mais linear, refletindo em valores de R<sup>2</sup> mais altos nas equações lineares do que nas equações potenciais, ao contrário do NDVI e SAVI<sub>L=0,5</sub>. Para o LISS-III, a equação linear apresentou um R<sup>2</sup> de 0,62 e a potência um R<sup>2</sup> de 0,55, para o TM a equação linear apresentou um R<sup>2</sup> de 0,60 e a potência um R<sup>2</sup> de 0,52.

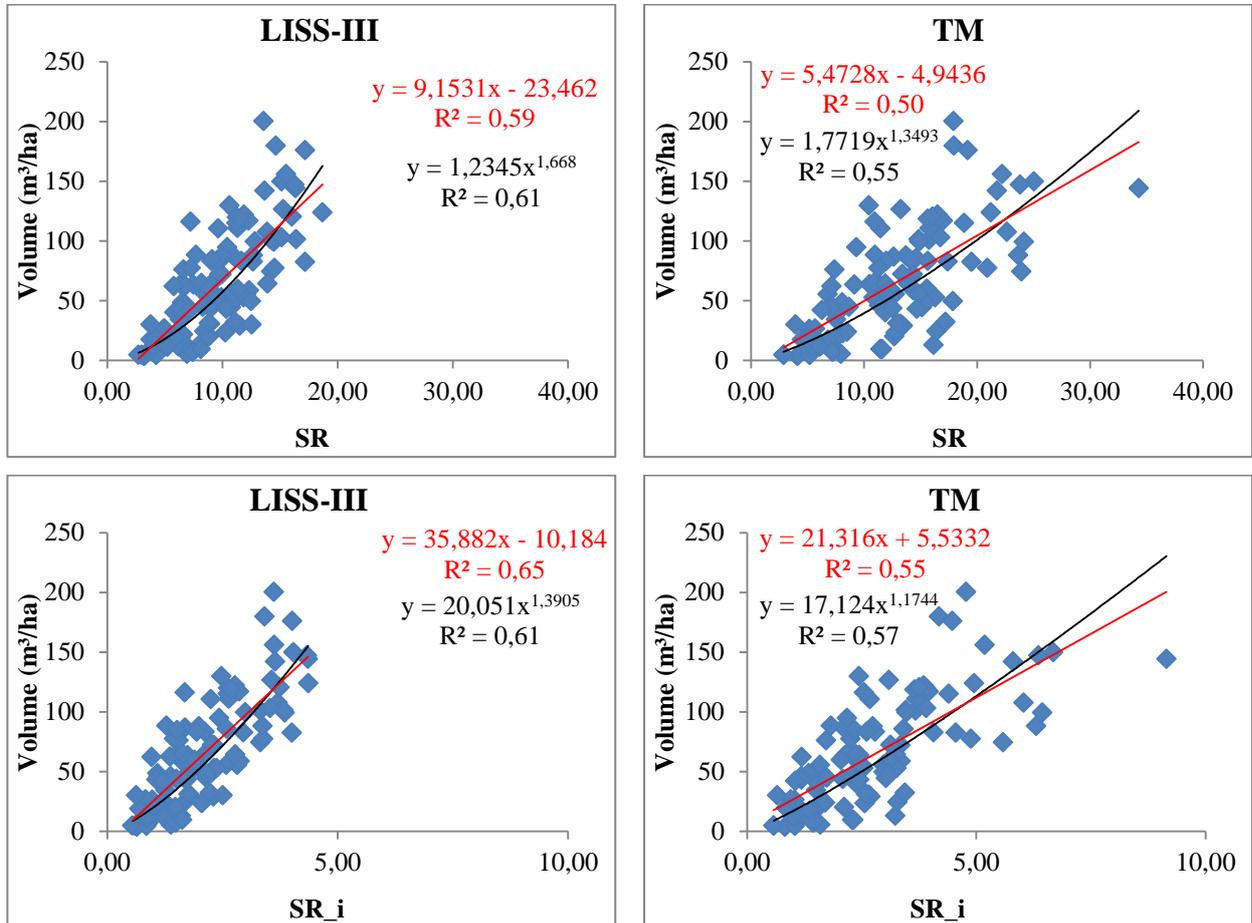
Também é interessante notar a mudança de escala que ocorreu entre os pares de dados que utilizaram NDVI com os que utilizaram NDVI<sub>i</sub> (Figura 21). Nos gráficos compostos pelo NDVI, os valores referentes às U.A's de maiores volumes estão em torno de 0,9. Assim, se houvesse a possibilidade de acompanhar o incremento em volume deste povoamento com o NDVI até o fim da rotação (30 anos), o NDVI teria possibilidade de variar de 0,9 até 1. Já nos gráficos compostos pelo NDVI<sub>i</sub> os maiores valores deste IV, associados aos maiores volumes, estão em torno de 0,25, isto significa que ocorreu um aumento no intervalo dinâmico deste IV, haja visto que, agora, ele poderia variar mais 0,75. Ou seja, enquanto o NDVI poderia variar de 0,9 até 1, o NDVI<sub>i</sub> poderia variar de 0,25 até 1 para a mesma variação de volume.

Também nota-se que os valores de NDVI em torno de 0,9 mostram claramente tendência de saturação (Figura 21), sendo que esse valor de saturação também foi constatado por McDonald et al. (1998). Já o NDVI<sub>i</sub> parece ter aumentado a sensibilidade quanto a variação dos maiores volumes dando a impressão que este IV pode não estar saturado.

Na Figura 22 tem-se os gráficos de dispersão entre o volume de madeira e os índices SR e SR<sub>i</sub>. Observa-se que o SR apresentou um comportamento aproximadamente linear e, conseguiu explicar melhor a variabilidade em volume comparado ao NDVI, Figura 21. McDonald et al. (1998) também notaram a maior sensibilidade do SR, em relação ao NDVI, mas para detecção da cobertura de um dossel de coníferas.

Comparando-se os resultados da Figura 22 tem-se que, para o LISS-III a relação entre SR e volume foi ajustada pela equação linear com R<sup>2</sup> de 0,59 enquanto a equação potência alcançou um R<sup>2</sup> de 0,61. Para o TM, a equação linear alcançou um R<sup>2</sup> de 0,50 e a potência de 0,55. Quando este índice foi corrigido pela idade (SR<sub>i</sub>) a relação tornou-se ainda mais linear; No LISS-III o R<sup>2</sup> da equação linear alcançou 0,65, sendo maior que o R<sup>2</sup> da potência (0,61); No TM o R<sup>2</sup> da equação linear foi de 0,55, ligeiramente menor que o R<sup>2</sup> da potência (0,57). Assim, o ajuste do SR pela idade aumentou a relação linear com volume nos dois sensores,

sendo que no sensor LISS-III o R<sup>2</sup> mais elevado foi quando da utilização do SR<sub>i</sub> como variável independente.

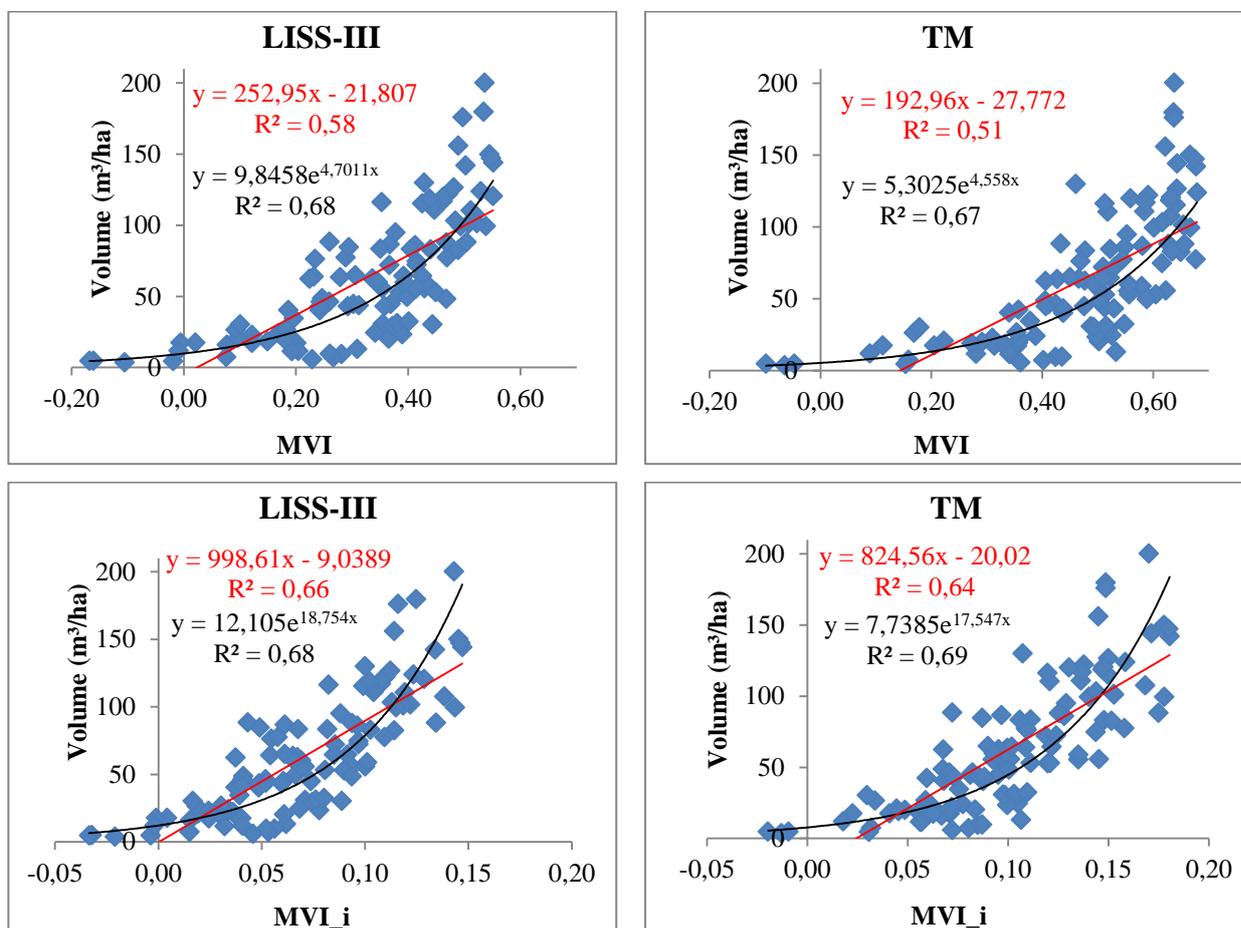


**Figura 22** - Gráficos de dispersão entre volume de madeira e o índices SR e SR<sub>i</sub> para os sensores TM e LISS-III.

Na Figura 23 tem-se os gráficos de dispersão para o MVI e MVI<sub>i</sub>. Como estes índices apresentaram valores negativos tiveram que ser ajustados pela equação exponencial ao invés da potência, além da equação linear.

Ao se analisar a fórmula do MVI  $(IVP - IVM / IVP + IVM)$  ou MVI<sub>i</sub>  $(MVI * i / 30)$ , Tabela 5, percebe-se que valores negativos destes IV's ocorrerão somente quando a reflectância da banda do IVM for maior que a da banda do IVP. Os gráficos da Figura 23 ilustram que estes valores negativos ocorreram somente nos menores volumes de madeira, os quais pertencem às U.A's com dossel aberto. Sabendo que a banda do IVM é sensível à umidade ou conteúdo de água nas folhas, numa situação de dossel aberto a serapilheira deve

dominar a resposta espectral fazendo com que a reflectância no IVM seja maior que na banda do IVP, portanto resultando em valores de MVI e MVI<sub>i</sub> negativos.



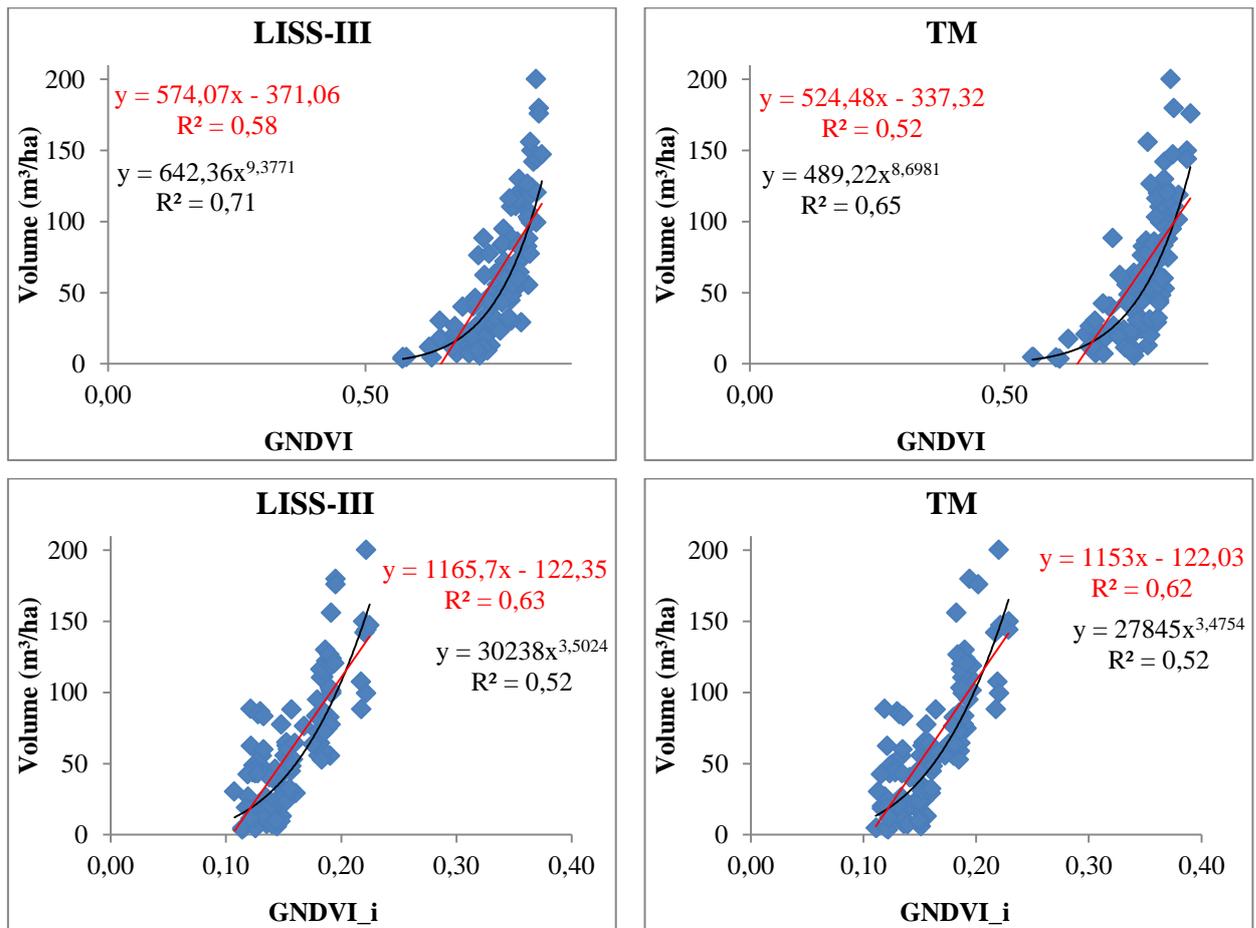
**Figura 23** - Gráficos de dispersão entre o volume de madeira e os índices MVI e MVI<sub>i</sub> para os sensores TM e LISS-III.

Para Brockhaus e Khorram (1992) as bandas do IVM do SPOT e TM foram importantes para determinação de volume de madeira, classes de idade e área basal devido a sua correlação com umidade e densidade florestal. O uso da reflectância do IVM no índice de vegetação MVI forneceu a mais forte relação com a biomassa total da floresta em trabalho de Boyd et al. (1999).

No geral, o ajuste pela idade do índice MVI aumentou a relação linear deste com o volume. Para o LISS-III a correção do MVI pela idade aumentou o valor de  $R^2$  na equação linear, já para a equação exponencial o valor de  $R^2$  manteve-se praticamente o mesmo. Apesar de aumentar o valor, o  $R^2$  da equação linear no SR<sub>i</sub> foi ligeiramente menor (0,66) que o  $R^2$  da equação exponencial (0,68). Para o TM o resultado foi similar. O ajuste pela idade do

índice MVI aumentou o  $R^2$  da equação linear de 0,51 para 0,64, valor menor que o encontrado pela equação exponencial (0,68). Tal como ocorreu com  $NDVI_i$ , o  $MVI_i$  também teve seu intervalo dinâmico aumentado.

A Figura 24 apresenta os gráficos de dispersão para o GNDVI e GNDVI<sub>i</sub>. Tal como ocorreu nos demais IV's ajustados pela idade, o GNDVI<sub>i</sub> aumentou a linearidade da relação com o volume de madeira e modificou a escala deste IV.



**Figura 24** - Gráficos de dispersão entre o volume de madeira e os índices GNDVI e GNDVI<sub>i</sub> para os sensores TM e LISS III.

O GNDVI para os dois sensores apresenta claramente uma tendência não linear, resultando em coeficientes de determinação com valores mais altos para as equações potenciais. Quando este índice foi corrigido pela idade, a linearidade entre as variáveis tornou-se maior. Contudo, o  $R^2$  das equações lineares do GNDVI<sub>i</sub>, para ambos sensores, foi menor que o  $R^2$  do GNDVI ajustado pela potência.

Como os gráficos de dispersão entre volume de madeira e os IV's apontaram ora tendência linear, ora tendência curvilínea os cálculos dos coeficientes de correlação linear foram realizados da mesma forma que para as bandas espectrais, em dois formatos: 1) com as variáveis na forma natural e, 2) com o logaritmo natural das variáveis. Assim, pode-se observar na Tabela 13 em quais conjuntos de variáveis e em que magnitude o logaritmo aumentou o coeficiente de correlação linear de Pearson (r).

**Tabela 13** - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre o volume de madeira (Vol.) e os índices de vegetação dos sensores TM e LISS-III.

Sensor	IV	Vol.	Comparação dos resultados	IV	Ln (Vol.)
LISS-III	SAVI <sub>L=0,5</sub>	0,748**	<	Ln(SAVI <sub>L=0,5</sub> )	0,781**
	NDVI	0,689**	<	Ln(NDVI)	0,770**
	NDVI <sub>i</sub>	0,787**	>	Ln(NDVI <sub>i</sub> )	0,740**
	SR	0,766**	<	Ln(SR)	0,782**
	SR <sub>i</sub>	0,810**	>	Ln(SR <sub>i</sub> )	0,783**
	MVI	0,756**	<	(MVI) <sup>1</sup>	0,824**
	MVI <sub>i</sub>	0,818**	>	(MVI <sub>i</sub> ) <sup>1</sup>	0,826**
	GNDVI	0,765**	<	Ln(GNDVI)	0,842**
	GNDVI <sub>i</sub>	0,797**	>	Ln(GNDVI <sub>i</sub> )	0,724**
TM	SAVI <sub>L=0,5</sub>	0,742**	<	Ln(SAVI <sub>L=0,5</sub> )	0,790**
	NDVI	0,648**	<	Ln(NDVI)	0,735**
	NDVI <sub>i</sub>	0,772**	>	Ln(NDVI <sub>i</sub> )	0,724**
	SR	0,707**	<	Ln(SR)	0,743**
	SR <sub>i</sub>	0,744**	<	Ln(SR <sub>i</sub> )	0,754**
	MVI	0,716**	<	(MVI) <sup>1</sup>	0,821**
	MVI <sub>i</sub>	0,802**	<	(MVI <sub>i</sub> ) <sup>1</sup>	0,828**
	GNDVI	0,722**	<	Ln(GNDVI)	0,806**
	GNDVI <sub>i</sub>	0,790**	>	Ln(GNDVI <sub>i</sub> )	0,719**

Nota: \*\* Correlação significativa ao nível de confiança de 99%

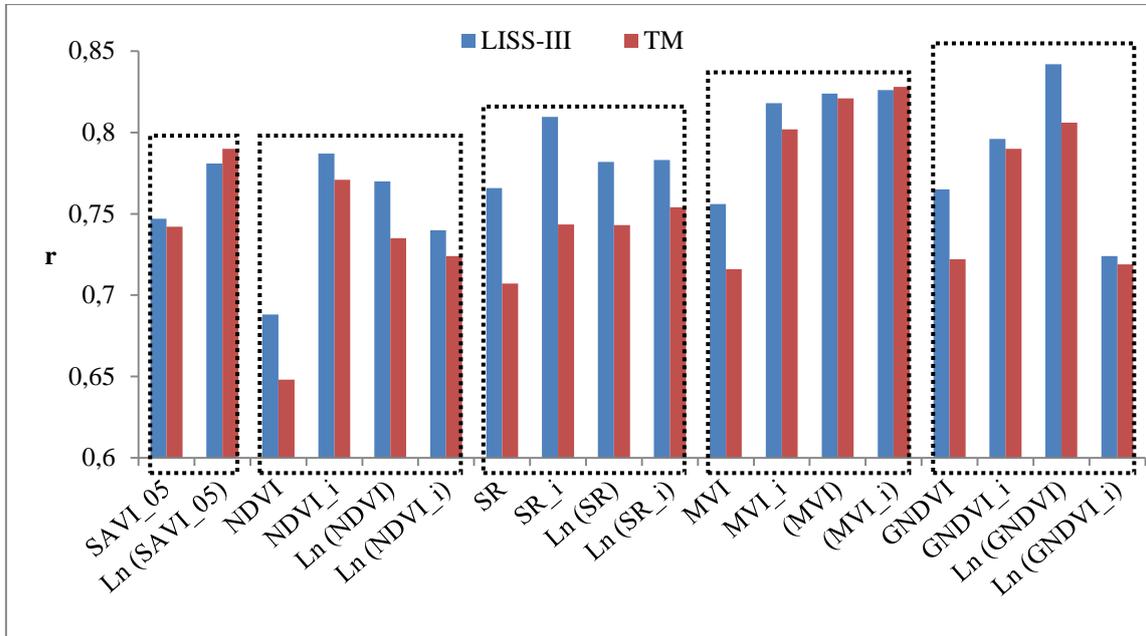
Ln = Logaritmo natural

IV = Índice de vegetação

<sup>1</sup> Como o índice MVI apresentou valores negativos, foi linearizado com base em função exponencial

A fim de melhorar a visualização dos resultados gerados na Tabela 13, os valores de r, tanto das variáveis naturais quanto das logaritimizadas, foram expostos na Figura 25. Nesta figura são desenhados retângulos pontilhados demarcando um IV original e suas transformações, por exemplo, para o retângulo que engloba o NDVI, tem-se a correlação do NDVI com Volume, a correlação do NDVI<sub>i</sub> com Volume, a correlação do Ln(NDVI) com

Ln(Volume) e a correlação do Ln(NDVI<sub>i</sub>) com Ln(Volume). O SAVI não foi ajustado pela idade.



**Figura 25** - Correlação entre os índices de vegetação com volume de madeira de *P. elliottii*.  
Nota: Os IV's que são antecedidos por Ln referem-se as correlações entre Ln (Vol.) x Ln (IV)

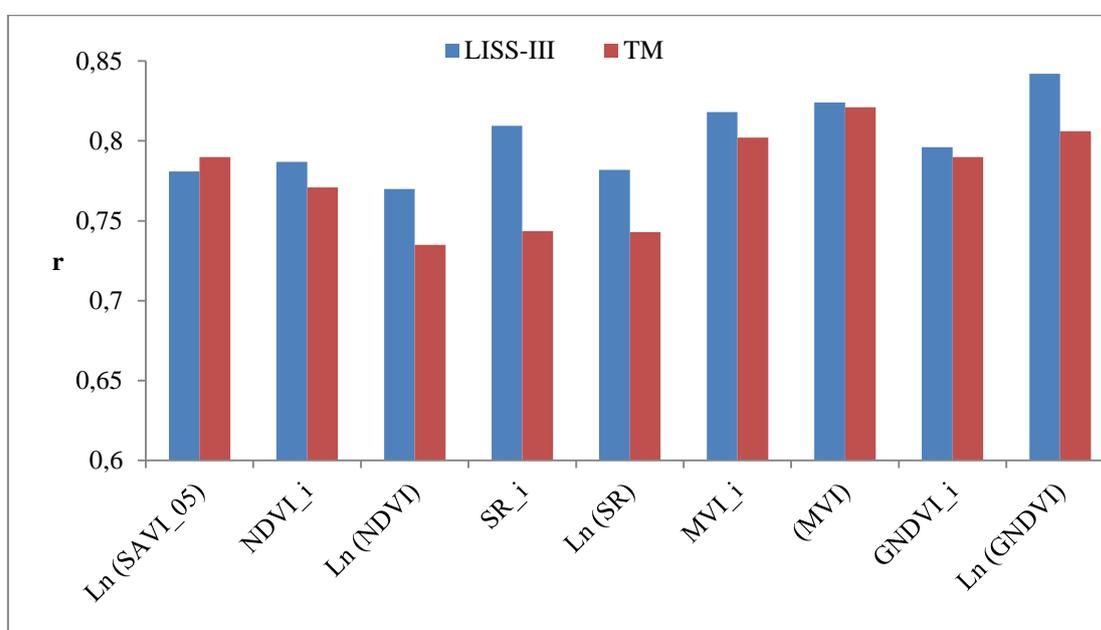
Tanto na Tabela 13 quanto na Figura 25, percebe-se que o logaritmo das variáveis nem sempre aumentou o valor de  $r$ . Da mesma forma que nas bandas espectrais, a logaritimização das variáveis somente aumentou os coeficientes de correlação linear onde a dispersão dos pares de dados seguiu uma tendência curvilínea. A comparação entre um IV original e sua versão ajustada pela idade (IV<sub>i</sub>) mostra, em todos os casos, um  $r$  maior para o IV<sub>i</sub>, indicando que a correção pela idade melhorou a associação linear entre o volume de madeira e um IV<sub>i</sub>.

Pela Figura 25 e Tabela 13, a correlação [NDVI x Volume] apresentou o menor valor de  $r$ , em parte justificado pela não linearidade desta relação. Quando foi aplicado o Ln nesses pares de dados o valor de  $r$  aumentou, indicando que essa transformação melhorou a associação linear entre as duas variáveis.

Quando o efeito do solo foi levado em conta por meio do SAVI<sub>L=0,5</sub> (que é o NDVI com um fator de ajuste L) o  $r$  aumentou em relação ao NDVI, provavelmente devido ao fechamento incompleto de dossel, conforme já discutido. Ainda assim, o SAVI<sub>L=0,5</sub> manteve um comportamento não linear, desta forma a aplicação do logaritmo, Ln (SAVI<sub>L=0,5</sub>), melhorou a associação linear deste IV com o volume. Quando o NDVI foi ajustado pela idade

(NDVI<sub>i</sub>), o r foi maior que o do SAVI<sub>L=0,5</sub> e praticamente igual ao Ln (SAVI<sub>05</sub>). Contudo, a aplicação de logaritmo ao NDVI<sub>i</sub> diminuiu o valor de r, indicando a não necessidade de linearização desta relação.

Para os demais índices (SR, MVI e GNDVI) da Figura 25 ocorreu a mesma tendência, ou seja, o ajuste pela idade (\_i) aumentou a associação linear entre o volume e o IV sem a necessidade de transformar as variáveis através de Ln. Assim, têm-se duas situações com incrementos dos valores de r relativos aos IV's originais: a aplicação de logaritmo nos IV's originais (ln (IV)) e a correção dos IV's originais pela idade (IV<sub>i</sub>). Este índices com os maiores valores de r foram selecionados para compor o gráfico da Figura 26. Com exceção do Ln(SAVI<sub>L=0,5</sub>), as correlações foram maiores para o sensor LISS-III.



**Figura 26** - Melhores resultados de correlação entre volume de madeira de *Pinus elliottii* e os índices de vegetação.

Os valores de r selecionados e ilustrados na Figura 26 foram testados quanto à significância de suas diferenças pelo teste Z, considerando como par de dados:

A) Os resultados de um mesmo sensor, por exemplo [ln(NDVI) x NDVI<sub>i</sub>] do sensor LISS-III e [ln(NDVI) x NDVI<sub>i</sub>] do sensor TM (apresentado na linha da Tabela 14). A hipótese nula era que a diferença entre o valor de r gerado com logaritmo do IV e o valor de r gerado com o ajuste pela idade do IV fosse igual a 0.

B) Os resultados do mesmo IV nos dois sensores, por exemplo [ln(NDVI) do sensor LISS-III x ln(NDVI) do sensor TM] (apresentado na coluna da Tabela 14). A hipótese nula era que a diferença entre os valores de r's gerados por um mesmo IV, porém de sensor diferentes, fosse igual a zero.

A Tabela 14 mostra que não houve diferenças significativas em nenhum dos pares testados. Reforçando a similaridade entre os sensores e apontando que tanto o ajuste pela idade como a logaritimização retornaram o mesmo resultado para um mesmo sensor.

**Tabela 14** - Análise da significância das diferenças entre os coeficientes de correlação linear de Pearson dos índices de vegetação ajustados pelo logaritmo (Ln) e dos ajustados pela idade (\_i).

	Ln (NDVI)	NDVI_i	Z
LISS-III	0,77	0,79	-0,32
TM	0,74	0,77	-0,61
Z	0,59	0,30	
	Ln (SR)	SR_i	Z
LISS-III	0,78	0,81	-0,55
TM	0,74	0,74	-0,01
Z	0,69	1,23	
	(MVI)	MVI_i	Z
LISS-III	0,82	0,82	0,14
TM	0,82	0,80	0,41
Z	0,07	0,34	
	Ln (GNDVI)	GNDVI_i	Z
LISS-III	0,84	0,80	1,03
TM	0,81	0,79	0,32
Z	0,83	0,12	

Nota: Rejeita-se  $H_0$  quando  $Z > 1,96$  ou  $Z < -1,96$ , a  $\alpha=0,05$

### 4.3 Análise de regressão

Na Tabela 15 são apresentadas as equações ajustadas para estimativas de volume de madeira utilizando como variáveis independentes as bandas espectrais dos dois sensores. Verifica-se que pelos valores de F calculados todas as equações foram significativas a um nível de probabilidade >99%.

**Tabela 15** - Equações testadas para estimar volume de madeira (V) utilizando as bandas espectrais como variáveis independentes.

Sensor	Nº	Equação de Regressão	F	R <sup>2</sup> <sub>aj.</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> /ha)	Desvio (m <sup>3</sup> /ha)
LISS-III	1	$\text{Ln}(V) = -11,74 - 4,24 \times \text{Ln}(B2)$	242,43**	0,69	27,11	5,65
	2	$\text{Ln}(V) = -03,85 - 2,00 \times \text{Ln}(B3)$	147,17**	0,57	32,08	7,44
	3	$\text{Ln}(V) = 13,51 + 5,82 \times \text{Ln}(B4)$	098,20**	0,47	30,34	8,71
	4	$\text{Ln}(V) = -02,53 - 2,69 \times \text{Ln}(B5)$	197,85**	0,64	28,87	6,57
	5	<b><sup>1</sup>Ln(V)= -5,1 - 3,4×Ln(B2) + 2,1×Ln(B4)</b>	<b>142,98**</b>	<b>0,72</b>	<b>24,60</b>	<b>4,32</b>
TM	6	$\text{Ln}(V) = -07,54 - 3,24 \times \text{Ln}(B2)$	107,18**	0,49	35,41	8,38
	7	$\text{Ln}(V) = -01,83 - 1,46 \times \text{Ln}(B3)$	094,15**	0,46	36,34	9,19
	8	$\text{Ln}(V) = 11,97 + 5,57 \times \text{Ln}(B4)$	114,89**	0,51	31,15	8,22
	9	$\text{Ln}(V) = -01,90 - 2,27 \times \text{Ln}(B5)$	180,02**	0,62	31,69	7,12
	10	<b><sup>1</sup>Ln(V)= 1,32 - 1,2×Ln( B2) + 2,8×Ln( B4) - 1,0×Ln( B5)</b>	<b>087,95**</b>	<b>0,70</b>	<b>25,24</b>	<b>5,63</b>

Nota: \*\*Significância de 0,000

<sup>1</sup>Seleção Stepwise

Nº= Número da equação

B2 = Banda espectral correspondente à região do verde

B3 = Banda espectral correspondente à região do vermelho

B4 = Banda espectral correspondente à região do infravermelho próximo

B5 = Banda espectral correspondente à região do infravermelho médio

Ln= Logaritmo natural

V=Volume de madeira em m<sup>3</sup>/ha

F= Valor de F calculado

R<sup>2</sup><sub>aj.</sub>= Coeficiente de determinação ajustado

S<sub>yx</sub>= Erro padrão da estimativa

Desvio= Média dos desvios residuais

As equações de regressão linear observados na Tabela 15 foram consistentes com a resposta espectral esperada da vegetação; nos casos em que uma banda do visível (B2 ou B3) foi empregada, uma inclinação negativa foi encontrada (isto foi causado por um decréscimo da reflectância ocasionado pela alta absorção da clorofila na medida em que os valores da variável de campo aumentaram); nas equações onde a banda IVP (B4) entrou como variável independente, as inclinações foram positivas (resultado da estrutura interna das folhas); a banda do infravermelho médio (B5) apresentou inclinação negativa (explicado pela absorção de radiação pelo conteúdo de água nas folhas).

Comparando-se os resultados referentes aos ajustes, percebe-se que as equações que utilizam o método de seleção de variáveis *stepwise* (equações N°5 e N°10 da Tabela 15) apresentaram melhores ajustes para os dados. Tais equações apresentaram os maiores coeficientes de determinação ajustados, onde com o LISS-III o valor foi de 0,72 e com o TM o valor foi 0,70.

Também, ao utilizar o erro padrão da estimativa e o desvio como critérios para a seleção, Tabela 15, sendo escolhida aquela equação que apresentar o menor valor, novamente o método *stepwise* apresentou os melhores resultados, tanto para o LISS-III ( $S_{yx}=24,60$  m<sup>3</sup>/ha; Desvio= 4,32 m<sup>3</sup>/ha) como para o TM ( $S_{yx}=25,24$  m<sup>3</sup>/ha; Desvio= 5,63 m<sup>3</sup>/ha). Ardö (1992) comentou que uma precisão por vezes usada nas florestas suecas para estimativas de parâmetros biofísicos é  $\pm 50$ m<sup>3</sup>/ha.

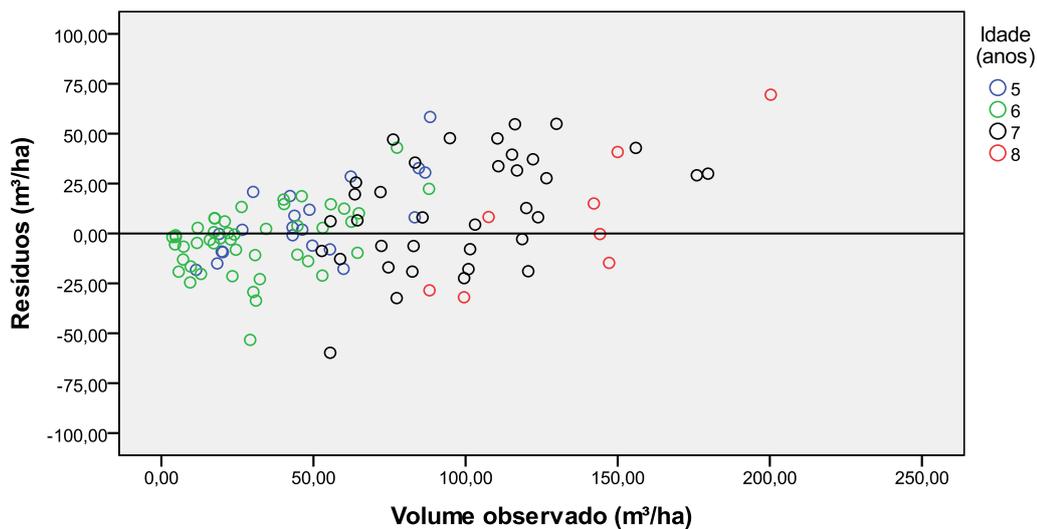
Os desvios positivos encontrados em todas as equações indicam que houve, em média, uma subestimativa dos volumes estimados pelas regressões. Como os valores dos desvios apresentados na Tabela 15 são uma média dos resíduos encontrados, foram gerados e analisados gráficos de resíduos para as 10 equações da Tabela 15.

A distribuição dos resíduos (das 10 equações) ao longo do intervalo dos volumes observados demonstrou uma superestimativa nos menores volumes e, à medida que os volumes aumentam, a tendência se inverte; situação semelhante foi encontrada por Holmgren et al. (2000). Na Figura 27 se observa essa tendência, porém são apresentados somente os gráficos dos resíduos para as equações julgadas menos tendenciosas, sendo a N° 5 para o sensor LISS-III e a N°10 para o sensor TM, Tabela 15.

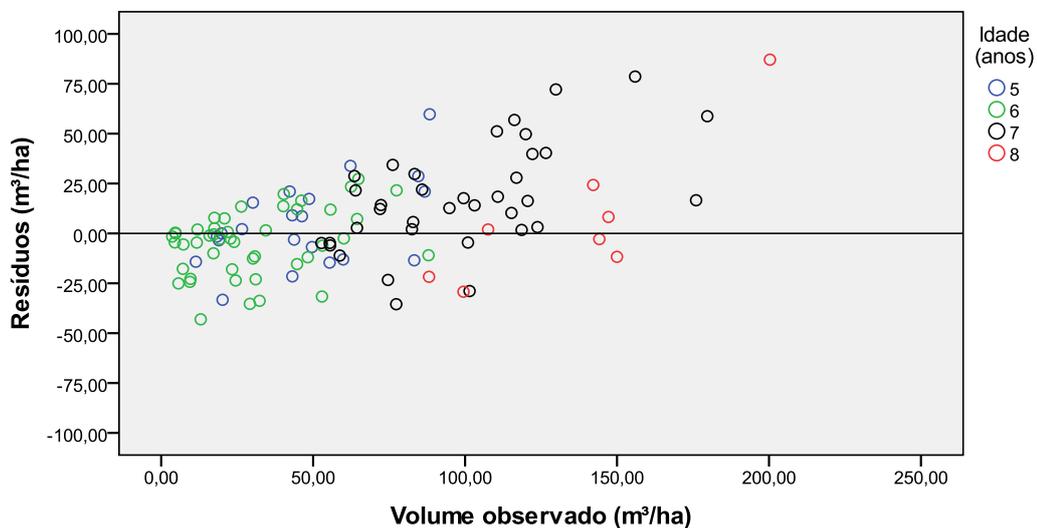
Os gráficos de resíduos, tanto os apresentados na Figura 27 como os das demais equações (não apresentados), apontam, geralmente, os maiores desvios ocorrendo nos volumes acima de 100 m<sup>3</sup>/ha. Na Figura 27 observa-se que esses valores correspondem às árvores com 7 e 8 anos de idade, sendo justamente o período onde se observou o início do

fechamento total das copas, o qual faz com que os dados espectrais percam gradativamente a sensibilidade ao aumento do volume. Isto provoca a não linearidade e saturação da relação e consequente aumento da imprecisão das estimativas.

**Figura 27** - Distribuição dos resíduos de equações estimadores de volume de madeira em povoamentos de *Pinus elliottii* utilizando as bandas espectrais do sensor LISS-III (a) e do sensor TM (b) como variáveis independentes.



(a)



(b)

Assim, utilizando somente as bandas espectrais como variáveis independentes, para o LISS-III a equação melhor ajustada foi a N<sup>o</sup>5, uma vez que apresentou o melhor  $R^2_{aj.}$ , o menor erro padrão da estimativa, menor desvio e resíduos menos tendenciosos. Para o TM, a equação melhor ajustada foi a N<sup>o</sup>10 com base nos mesmos critérios.

Na Tabela 16 são apresentadas as equações ajustadas para estimar volume de madeira utilizando como variáveis independentes os índices de vegetação. Pelo valor de F, todas as regressões foram significativas a um nível de probabilidade >99%. Foram testadas regressões múltiplas pelo método *stepwise* com diferentes combinações de IV's e combinações de IV's com bandas espectrais, contudo a *stepwise* não retornou nenhuma equação com ajuste melhor que as equações onde a variável independente foi um único IV. Observa-se que, nas equações da Tabela 16, o desvio não pode ser utilizado para fazer a comparação, uma vez que, as equações naturalmente lineares apresentam desvio zero em virtude do ajuste pelo método dos mínimos quadrados.

**Tabela 16** - Equações testadas para estimar volume de madeira (V) utilizando os índices de vegetação como variáveis independentes.

Sensor	Nº	Equação de Regressão	F	R <sup>2</sup> <sub>aj.</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> /ha)	Desvio (m <sup>3</sup> /ha)
LISS-III	1	Ln(V) = 0,21 + 1,67×Ln( SR )	171,80**	0,61	29,81	6,22
	2	V = -10,18 + 35,88×SR_i	207,32**	0,65	26,36	0,00
	3	Ln(V) = 5,24 + 5,54×Ln( NDVI )	158,40**	0,59	31,70	8,76
	4	Ln(V) = 8,69 + 4,60×Ln( SAVI <sub>L=0,5</sub> )	170,41**	0,61	28,42	7,19
	5	V = -97,40 + 976,73×(NDVI_i)	176,95**	0,61	27,72	0,00
	6	Ln(V) = 2,28 + 4,71×(MVI)	231,83**	0,68	26,06	5,92
	7	Ln(V) = 2,49 + 18,73×(MVI_i)	234,40**	0,68	26,54	3,77
	<b>8</b>	<b>Ln(V) = 6,46 + 9,38×Ln( GNDVI )</b>	<b>263,88**</b>	<b>0,70</b>	<b>25,35</b>	<b>6,29</b>
	9	V = -122,64 + 1167,44×( GNDVI_i )	189,50**	0,63	27,13	0,00
TM	10	Ln(V) = 0,57 + 1,35×Ln( SR )	134,53**	0,55	33,34	7,32
	11	V = 5,53 + 21,32×SR_i	134,74**	0,55	30,03	0,00
	12	Ln(V) = 4,96 + 5,47×Ln( NDVI )	127,98**	0,54	34,26	9,72
	13	Ln(V) = 8,02 + 4,73×Ln( SAVI <sub>L=0,5</sub> )	181,24**	0,62	28,94	7,41
	14	V = -98,65 + 939,45×(NDVI_i)	160,30**	0,59	28,57	0,00
	15	Ln(V) = 1,66 + 5,30×(MVI)	225,45**	0,67	28,65	6,85
	<b>16</b>	<b>Ln(V) = 2,05 + 17,55×(MVI_i)</b>	<b>238,60**</b>	<b>0,68</b>	<b>27,88</b>	<b>4,06</b>
	17	V = -20,02 + 824,57×(MVI_i)	196,50**	0,64	26,82	0,00
	18	Ln(V) = 6,19 + 8,69×Ln( GNDVI )	201,77**	0,65	28,79	7,55
	19	V = -122,03 + 1153,00×( GNDVI_i )	180,56**	0,62	27,55	0,00

Nota: Obs.: A seleção *stepwise* não retornou nenhuma equação com melhor ajuste que a equação melhor ajustada por um único IV

\*\*Significância de 0,000

!Seleção *Stepwise*

Ln= Logaritmo natural

V=Volume de madeira em m<sup>3</sup>/ha

F= Valor de F calculado

R<sup>2</sup><sub>aj.</sub>= Coeficiente de determinação ajustado

S<sub>yx</sub>= Erro padrão da estimativa

Desvio= Média dos desvios residuais

Para o sensor LISS-III, Tabela 16, a equação com maior valor de coeficiente de determinação ajustado e menor erro padrão da estimativa foi o que utilizou o GNDVI como variável independente (Nº 8). Para o TM, a equação melhor ajustada foi a que utilizou o MVI<sub>i</sub> (Nº16), com base nos mesmos critérios.

Análises dos gráficos de resíduos foram realizadas para todas as equações da Tabela 16. No geral ocorreu o mesmo comportamento observado com as bandas espectrais, ou seja, tendência de superestimativa nos menores volumes e subestimativa nos maiores volumes. Os gráficos de resíduos menos tendenciosos corresponderam às equações selecionadas anteriormente da Tabela 16 (Nº 8 e Nº 16), os quais são apresentados na Figura 28. Tal como se observaram nos gráficos dos resíduos da Tabela 15, os maiores desvios das equações da Tabela 16 ocorreram para volumes maiores que 100 m<sup>3</sup>/ha.

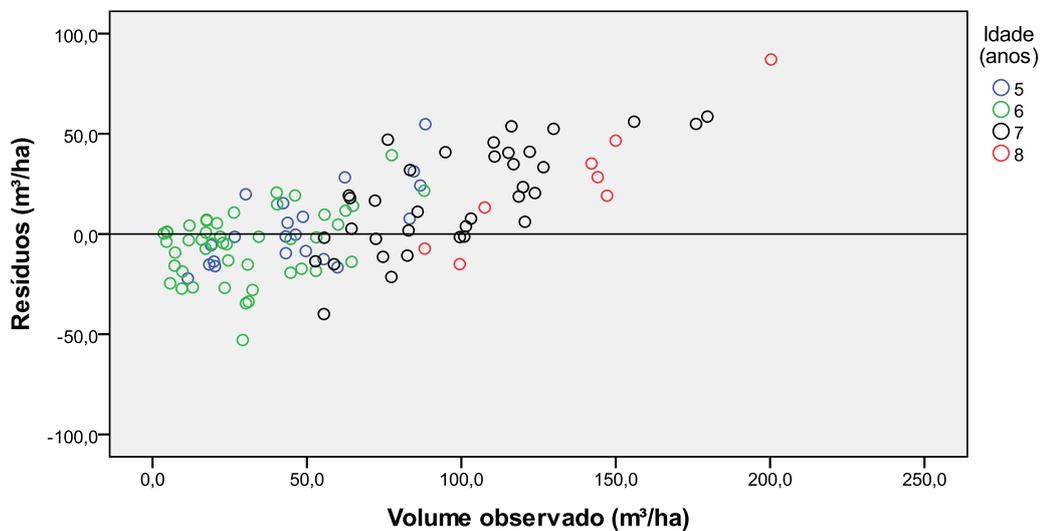
Sousa e Ponzoni (1998) avaliaram a capacidade de dados Landsat/TM para estimar volume de madeira de *Pinus* spp. Entre os IV's testados os melhores resultados foram com o GNDVI e MVI. Segundo os autores, estes resultados indicariam que os índices de vegetação normalmente utilizados para monitoramento e levantamento de biomassa não são adequados para detectar alterações no volume de madeira, nas condições semelhantes àquelas do trabalho. Isto provavelmente deve-se ao fato de todos envolverem em suas fórmulas a banda relativa ao vermelho (TM 3), que foi a menos sensível às alterações estudadas. Assim, a troca desta banda pelas bandas TM 2, TM 5 e TM 7, parecem ter solucionado este problema, para aquela área de estudo. Spanner et al. (1990) também observaram o bom desempenho do MVI para estimar IAF, sendo encontrada a maior correlação entre os IV's testados.

Os valores de R<sup>2</sup><sub>aj.</sub> das equações da Tabela 15 (bandas espectrais como variáveis independentes) variaram de 0,46 a 0,72 e os do Tabela 16 (índices de vegetação como variáveis independentes) variaram de 0,54 a 0,70, sendo que, na maioria das equações, os R<sup>2</sup><sub>aj.</sub> obtidos com o LISS-III foram ligeiramente maiores que os obtidos com TM. Esse intervalo de valores coincide com outros trabalhos, principalmente em plantios comerciais.

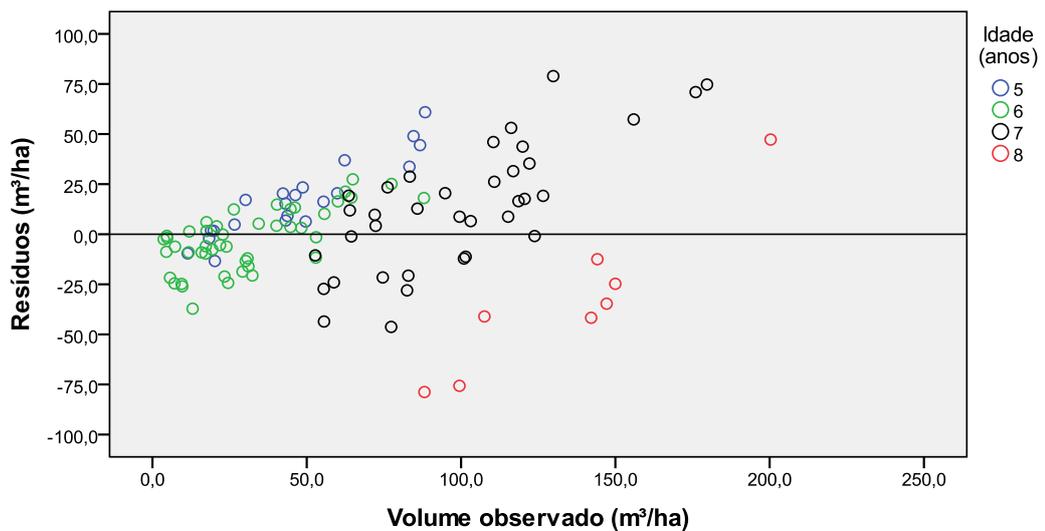
Vários parâmetros biofísicos foram estimados tendo como área de estudo florestas plantadas. Xavier et al. (1998) estimando IAF de plantações de eucaliptos a partir de dados TM/Landsat 5 encontraram uma equação com R<sup>2</sup> de 0,69; Em trabalho de Pühr e Donoghue (2000), altura e área basal de plantios de coníferas foram mais relacionadas com as bandas 3, 5 e 7 do TM/Landsat 5 (R<sup>2</sup> ≥ 0,77), já as mais fracas relações foram com a banda 4 (R<sup>2</sup> ≤ 0,23); Orué (2002) estimou através de regressão linear simples o volume de *Pinus* spp. com Landsat ETM+ encontrando R<sup>2</sup> de 0,43 e S<sub>yx</sub>=59,7m<sup>3</sup>/ha; Canavesi et al. (2010) estimaram

volume de madeira em plantios de *Eucalyptus* spp. utilizando dados Hyperion EO-1 e encontraram valores de  $R^2$ , ajustados nas equações, que variaram de 0,62 a 0,70, sendo que, 3 dos 4 equações incluíram índices de vegetação; Watzlawick et al. (2009) estimando parâmetros biofísicos em floresta com araucária utilizando IKONOS II encontraram  $R^2_{aj}$  variando de 0,57 a 0,71; Berra et al. (2012a) encontraram  $R^2_{aj}$  entre 0,61-0,68 nas equações estimadoras de volume de madeira de *Eucalyptus* sp.

**Figura 28** - Distribuição dos resíduos das equações estimadoras de volume de madeira em povoamentos de *Pinus elliottii* utilizando como variáveis independentes os IV's do sensor LISS-III (a) e do sensor TM (b).



(a)



(b)

Fracas relações ( $R^2 < 0,30$ ) também foram detectadas em florestas plantadas. Para Trotter et al. (1997), ao nível de pixel, as relações entre dados Landsat TM e volume de madeira de plantios de *Pinus radiata* foram significantes mas fracas, com  $R^2 \leq 0,30$  ( $S_{yx} > 100$  m<sup>3</sup>/ha); Gebreslasie (2008), relacionando volume com imagens ASTER, encontrou uma equação de regressão para estimar o volume com  $R^2$  de 0,30 para povoamentos jovens de *Eucalyptus* sp. e  $R^2$  de 0,27 para povoamentos maduros. Tanto Trotter et al. (1997) como Gebreslasie (2008) atribuem essas fracas correlações ao alto fechamento do dossel, inclusive no povoamentos jovens devido ao rápido crescimento.

Resultados similares ao presente estudo também foram encontrados em florestas naturais, porém, sendo mais comum aparecerem valores de  $R^2$  ou  $R^2_{aj}$  menores. Franklin (1986) relacionou área basal e biomassa de floresta de coníferas com dados de reflectância do Landsat TM encontrando  $R^2 < 0,30$ ; Spanner et al. (1990) analisaram a relação entre IAF de floresta temperada de coníferas e dados TM/Landsat 5. Para as bandas espectrais corrigidas dos efeitos atmosféricos e da elevação solar os  $R^2$  variaram de 0,07 a 0,64, já para os IV's corrigidos os valores estiveram entre 0,28 e 0,38; Salvador e Pons (1998) usaram imagens Landsat TM para estimar volume de espécies tais como *Pinus sylvestris* L. e *P. nigra salzmannii* Franco encontrando  $R^2 < 0,25$  nas regressões lineares simples e  $R^2_{aj} < 0,45$  com as regressões lineares múltiplas.

Meng et al. (2007) estimaram o volume comercial de diversos ecossistemas florestais, utilizando uma modificação do NDVI (NDVIsa - *surface area of the NDVI*) oriunda de Landsat ETM+ e encontraram na regressão linear simples um  $R^2$  de 0,30; Ghahramany et al. (2012) estimaram área basal com HRG/SPOT-5, onde o menor  $R^2_{aj}$  foi do equação que utilizou a banda do verde como variável independente (0,44), já a combinação do índice SR + principais componentes pela *stepwise* obteve o maior  $R^2_{aj}$  (0,62); Em floresta aberta dominada por carvalho Carreiras et al. (2006) estimaram cobertura de copa com bandas espectrais e IV's do TM/Landsat 5. Os valores dos  $R^2_{aj}$  variaram de 0,59 a 0,73. Esses resultados, considerados bons pelos autores, devem ser devidos ao fato de que neste tipo florestal geralmente não ocorre o fechamento total das copas, somando-se a isto à ausência de sub-bosque vivo.

Alguns autores comentam sobre a acurácia e limitações em trabalhos relacionando dados de sensoriamento remoto com dados de campo florestal. Para Meng et al. (2007) a precisão dos modelos usando imagens de sensoriamento remoto para estimativa de biomassa florestal e volume poderia ser aumentada se fatores específicos regionais como geologia,

clima e efeitos de solo fossem considerados nos modelos. Holmgren et al. (2000) conseguiram melhorar o erro padrão das estimativas do volume de madeira de 36% para 17% quando, além dos dados espectrais, utilizaram dados auxiliares tais como índice de sítio. Tokola e Heikkilä (1997) também alcançaram menores erros padrão na estimativa de volume total quando informações da qualidade de sítio eram conhecidas *a priori*.

No presente trabalho as dimensões das U.A's (20 x 21 m) são menores que a resolução espacial dos sensores TM e LISS-III. Como mencionado por Curran e Hay (1986), um problema comum encontrado na análise de imagens de satélite é que U.A's levantadas em campo tendem a ser muito menores que a resolução espacial da imagem, e como resultado os dados não são representativos da área total que contribui para a reflectância gravada em cada pixel; Foody et al. (2003) utilizaram unidades amostrais em campo de dimensões diferentes (100x10m) que a do pixel (30x30m). Eles comentam que isso gera incertezas, uma vez que dificulta uma precisa localização das unidades amostrais na imagem, concordando com Curran e Hay (1986). Contudo, Puhr e Donoghue (2000) observam que quando as U.A's provêm de plantios o ecossistema florestal tende a ser homogêneo e pequenas U.A's (menores que o pixel) devem descrever adequadamente os povoamentos levantados.

Quanto à aplicabilidade geral das relações empíricas entre dados espectrais e parâmetros florestais vários autores ressaltam a limitação disto devido à dependência da cena e sítio (MCDONALD et al., 1998; FOODY et al., 2003; MENG et al., 2007; LU et al., 2004; BERRA et al., 2012a). Significando que para cada área de estudo e para cada sensor um modelo próprio deve ser ajustado.

#### 4.4 Mapeamento do volume de madeira

No presente estudo um dos objetivos é a espacialização e quantificação do volume de madeira na área de estudo em função da aplicação das equações matemáticas ajustadas para os povoamentos de *Pinus elliottii* inventariados, comparando o desempenho dos sensores TM e LISS-III para tal. Desta maneira, foram utilizadas as equações melhores ajustadas usando somente as bandas espectrais e as equações usando somente os índices de vegetação como variáveis independentes. As equações selecionadas para as estimativas são reescritas na Tabela 17.

**Tabela 17** - Equações selecionadas para estimar volume de madeira (V) de *Pinus elliottii*.

Sensor	Nº	Equação de Regressão	F	R <sup>2</sup> <sub>aj.</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> /ha)	Desvio (m <sup>3</sup> /ha)
TM	1	$\text{Ln}(V) = 1,32 - 1,2 \times \text{Ln}(B2) + 2,8 \times \text{Ln}(B4) - 1,0 \times \text{Ln}(B5)$	087,95**	0,70	25,24	5,63
	2	$\text{Ln}(V) = 2,05 + 17,55 \times (\text{MVI}_i)$	238,60**	0,68	27,88	4,06
LISS-III	3	$\text{Ln}(V) = -5,1 - 3,4 \times \text{Ln}(B2) + 2,1 \times \text{Ln}(B4)$	142,98**	0,72	24,60	4,32
	4	$\text{Ln}(V) = 6,46 + 9,38 \times \text{Ln}(\text{GNDVI})$	263,88**	0,70	25,35	6,29

Nota: \*\*Significância de 0,000

Ln= Logaritmo natural

V=Volume de madeira em m<sup>3</sup>/ha

B2 = Banda espectral correspondente à região do verde

B4 = Banda espectral correspondente à região do infravermelho próximo

B5 = Banda espectral correspondente à região do infravermelho médio

F= Valor de F calculado

R<sup>2</sup><sub>aj.</sub>= Coeficiente de determinação ajustado

S<sub>yx</sub>= Erro padrão da estimativa

Desvio= Média dos desvios residuais

Ressalta-se que as estimativas foram realizadas somente para os talhões inventariados, conforme Figura 9. Isto porque as relações foram modeladas para os povoamentos de *Pinus elliottii* com idade entre 5 e 8 anos, nos quais podem efetivamente serem realizadas as estimativas.

Na Figura 29 e Figura 30 são apresentados os mapas gerados a partir das bandas espectrais dos sensores TM e LISS-III, respectivamente. A Figura 31 apresenta um mapa em maior detalhe ilustrando e comparando as estimativas geradas pelos sensores TM e LISS-III na parte norte da área de estudo, onde se concentra a maior parte da área estimada. Nestas

Figuras, próximos aos talhões, estão presentes números com três algarismos os quais identificam os talhões. Contudo, a delimitação e identificação precisa de cada talhão podem ser melhor visualizados na Figura 9.

Na Figura 32 e na Figura 33 são apresentados os mapas gerados utilizando somente os índices de vegetação dos sensores TM e LISS-III, respectivamente. A Figura 34 detalha as informações contidas na Figura 32 e Figura 33, também na parte norte da área de estudo.

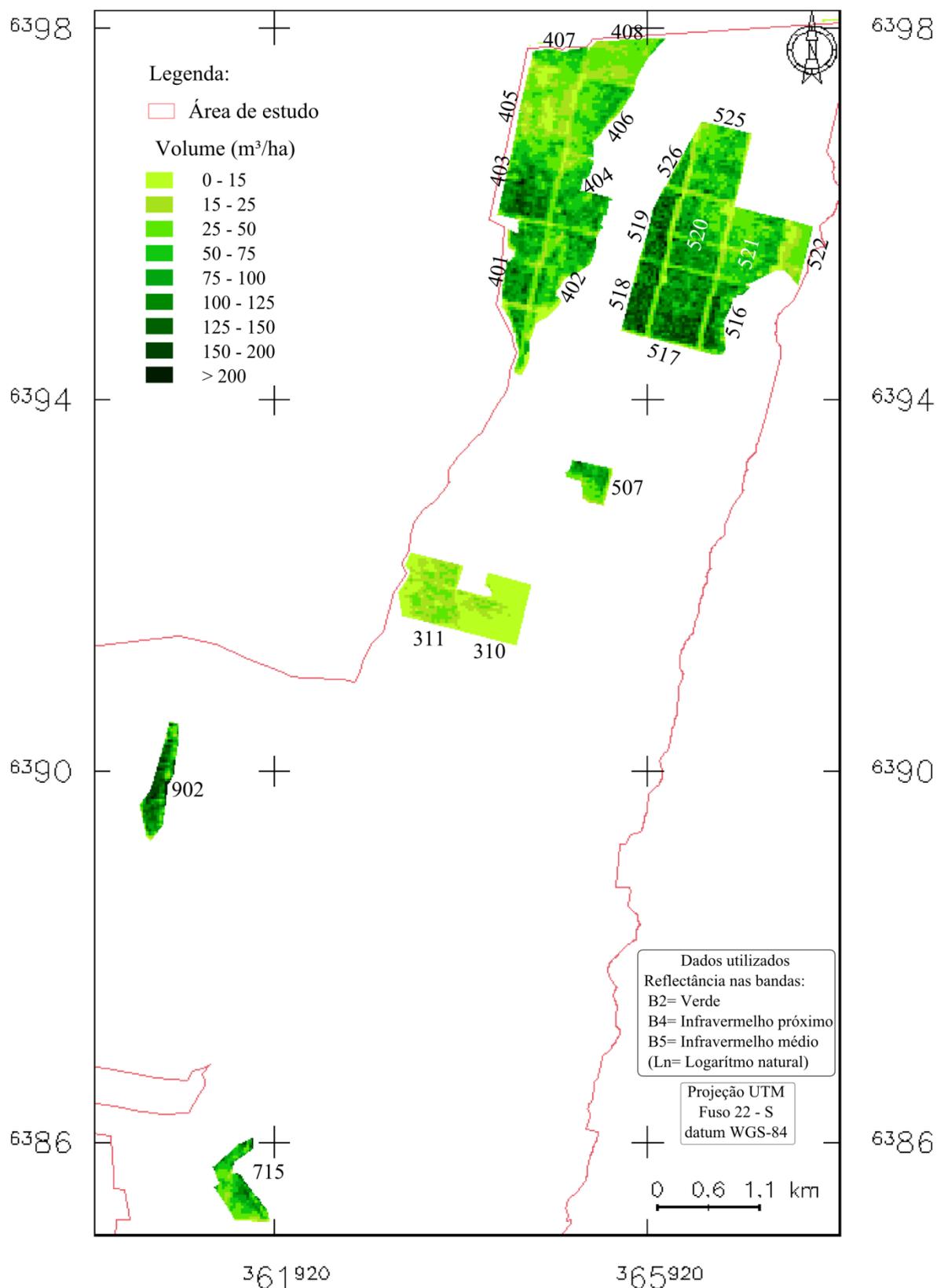
Desta forma, é possível obter uma estimativa do volume de madeira sobre toda a área de um talhão de interesse, haja vista que cada pixel passou a representar um valor de volume de madeira em  $m^3/ha$ . Estes dados, gerenciados em um ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas), fornecem, portanto, informações espacializadas da quantidade de madeira presente numa determinada área.

Os mapas apresentados nas figuras 29 a 34, numa análise qualitativa, fornecem informações sobre a variação do volume de madeira dada pela variação das cores associadas às diferentes classes temáticas. Neste ponto pode-se observar o quão homogênea ou heterogênea é a distribuição de volume, de onde se pode inferir sobre a qualidade do sítio dentro do talhão.

Também é possível observar as similaridades e as diferenças nas estimativas geradas pelos sensores TM e LISS-III. Pela análise visual, principalmente na Figura 31 e Figura 34, as estimativas geradas pelo TM aparentam apresentar mais áreas com maiores volumes de madeira que o sensor LISS-III.

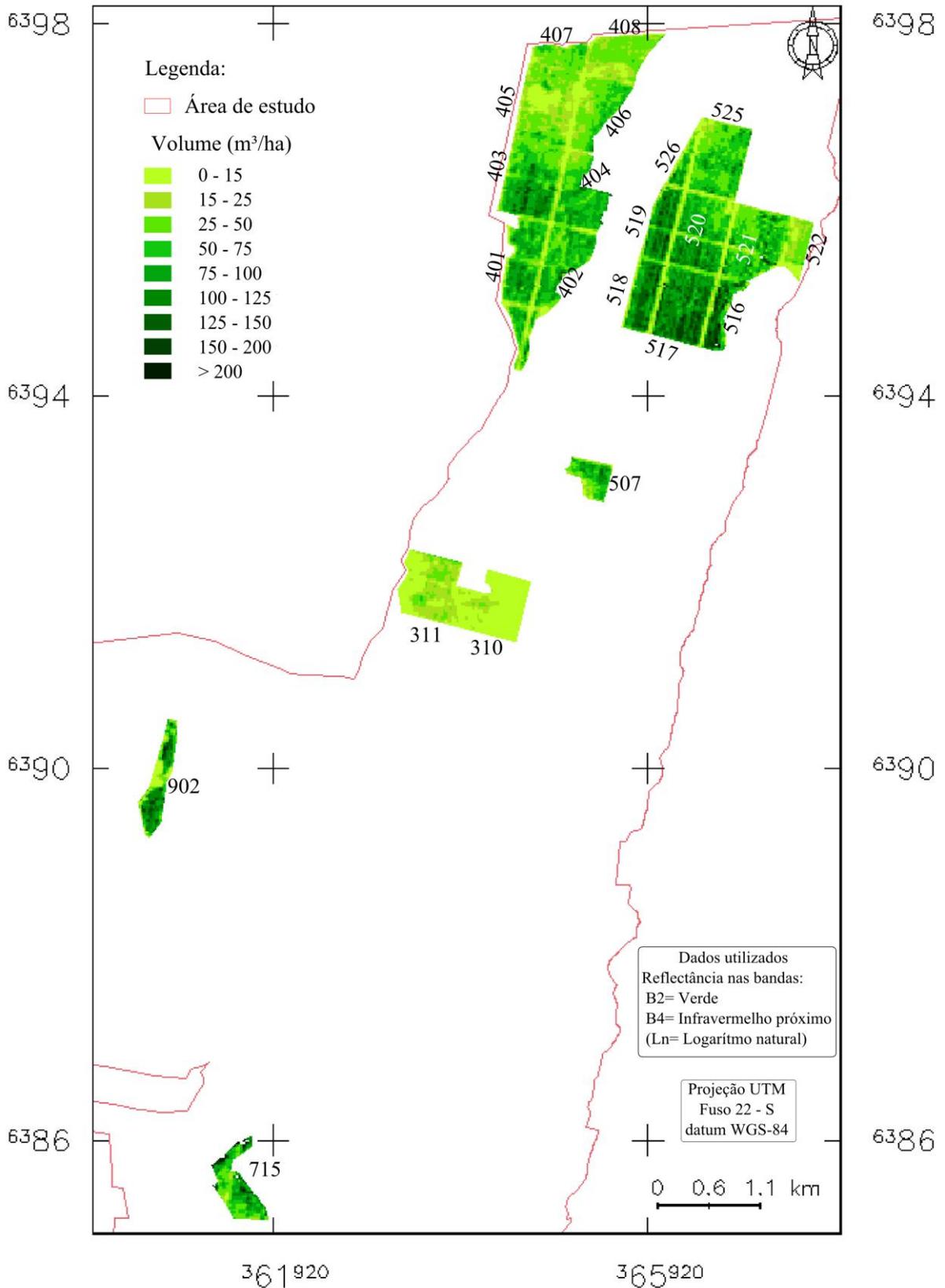
Para quantificar as diferenças das estimativas geradas pelos dois sensores foram comparados, num primeiro momento, os valores dos volumes estimados correspondentes aos pixels coincidentes com a localização das U.A's, tal como realizado com as reflectâncias de superfície das bandas equivalentes. O resultado desta comparação é apresentado na Figura 35. Nesta figura, nos gráficos superiores (letras a e b) o volume de madeira estimado pelo TM é plotado no eixo x, e o estimado pelo LISS-III é plotado no eixo y. A linha 1:1 (linha pontilhada) indica o perfeito ajuste entre as medidas. Os gráficos na parte inferior da figura (letras c e d) representam as diferenças em porcentagem nas estimativas obtidas pelo LISS-III relativas ao TM. O volume de madeira estimado pelo TM localiza-se no eixo x, e a diferença percentual do LISS-III relativa ao TM é representada no eixo y.

**Distribuição espacial de volume de madeira (V) estimada com TM/Landsat 5**  
 $\text{Ln}(V) = 1,32 - 1,2 \cdot \text{Ln}(B2) + 2,8 \cdot \text{Ln}(B4) - 1 \cdot \text{Ln}(B5)$



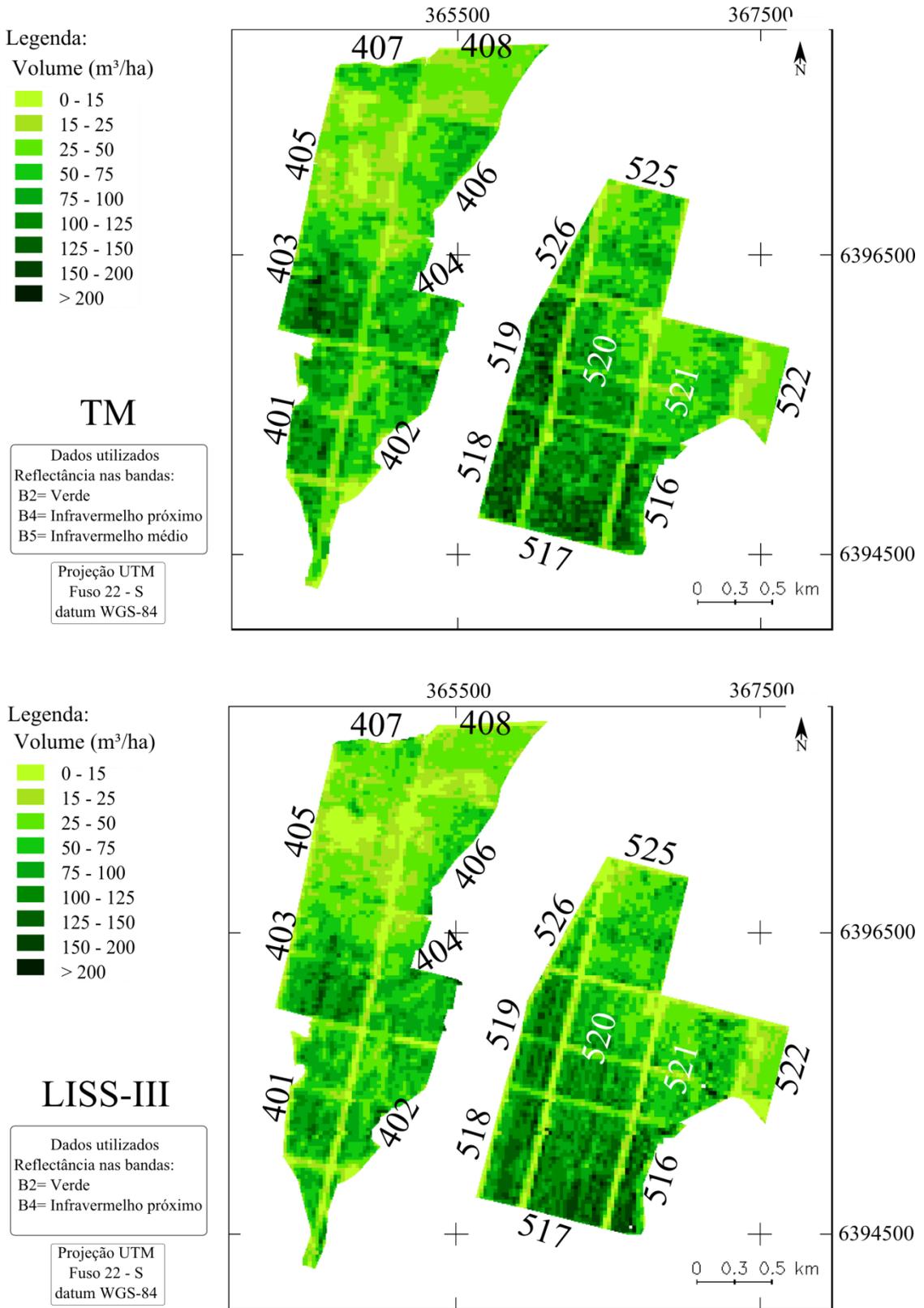
**Figura 29** - Mapa da estimativa de volume de madeira de *Pinus elliottii* utilizando as bandas espectrais do TM/Landsat 5. A numeração identifica os talhões.

Distribuição espacial de volume de madeira (V) estimada com LISS-III/ResourceSat -1  
 $\text{Ln}(V) = 5,2 - 3,4 \cdot \text{Ln}(B2) + 2,1 \cdot \text{Ln}(B4)$



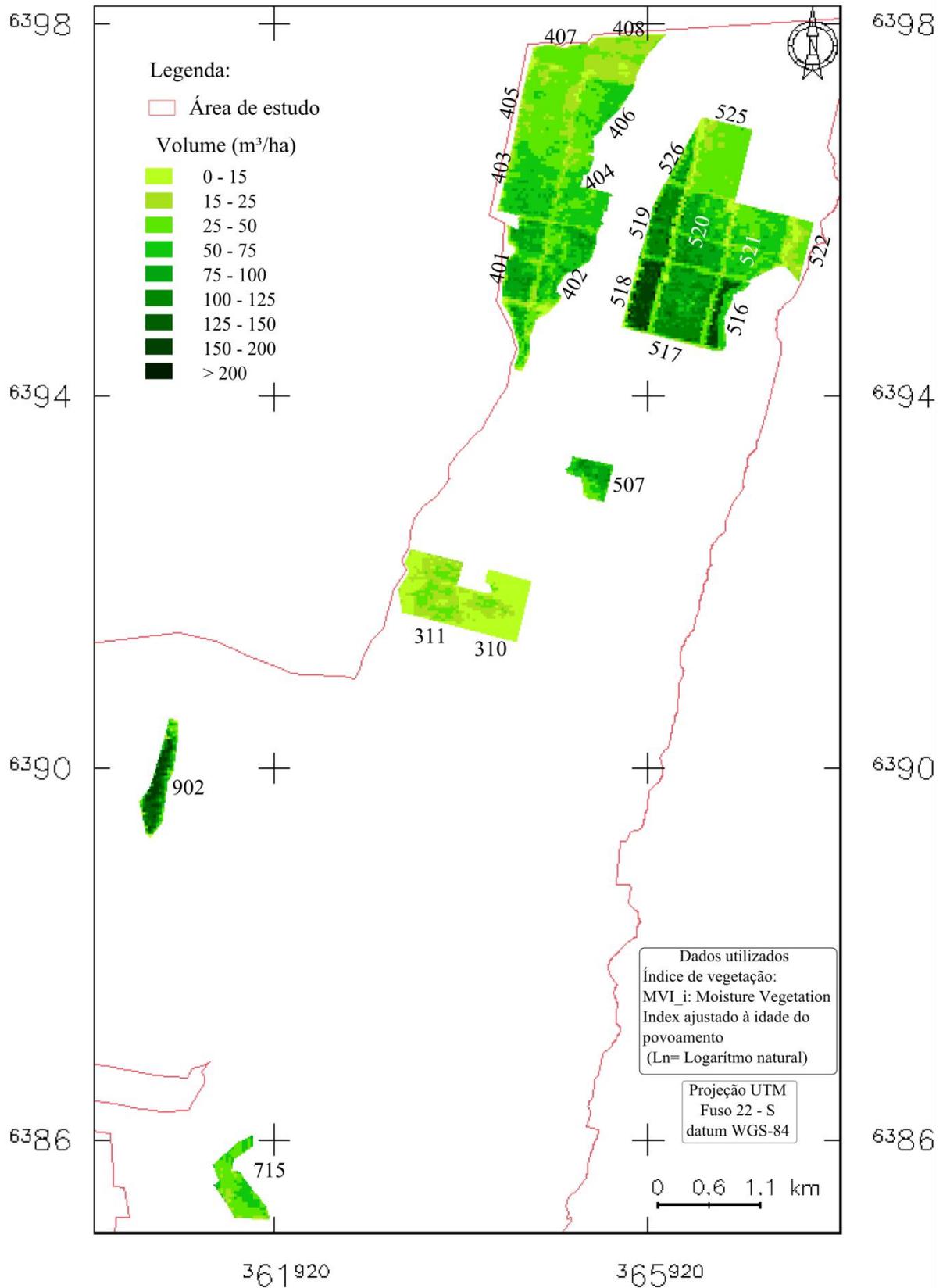
**Figura 30** - Mapa da estimativa de volume de madeira (V) de *Pinus elliottii* utilizando as bandas espectrais do LISS-III/ResourceSat-1. A numeração identifica os talhões.

Distribuição espacial de volume de madeira estimada com as bandas espectrais do LISS-III/ResourceSat -1 e TM/Landsat 5



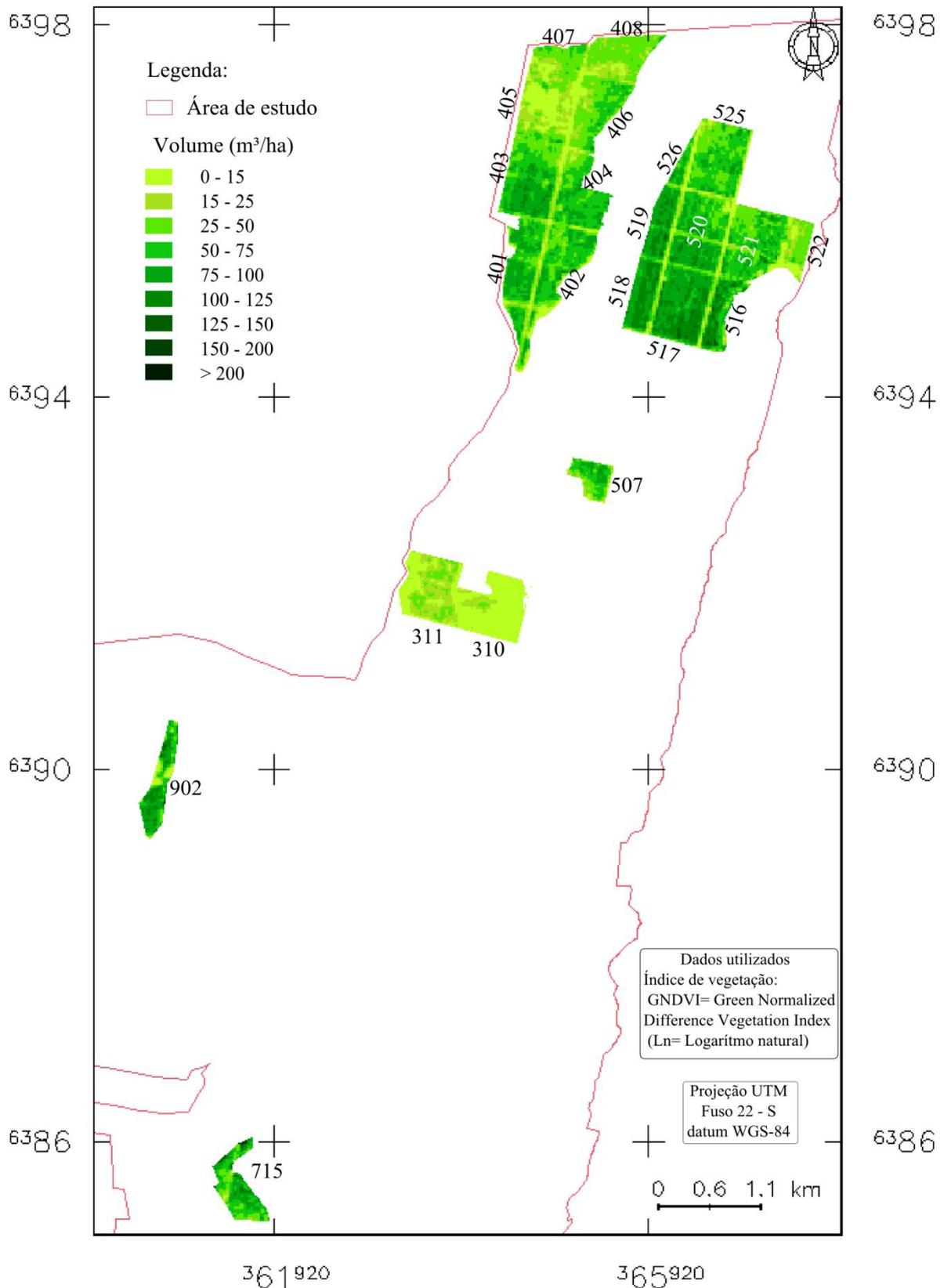
**Figura 31** - Mapa comparativo das estimativas de volume de madeira de *Pinus elliottii*, ao norte da área de estudo, gerado com as bandas espectrais dos sensores TM e LISS-III. A numeração identifica os talhões.

**Distribuição espacial de volume de madeira (V) estimada com TM/Landsat 5**  
 $\text{Ln}(V) = 2,05 + 17,55 * \text{MVI}_i$



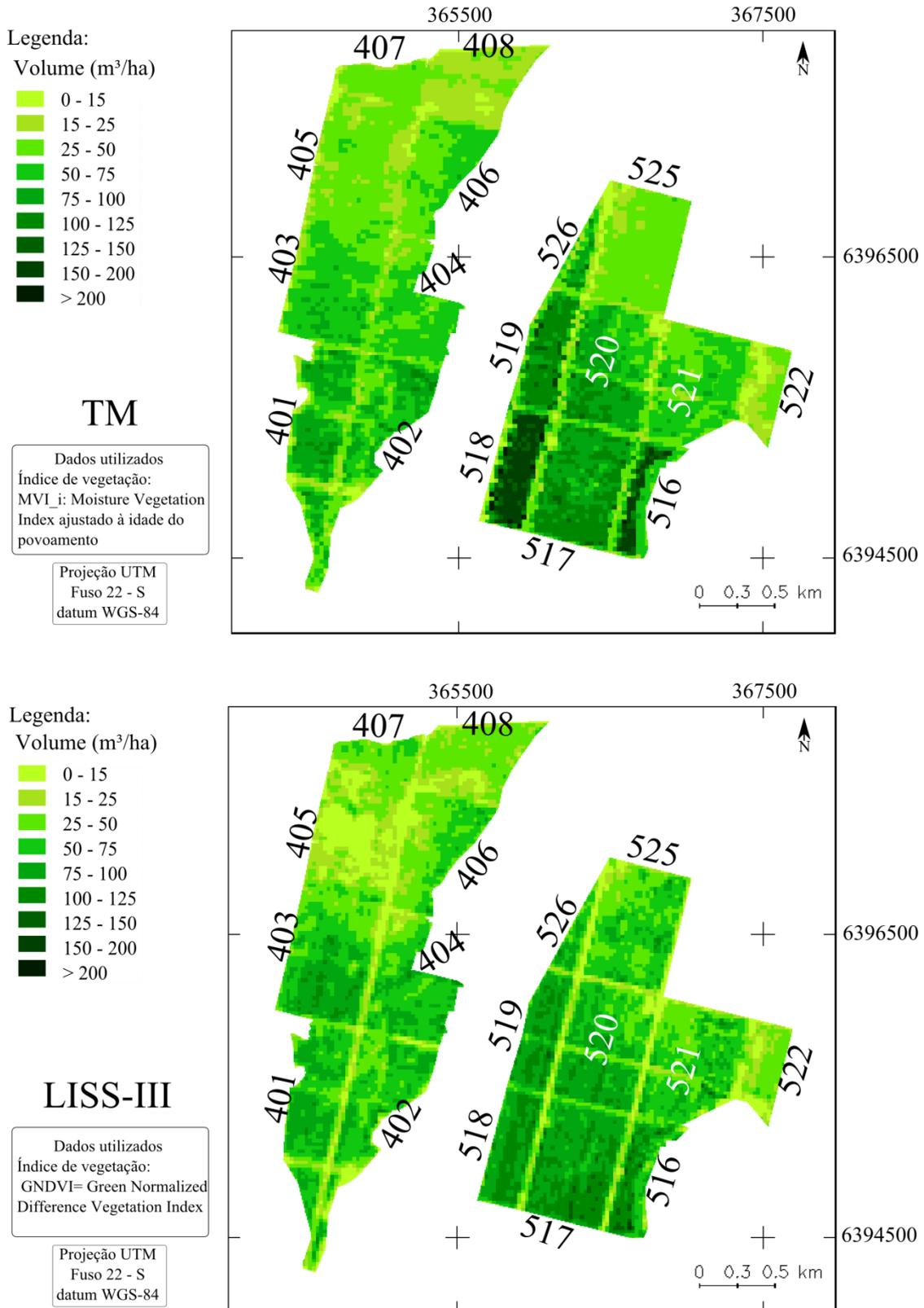
**Figura 32** - Mapa da estimativa de volume de madeira de *Pinus elliottii* utilizando índice de vegetação do TM/Landsat 5. A numeração identifica os talhões.

**Distribuição espacial de volume de madeira (V) estimada com LISS-III/ResourceSat -1**  
 $\text{Ln}(V) = 6,46 + 9,38 * \text{Ln}(\text{GNDVI})$

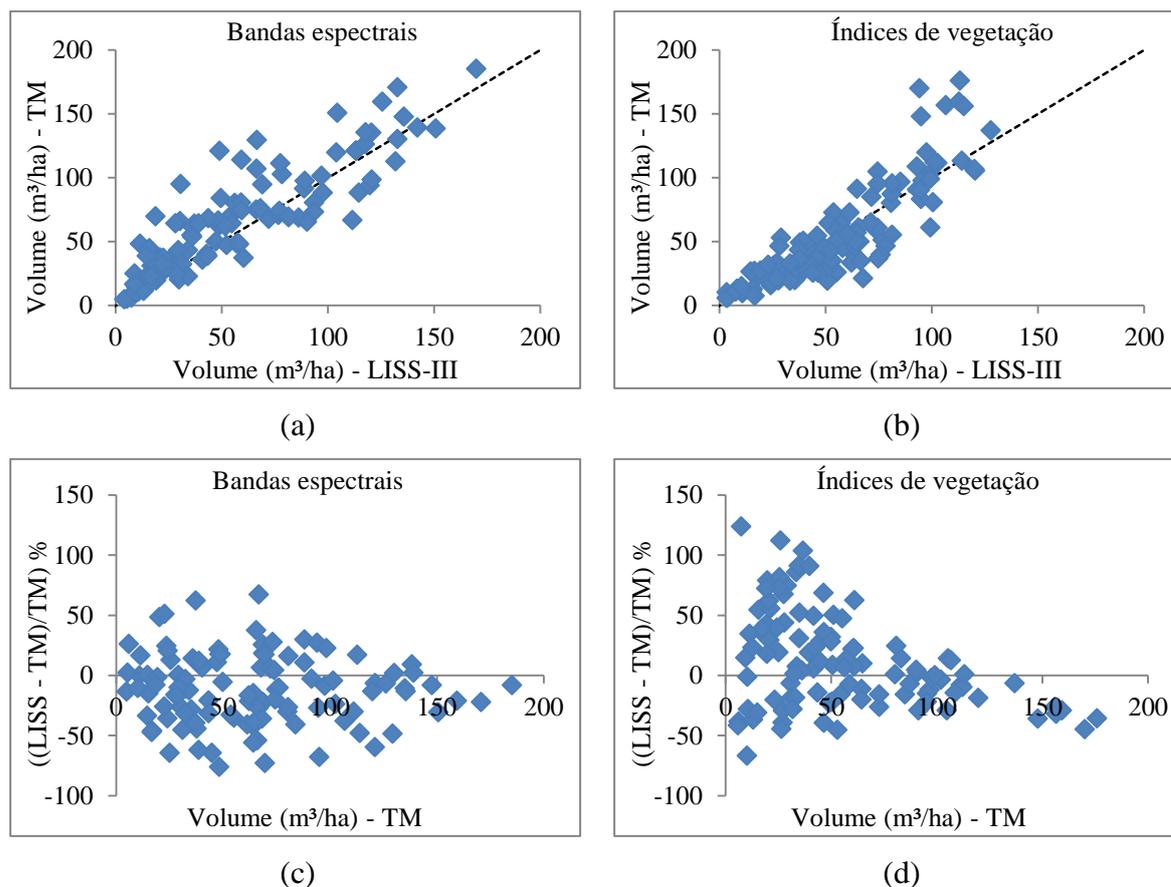


**Figura 33** - Mapa da estimativa de volume de madeira (V) de *Pinus elliottii* utilizando índice de vegetação do LISS-III/ResourceSat-1. A numeração identifica os talhões.

Distribuição espacial de volume de madeira estimada com índices de vegetação do LISS-III/ResourceSat -1 e TM/Landsat 5



**Figura 34** – Mapa comparativo das estimativas de volume de madeira de *Pinus elliottii*, ao norte da área de estudo, gerado com índices de vegetação dos sensores TM e LISS-III. A numeração identifica os talhões.



**Figura 35** – Comparação do volume de madeira estimado, a nível de pixel, pelos sensores TM e LISS-III: a) utilizando bandas espectrais, b) utilizando índices de vegetação, c) diferença percentual com as bandas espectrais, d) diferença percentual com os índices de vegetação.

**Tabela 18** - ANOVA's aplicadas aos volumes de madeira estimados com as bandas espectrais (Bandas) e com os índices de vegetação (IV's) dos sensores TM/Landsat 5 e LISS-III/ResourceSat-1.

Bandas	SQ	gl	QM	F	IV's	SQ	gl	QM	F
Tratamento	4008,3	1	4008,3	2,45 <sup>ns</sup>	Tratamento	54,4	1	54,4	0,042 <sup>ns</sup>
Resíduo	356420,3	218	1635,0		Resíduo	284497,5	218	1305,0	
Total	360428,6	219			Total	284551,9	219		

Nota: ns = Não significativo ao nível de confiança de 95%

SQ= Soma de quadrados  
gl= Graus de liberdade  
QM= Quadrado médio  
F= Valor de F calculado

A comparação dos volumes de madeira estimados com as bandas espectrais do LISS-III e TM (Figura 35 a) mostra pares de dados se distribuindo em torno da linha 1:1 com a dominância de pontos acima desta linha (66% do total). O gráfico das diferenças relativas (Figura 35 c) melhor ilustra essa situação, donde se percebe a predominância de valores

negativos, indicando que o LISS-II estimou menores volumes de madeira que o TM (em média 12% menos). Contudo, pela ANOVA, Tabela 18, as diferenças não foram estatisticamente diferentes.

Para os índices de vegetação (Figura 35 b) os pontos de dados também se localizam em ambos os lados da linha 1:1, onde se destacam um grupo de pontos com altos volumes mais afastados desta linha. Verificou-se que 59% dos pontos estão abaixo da linha 1:1, refletindo na predominância de valores positivos no gráfico das diferenças relativas (Figura 35 d), significando que o LISS-III estimou maiores volumes de madeira que o TM (em média 15% mais). Pela ANOVA, Tabela 18, as diferenças não foram estatisticamente diferentes.

Por fim realizou-se uma comparação dos resultados tendo como limite a área do talhão e levando em consideração, além das estimativas obtidas pelos dois sensores, as estimativas obtidas pelo inventário florestal, Tabela 19 e Tabela 20. A estimativa do volume médio por talhão obtido no inventário florestal é apresentada juntamente com seu intervalo de confiança (IC). Os talhões cujos valores dos volumes médios estimados pelas imagens de satélite estão localizados dentro deste IC são destacados pela cor cinza. A identificação dos talhões (ID) da Tabela 19 e Tabela 20 segue a delimitação apresentada na Figura 9 e ilustrada desde a Figura 29 até a Figura 34.

Na Tabela 19 estão presentes os volumes de madeira estimados com as bandas espectrais. Dos 22 talhões considerados, a média do volume estimado pelo LISS-III esteve dentro do IC do inventário em 16 talhões; para o TM foram 14 talhões. Observa-se que em 5 talhões nenhum dos dois sensores obteve um estimativa média dentro do IC do inventário. A diferença relativa nas estimativas obtidas pelos dois sensores aponta valores negativos em 18 talhões, indicando que o LISS-III estimou menores valores de volume de madeira que o TM (em média 11 % a menos). Corroborando com as tendências observadas na Figura 35 a) e c).

Já na Tabela 20 os resultados são referentes ao uso dos índices de vegetação nas comparações. Dos 22 talhões considerados, tanto o LISS-III quanto o TM obtiveram estimativas dentro do IC do inventário em 16 talhões, sendo que em 4 talhões nenhum dos sensores alcançou uma média dentro do IC. A análise das diferenças entre as estimativas dos dois sensores aponta novamente a dominância de valores negativos em 13 dos 22 talhões considerados, indicando que nestes 13 talhões o LISS-III estimou menores volumes de madeira que o TM. Contudo, a média das diferenças apontou um valor positivo de 2,3%, indicando que com os IV's, na média, o LISS-III estimou valores mais elevados de volume. Corroborando mais um vez com o observado na Figura 35 b) e d).

**Tabela 19** - Volume de madeira de *Pinus elliottii* estimado pelo inventário florestal, e pelas bandas dos sensores LISS-III/ResourceSat-1 e TM/Landsat 5 (Os talhões cujos valores dos volumes médios estimados pelas imagens de satélite estão localizados dentro do IC são destacados pela cor cinza).

INVENTÁRIO FLORESTAL				LISS-III (B2;B4)		TM (B2;B4;B5)		Diferença (%)
ID	Vol (m³/ha)	IC	CV (%)	Vol (m³/ha)	CV (%)	Vol (m³/ha)	CV (%)	
310	6,07	3,09 - 9,04	46,73	9,61	58,45	9,40	66,18	2,31
311	20,18	16,40 - 23,97	20,3	18,25	43,91	20,84	34,28	-12,44
401	103,64	87,73 - 119,55	22,85	78,98	26,58	91,91	26,06	-14,07
402	75,8	56,7 - 94,97	27,3	65,07	33,27	68,31	40,48	-4,75
403	71,5	49,02 - 93,91	36,3	77,39	40,42	94,88	37,66	-18,43
404	33,7	22,12 - 45,34	37,21	61,86	37,39	73,04	36,09	-15,30
405	44,6	26,07 - 63,22	54,13	26,67	56,04	26,36	49,62	1,17
406	14,5	6,61 - 22,42	51,9	38,74	45,36	57,08	34,65	-32,13
407	37,9	0,00 - 76,53	41,1	41,57	33,94	54,64	30,87	-23,92
408	32,57	20,71 - 44,44	50,95	27,28	33,35	29,20	24,85	-6,57
507	71,01	51,14 - 90,88	19,80	68,62	40,53	71,79	36,91	-4,41
516	145,70	141,99 - 149,35	1,50	125,14	38,58	138,06	26,44	-9,36
517	137,10	101,99 - 172,15	24,40	113,23	28,13	118,14	26,99	-4,16
518	137,40	81,27 - 193,48	33,40	108,82	23,95	141,82	24,43	-23,27
519	105,90	85,01 - 126,73	15,90	108,87	24,06	131,66	21,93	-17,31
520	70,76	50,12 - 91,39	31,54	81,74	33,72	84,75	31,73	-3,55
521	68,68	45,22 - 92,13	27,51	55,81	37,97	52,82	28,17	5,65
522	26,60	17,37 - 35,86	24,4	23,94	44,37	28,08	30,95	-14,73
525	68,00	50,74 - 85,18	29,3	53,21	39,97	62,10	36,10	-14,32
526	63,90	34,72 - 93,09	18,4	69,63	42,76	94,21	24,76	-26,08
715	48,63	33,25 - 64,02	28,91	82,08	66,66	65,63	39,41	25,08
902	103,09	76,82 - 195,37	27,37	87,94	55,82	119,04	33,03	-26,13
$\bar{x}$	67,60			64,75		74,26		-10,76

Nota: ID= Identificação do Talhão

IC= Intervalo de confiança para a média a 95% de probabilidade

Vol= Volume médio de madeira em m³/ha

CV= Coeficiente de Variação

Diferença (nos volumes) = ((LISS-III) – (TM))/(TM)\*100

B2 = Banda espectral correspondente à região do verde

B4 = Banda espectral correspondente à região do infravermelho próximo

B5 = Banda espectral correspondente à região do infravermelho médio

$\bar{x}$  = Média aritmética

**Tabela 20** - Volume de madeira de *Pinus elliottii* estimado pelo inventário florestal, e pelos índices de vegetação dos sensores LISS-III/ResourceSat-1 e TM/Landsat 5 (Os talhões cujos valores dos volumes médios estimados pelas imagens de satélite estão localizados dentro do IC são destacados pela cor cinza).

ID	INVENTÁRIO FLORESTAL			LISS-III (GNDVI)		TM (MVI <sub>i</sub> )		Diferença (%)
	Vol (m <sup>3</sup> /ha)	IC	CV (%)	Vol (m <sup>3</sup> /ha)	CV (%)	Vol (m <sup>3</sup> /ha)	CV (%)	
310	6,07	3,09 - 9,04	46,73	7,35	87,39	11,52	55,52	-36,15
311	20,18	16,40 - 23,97	20,3	18,79	42,87	20,45	32,60	-8,12
401	103,64	87,73 - 119,55	22,85	73,38	19,22	79,06	21,84	-7,19
402	75,8	56,7 - 94,97	27,3	62,94	27,22	63,79	32,61	-1,33
403	71,5	49,02 - 93,91	36,3	70,68	29,80	60,02	23,35	17,76
404	33,7	22,12 - 45,34	37,21	61,52	27,84	51,14	26,62	20,32
405	44,6	26,07 - 63,22	54,13	19,72	67,68	32,19	24,42	-38,74
406	14,5	6,61 - 22,42	51,9	43,28	37,92	46,11	25,89	-6,14
407	37,9	0,00 - 76,53	41,1	40,18	33,86	35,09	18,88	14,53
408	32,57	20,71 - 44,44	50,95	28,92	30,50	21,32	17,88	35,66
507	71,01	51,14 - 90,88	19,80	63,38	28,37	72,10	30,19	-12,09
516	145,70	141,99 - 149,35	1,50	109,58	11,56	121,40	39,64	-9,73
517	137,10	101,99 - 172,15	24,40	96,37	15,22	96,82	21,54	-0,47
518	137,40	81,27 - 193,48	33,40	99,77	11,61	147,92	29,08	-32,55
519	105,90	85,01 - 126,73	15,90	97,03	11,96	105,09	21,97	-7,67
520	70,76	50,12 - 91,39	31,54	75,73	23,68	80,64	27,06	-6,09
521	68,68	45,22 - 92,13	27,51	55,67	28,66	52,91	27,28	5,22
522	26,60	17,37 - 35,86	24,4	29,03	37,71	22,42	32,16	29,49
525	68,00	50,74 - 85,18	29,3	55,38	30,29	32,97	24,62	68,00
526	63,90	34,72 - 93,09	18,4	71,74	20,65	68,39	43,18	4,90
715	48,63	33,25 - 64,02	28,91	70,63	30,39	44,39	25,85	59,09
902	103,09	76,82 - 195,37	27,37	80,32	39,33	128,66	30,97	-37,57
$\bar{x}$	67,60			60,52		63,38		2,32

Nota: ID= Identificação do Talhão

IC= Intervalo de confiança para a média a 95% de probabilidade

Vol= Volume médio de madeira em m<sup>3</sup>/ha

CV= Coeficiente de Variação

Diferença (nos volumes) = ((LISS-III) – (TM))/(TM)\*100

GNDVI = Green Normalized Difference Vegetation Index

MVI<sub>i</sub> = Moisture Vegetation Index ajustado pela idade do povoamento

$\bar{x}$  = Média aritmética

Lembrando que a intensidade amostral do inventário foi menor que 1,6% da área dos talhões, existe a possibilidade de que as amostras do inventário possam não ser representativas da população, principalmente se o talhão tiver diferentes qualidades de sítio. Neste ponto, o caráter sinóptico das imagens de satélite pode auxiliar no inventário florestal uma vez que as estimativas são realizadas em toda a área dentro do talhão.

## CONCLUSÃO

Primeiramente foi realizada uma comparação cruzada de medidas pontuais (escala de pixel) de reflectância de superfície oriundas dos sensores LISS-III e TM, em área com plantio comercial de *Pinus elliottii*. Encontrou-se uma diferença média menor que 20% entre as reflectâncias de superfície recuperadas pelas bandas espectrais equivalentes dos dois sensores.

As diferenças médias foram ainda menores quando foi realizada a comparação cruzada entre as estimativas de volume de madeira geradas pelos dois sensores, também em escala de pixel. A diferença foi de 12% quando foram utilizadas as bandas espectrais e de 15% quando foram utilizados os índices de vegetação.

A análise de correlação entre as variáveis biofísicas florestais (altura, dap, área basal e volume de madeira) indicou que todas são altamente associadas ( $r > 0,86$ ). Já a correlação destas variáveis com a idade retornou  $r < 0,70$ , o que foi justificado pelas diferentes condições de sítio em alguns talhões e ocorrência de estiagem no verão de 2004-2005.

Em vista da alta associação entre as variáveis biofísicas, somente o volume de madeira foi selecionado para investigar a relação com os dados espectrais. Tanto o sensor TM quanto o LISS-III foram sensíveis à variação do volume de madeira, sendo que, o aumento do volume acarretou uma diminuição das reflectâncias espectrais nas bandas do visível e do infravermelho médio e um aumento da reflectância espectral na banda do IVP e nos índices de vegetação.

A sensibilidade dos dados espectrais em detectar as variações dos parâmetros biofísicos de plantios florestais parece ser fortemente dependente do grau de fechamento das copas e da classe de fundo. A ausência de sub-bosque e um fechamento incompleto de copa são extremamente positivos para modelar a relação entre um dado biofísico e um dado espectral, pois, neste caso, a variação da reflectância na imagem está associada ao crescimento da planta. Contudo, a partir do fechamento da copa, os dados espectrais perdem gradativamente a sensibilidade às variações dos parâmetros biofísicos saturando as relações.

A aplicação do logaritmo nas bandas espectrais aumentou os valores dos coeficientes de correlação linear, à exceção do IVP, retornando valores de  $r$  entre 0,69 (IVP) a 0,83 (Verde) para o LISS-III e entre 0,68 (Vermelho) a 0,79 (IVM) para o TM. Sendo que o LISS-III apresentou valores de  $r$  ligeiramente superiores que os encontrados com o TM, porém as diferenças só foram significativas nas bandas equivalentes do verde.

Quanto aos índices de vegetação foram testadas as relações entre o volume de madeira com os IV's originais (SR, NDVI, SAVI, MVI e GNDVI) e com os IV's originais ajustados pela idade do povoamento (SR<sub>i</sub>, NDVI<sub>i</sub>, MVI<sub>i</sub> e GNDVI<sub>i</sub>). A aplicação do logaritmo nos IV's aumentou os valores dos coeficientes de correlação linear somente para os IV's originais, retornando valores de *r* entre 0,77 (NDVI) a 0,84 (GNDVI) com o LISS-III e entre 0,73 (NDVI) a 0,82 (MVI) para o TM.

O NDVI, tradicionalmente utilizado para estimar biomassa florestal, foi o que menos explicou a variabilidade do volume. Este fato pode estar associado a maior contribuição de ruídos nesta banda em virtude da alta absorvância da radiação pela vegetação, resultando em um baixo sinal chegando ao sensor (para o TM a reflectância média foi de 2,30% e para o LISS-III 2,32%). O que deve explicar o maior coeficiente de variação da banda do vermelho entre as quatro bandas consideradas, para os dois sensores.

Assim, a troca da banda do vermelho pela banda do verde (GNDVI) ou pela banda do IVM (MVI) na fórmula do NDVI alcançaram as melhores relações com o volume entre os IV's originais. Assim, sugere-se que em trabalhos similares várias combinações de bandas espectrais sejam testadas para definir o índice de vegetação mais adequado ao objetivo de estudo.

O ajuste dos IV's originais pela idade melhorou a relação linear com o volume, ao ponto de não ser necessário aplicar logaritmo nas variáveis para melhorar a associação linear entre elas. Além disso, o ajuste pela idade aumentou o intervalo dinâmico do novo IV, e, aparentemente, aumentou a sensibilidade do novo IV nos povoamentos de maior volume. Contudo, como foram monitorados somente povoamentos jovens de *P. elliottii*, com idades entre 5-8 anos, a funcionalidade deste ajuste não foi testada nos povoamentos mais velhos. Portanto, para resultados mais conclusivos ter-se-ia que monitorar todo o ciclo de desenvolvimento de *P. elliottii* para delimitar até onde este ajuste pela idade pode melhorar a sensibilidade dos dados espectrais à variação do volume.

Também, outro ponto a ser mais bem definido é se o denominador IR (Idade de Rotação) presente no termo que ajusta o IV pela idade ( $i/IR$ ) deva ser, de fato, a idade final do plantio. Outra possibilidade seria testar o IR como sendo a idade em que ocorre o fechamento completo do dossel.

O ajuste pela idade não foi testado em florestas nativas, contudo uma sugestão neste ponto pode ser feita. Em florestas nativas não se tem uma idade de rotação IR, mas, por outro lado, existe uma idade no tempo na qual a floresta deve atingir seu clímax, se intocada. Isto

significa, em tese, a idade onde a floresta alcança seu máximo valor de biomassa ou de qualquer outro parâmetro biofísico. Desta forma, a idade clímax poderia ser testada como a idade IR em estudos relacionando parâmetros biofísicos de florestas nativas com índices de vegetação.

As melhores correlações com o volume de madeira foram com o logaritmo dos IV's originais e com os IV's originais ajustados pela idade. Contudo, nem as diferenças entre o logaritmo dos IV's originais com os IV's ajustados pela idade (para um mesmo sensor) nem a diferença entre o mesmo IV nos dois sensores foram estatisticamente diferentes.

Quatro equações foram selecionadas para estimar o volume de madeira na área de estudo. Uma equação para cada sensor considerando somente as bandas espectrais e uma equação para cada sensor considerando somente os índices de vegetação. Quanto as bandas, para o TM as variáveis independentes foram a banda do verde, do IVP e do IVM, explicando 70% da variabilidade de volume; para o LISS-III, as variáveis independentes foram a banda do verde e do IVP, explicando 72% da variabilidade do volume. Quanto aos IV's, para o TM, a variável independente foi o MVI<sub>i</sub>, explicando 68% da variabilidade do volume; já o LISS-III utilizou o GNDVI, o qual explicou 70% da variabilidade do volume.

Neste trabalho, as equações foram testadas com base em dados de campo provindos de U.A's com dimensões menores que as resoluções espaciais das duas imagens. Neste sentido, em trabalhos similares, recomenda-se instalar U.A's com dimensões iguais ou maiores que o lado do pixel, pois isto tende a facilitar a identificação e seleção do pixel contendo a informação espectral associado ao dado de campo e aumentar a confiança dos resultados.

Ainda quanto aos dados de inventário florestal, em alguns talhões foi detectada grande variabilidade nos dados medidos, indicando sítios com qualidades diferentes dentro do mesmo talhão. Desta forma, em estudos futuros, informações como qualidade de sítio poderiam ser testadas como dado auxiliar com o objetivo de aumentar a precisão dos modelos. Desta forma, as relações das plantas com os dados espectrais poderiam ser investigadas de maneira separada gerando modelos de predição por sítio.

As médias das estimativas de volume de madeira obtidas com LISS-III estiveram dentro do intervalo de confiança da média do inventário florestal em 73% dos talhões considerados, tanto utilizando bandas espectrais como IV's; com o TM a coincidência foi de 64% utilizando bandas espectrais e 73% utilizando IV's. Na maioria dos talhões, o sensor TM gerou estimativas de volume de madeira em valores superiores às geradas pelo LISS-III.

Tais resultados com equações explicando em torno de 70% da variabilidade do volume de madeira podem ser considerados bons na área florestal. Isto, o fato de que a amostragem do inventário florestal cobre menos de 2% da área plantada e o caráter sinóptico das imagens de satélite indicam que a metodologia aqui empregada pode ser utilizada para auxiliar no inventário florestal de povoamentos jovens de *P. elliottii*.

Contudo não é recomendável a aplicação das equações aqui testadas fora da área de estudo, mesmo sendo em plantios de *P. elliottii*. Isto porque o desenvolvimento de cada povoamento é influenciado pelas condições edafoclimáticas locais e pelas estratégias de manejo adotadas por cada administrador florestal, o que tende a gerar povoamentos com características únicas. Logo, dosséis de plantios localizados em diferentes áreas de estudo, mesmo com características similares, devem sensibilizar os sensores ópticos orbitais de maneira diferenciada fazendo com que a modelagem da relação entre um dado espectral e um parâmetro biofísico seja própria para cada área de estudo.

Também, não se recomenda a aplicação das equações selecionadas para povoamentos com idades fora do intervalo entre 5-8 anos na área de estudo, haja vista o caráter empírico das equações. Para estimar variáveis biofísicas de talhões com outras idades recomenda-se a realização de um inventário florestal nestas áreas a fim de que se possa testar a metodologia num intervalo maior de idades.

Por fim, quanto aos sensores LISS-III e TM conclui-se que os mesmos apresentam alta similaridade. Os resultados obtidos na comparação cruzada das reflectâncias, na análise da significância das diferenças entre os valores dos coeficientes de correlação das bandas espectrais e IV's, na análise de regressão e nas comparações dos volumes de madeira gerados indicam que o sensor LISS-III pode ser utilizado como complemento e em substituição aos dados TM nas áreas de *P. elliottii* estudadas.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, L. J. O. ; PACHÊCO, A.; COSTA, T. C. C.; LOPES, O. F.; OLIVEIRA, M. A. J. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação de dados do sensor TM/LANDSAT. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n.3, p. 492-498, 2002.

ADLER-GOLDEN, S. M.; MATTHEW, M. W.; BERNSTEIN, L. S.; LEVINE, R. Y.; BERK, A.; RICHTSMEIER, S. C.; ACHARYA, P. K.; ANDERSON, G. P.; FELDE, G.; GARDNER, J.; HOKE, M.; JEONG, L. S.; PUKALL, B.; RATKOWSKI, A.; BURKE, H. H. Atmospheric correction for short-wave spectral imagery based on MODTRAN4. In: SPIE, 3753, Denver, 1999. **Proceedings...** Denver, 1999. p. 61-69.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: < <http://portalsnrh.ana.gov.br/>>. Acesso em 22 abr. 2013.

AHAMED, T.; TIAN, L.; ZHANG, Y.; TING, K.C. A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 2455-2469. 2011.

AHERN, F. J.; ERDLE, T.; MACLEAN, D. A.; KNEPPECK, I. D. A quantitative relationship between forest growth rates and Thematic Mapper reflectance measurements. **International Journal of Remote Sensing**, 12, 387-400, 1991.

ANDERSON, J. H.; WEBER, K. T.; GOKHALE, B.; CHEN, F.. Intercalibration and Evaluation of ResourceSat-1 and Landsat-5 NDVI. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 37(2), 213-219, 10.5589/m11-032, 2011.

ANTUNES, M.A.H.; FREIRE, R.M.B.; BOTELHO, A.S.; TONIOLLI, L.H. Correções atmosféricas de imagens de satélites utilizando o Modelo 6S. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 21, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2003.

ARAÚJO, L. S.; SANTOS, J. R.; SHIMABUKURO, Y. E. Relationship between SAVI and biomass data forest and savanna contact zone in the Brazilian Amazonia. In: INTERNATIONAL CONGRESS FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 19., 2000, Amsterdam, Netherlands. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing...** 2000.

ARDÖ J. Volume quantification of Coniferous forest compartments using Spectral Radiance recorded by Landsat Thematic Mapper. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 13, n. 9, p. 1779-1786, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário Estatístico da ABRAF 2011- Ano base 2010**. Brasília: 2011. 130 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário Estatístico da ABRAF 2012- Ano base 2011**. Brasília: 2012. 145 p.

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

BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D.J. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON

REMOTE SENSING AND IGARSS'90, 12., 1990, Vancouver. **Proceedings...**Vancouver. 1989. p. 1355-1358.

BERK, A.; ANDERSON, G. P.; ACHARYA, P. K.; HOKE, M. L.; CHETWYND, J. H.; BERNSTEIN, L. S.; SHETTLE, E. P.; MATTHEW, M. W.; ADLER-GOLDEN, S. M. MODTRAN4 Version 253 References 3 Revision 1 User's Manual. Tech. rep., Air Force Research Laboratory, Hanscom Air Force Base, MA, USA, 2003.

BERK, A.; BERNSTEIN, L. S.; ANDERSON, G. P.; ACHARYA, P. K.; ROBERTSON, D. C.; CHETWYND, J. H.; ADLER-GOLDEN, S. M. MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, 367–375, 1998.

BERRA, E. F.; BRANDELERO, C.; PEREIRA, R. S.; SEBEM, E.; GOERGEN, L. C.; BENEDETTI, A. C. P.; LIPPERT, D. B. Estimativa do volume total de madeira em espécies de eucalipto a partir de imagens de satélite Landsat. **Ciência Florestal**, v. 22, p. 853-864, 2012a.

BERRA, E. F.; FONTANA, D. C.; ANDRADE, A. M. Relação entre o incremento em volume de um povoamento de Pinus Elliottii com dados de precipitação pluvial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 17, 2012, Gramado. **Anais...** XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2012b.

BERRA, E. F.; FONTANA, D. C.; PEREIRA, R. S. Accuracy of forest stand volume estimation by Landsat TM imagery with different geometric and atmospheric correction methods. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL ACCURACY ASSESSMENT IN NATURAL RESOURCES AND ENVIRONMENTAL SCIENCES, 10, 2012, Florianópolis. **Proceedings...** Tenth International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, 2012c. p. 103-108.

BERRA, E.F. **Relatório de estágio supervisionado**. Relatório apresentado ao curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010. 48 p.

BORBA, A. C. L. **Avaliação de dados do Landsat 5 TM, componentes de mistura obtidos de mínimos quadrados e um método de conjuntos contínuos na estimativa de variáveis dendrométricas de florestas de Eucalyptus ssp, município de Barra do Ribeiro, RS**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – CEPSRM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BOYD, D.S.; DANSON, F.M. Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development. **Progress in Physical Geography**, n 29, p. 1-26, 2005.

BOYD, D.S.; FOODY, G.M.; CURRAN, P.J. The relationship between the biomass of Cameroonian tropical forests and radiation reflected in middle infrared wavelengths 3,0-5,0  $\mu\text{m}$ . **International Journal of Remote Sensing**, 20, 1017–24, 1999.

BROCKHAUSE, J. A., KHORAM, S. A comparison of Spot and Landsat-TM Data for Use in Conducting Inventories of Forest Resources, **International Journal of Remote Sensing**, vol. 13, n. 16, p. 3035-3043, 1992.

BUAINAIN, A. M.; BATALHA, M. O. **Cadeia Produtiva de Madeira**. Série Agronegócios. Volume 6. 2007. Disponível em: <<http://www.iica.org.br/Docs/CadeiasProdutivas/Cadeia%20Produtiva%20de%20Florestas%20Plantadas%20e%20Madeira.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2013.

BURGESS, D.W.; PAIRMAN, D. Bidirectional reflectance effects in NOAA-AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, 18, 2815-2825, 1997.

CÂMARA SETORIAL DE SILVICULTURA. **Agenda Estratégica do Setor de Florestas Plantadas**. Brasília: outubro de 2009. Disponível em: <[http://www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/file/camaras\\_setoriais/Florestas\\_plantadas/9\\_reuniao/Agenda\\_Sivicultura.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/camaras_setoriais/Florestas_plantadas/9_reuniao/Agenda_Sivicultura.pdf)>. Acesso em: 11 jan. 2013.

CAMPBELL, J.B. **Introduction to Remote Sensing**. New York: The Guilford Press, 1996.

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: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos, INPE, 2007. p. 1619-1625.

CANAVESI, V.; PONZONI, F. J.; VALERIANO, M. M. Estimativa de volume de madeira em plantios de Eucalyptus spp. utilizando dados hiperespectrais e dados topográficos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 539-549, maio/jun. 2010.

CARRARO, C.C.; GAMERMANN, N.; EICK, N.C.; BERTOLUZZI, C.A.; JOST, H.; PINTO, J.F. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Instituto de Geociências, UFRGS, 1974. Escala 1: 1.000.000.

CARREIRAS, J. M. B.; PEREIRA, J. M. C.; PEREIRA, J. S. Estimation of tree canopy cover in evergreen oak woodlands using remote sensing. **Forest Ecology and Management**, 223, 45-53, 2006.

CENTRO ESTADUAL DE METEOROLOGIA (CEMETRS). **Atlas Climático do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <<http://www.r3pb.com.br/AtlasCemetRS/#/12/>>. Acesso em: 18 out. 2012.

CHANDER, G.; COAN, M. J.; SCARAMUZZA, P. L. Evaluation and comparison of the IRS-P6 and the Landsat Sensors. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 46, 1, p. 209-221, 2008.

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**, 113, p. 893-903, 2009 a.

CHANDER, G.; MEYER, D.J.; HELDER, D.L.. Cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and EO-1 ALI sensors. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 42 (12), pp. 2821-2831, 2004.

CHANDER, G.; STENSAAS, G.L. Evaluation of candidate Landsat data gap sensors. In: IGARSS INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, IV, 2008, Massachusetts. **Proceedings...** Massachusetts, 2008. p. 1376-1379.

CHANDER, G.; XIONG, X.; ANGAL, A.; CHOI, T.; MALLA, R.. Cross-comparison of the IRS-P6 AWiFS sensor with the L5 TM, L7 ETM+, & Terra MODIS sensors, **Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering**, vol. 7474, 2009 b.

CHAVEZ JR., P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, p. 459-479, 1988.

CHAVEZ Jr., P.S. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.55, p.1285-1294, 1989.

- CHUVIECO, E. **Fundamentos de teledetección espacial**. Madrid: Ediciones Rialp, 1990. 453p.
- CORAZZA, R.; CASSOL, H. L. G.; KUPLICH, T. M. Uso e cobertura da terra na região da Floresta Nacional do Tapajós (PA) com suporte de imagens LISS III. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 2989-2996.
- CORREIO DO POVO. Celulose em Guaíba - Investimento será de US\$ 2,9 bi. Ano 117 N° 266 - Porto Alegre, 22 jun. 2012. Disponível em: <<http://www.correiodopovo.com.br/Impresso/?Ano=117&Numero=266&Caderno=0&Noticia=435967>>. Acesso em: 22 jun. 2012.
- CURRAN, P. J.; HAY, A. M. The importance of measurement error for certain procedures in remote sensing at optical wavelengths. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 52, p. 229–241, 1986.
- DA COSTA, L. P. E. **Relações biométricas em povoamentos jovens de *Pinus taeda* L. na província de Corrientes, República Argentina**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- DANSON, F. M. Preliminary evaluation of the relationships between SPOT-1 HRV data and forest stand parameters. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 10, p. 1571-1575, 1987.
- DANSON, F.M.; CURRAN, P.J. Factors affecting the remotely sensed response of coniferous forest plantations. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.43, p.55-65, 1993.
- DE VEAUX, R.D. A guided tour of modern regression methods. In: FALL TECHNICAL CONFERENCE, 1995, Section on Physical and Engineering Sciences, 1995, St. Louis, MO. **Proceedings...** 1995.
- De WULF, R.; GOOSSENS, R.; DE ROOVER B. P. ; BÖRRY F. Extraction of forest stand parameters from panchromatic and multispectral SPOT-1 data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, n. 9, p.1571 -1588, 1990.
- DIKSHIT, O.; ROY, D.P. An empirical investigation of image resampling effects upon the spectral and textural supervised classification of a high spatial resolution multispectral image. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 62, p.1085–1092, 1996.
- EKSTRAND, S. Assessment of forest damage with Landsat TM: correction for varying forest stand characteristics. **Remote Sensing of Environment**, v. 47, p. 291-302, 1994.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1990. 431p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1999. 412p.
- ENCINAS, J. I.; DA SILVA, G. F.; PINTO, J. R. R. **Idade e crescimento das árvores**. Comunicações Técnicas Florestais. Brasília: Universidade de Brasília, v.7, n.1, 2005. 43p.
- ENVI. FLAASH module user's guide. ENVI help, 2008.

EPIPHANIO, J.C.N.; HUETE, A.R. Dependence of NDVI and SAVI on sun sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in alfalfa. **Remote Sensing of Environment**, 51:351-360, 1995.

ESTEVEES, E. **Regressão não-linear utilizando a ferramenta Solver® do Microsoft Excel®**. Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve, Faro, 2010. 13 p. Disponível em: < [http://www.academia.edu/407608/Regressao\\_nao-linear\\_utilizando\\_a\\_ferramenta\\_Solver\\_do\\_Microsoft\\_Excel\\_](http://www.academia.edu/407608/Regressao_nao-linear_utilizando_a_ferramenta_Solver_do_Microsoft_Excel_) >. Acesso em: 24 jan. 2013.

FAZAKAS, Z.; NILSSON, M.; OLSSON, H. Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data. **Agricultural and Forest Meteorology**, 98-99, p. 417-425, 1999.

FERNANDES, D. H. F.; SOARES, V. P.; OLIVEIRA, F. S.; RIBEIRO, C. A. Á. S.; GLERIANI, J. M. Uso de imagens ALOS para estimar parâmetros biofísicos em plantações de eucaliptos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 1674-1681.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de Biometria Florestal**. 1. ed. Santa Maria: CEPEF-UFSM, 1992. v. 1. 269p.

FLORIANO, E.P., **Efeito da desrama sobre o crescimento e a forma do Pinus elliottii Engelm.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

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, p. 463-474, 2003.

FRANKLIN, J. Thematic mapper analysis of coniferous forest structure and composition. **International Journal of Remote Sensing**, Abinjdou, v. 7, n. 10, p. 1287-1301, 1986.

FRANKLIN, S. E.; MCDERMID, G. J. Empirical relations between digital SPOT HRV and CASI spectral response and lodgepole pine (*Pinus contorta*) forest stand parameters. **International Journal of Remote Sensing**, 14, 2331 – 1348, 1993.

FREIRE, M.L.F. **Correção atmosférica em imagens LANDSAT contaminadas por efeito de adjacência**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1996. 98 p.

GALVÃO, L.S.; VITORELLO, I.; PIZARRO, M.A. An adequate band positioning to enhance NDVI contrasts among green vegetation, senescent biomass and tropical soils. **International Journal of Remote Sensing**, 21, 1953-1960, 2000.

GAMON, J.A.; FIELD, C.B.; GOULDEN, M.; GRIFFIN, K.; HARTLEY, A.; JOEL, G.; PENUELAS, J.; VALENTINI, R. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthetic activity in three Californian vegetation types. **Ecological Applications**, 5, 28-41, 1995.

GAO, X.; HUETE, A R.; NIW; MIURA, T. Optical biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. **Remote Sensing of Environment**, 74, 609-620, 2000.

GATES, D.M. Physical and physiological properties of plants. In: **Remote Sensing with Special Reference to Agriculture and Forestry**. Washington: National Academy of Sciences, 1970. p. 164-223.

GAUSMAN, H.W.; ALLEN W.A.; CARDENAS R. Reflectance of cotton leaves and their structure. **Remote Sensing of Environment**, 1, 19-22, 1969.

GEBRESLASIE, M. T. **The estimation of eucalyptus plantation forest structural attributes using medium and high spatial resolution satellite imagery**. Tese (Doctor of Philosophy in Applied Environmental Science) - University of KwaZulu-Natal Pietermaritzburg, South Africa, 2008.

GHAHRAMANY, L.; FATEHI, P.; GHAZANFARI, H. Estimation of Basal Area in West Oak Forests of Iran Using Remote Sensing Imagery. **International Journal of Geosciences**, vol. 3, n. 2, p. 398-403, 2012.

GILABERT, M.A; GONZÁLEZ-PIQUERAS; J; GARCÍA-HARO, F.J; MELIA, J. A generalized soil-adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**. v. 82, p. 303–310, 2002.

GILMAN, E. F.; WATSON, D. G. **Pinus elliottii** - Fact Sheet ST-463. [Gainesville]: United States Forest Service-Environmental Horticulture Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Oct. 1994. 4 p.

GITELSON, A.; KAUFMAN, Y.; MERZLYAK, M. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 289–298, 1996.

GLENN, E. P.; HUETE, A. R.; NAGLER, P. L.; NELSON, S. G. Relationship between remotely-sensed vegetation indices and plant physiological processes: what vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. **Sensors**, 8, p. 2136-60, 2008.

GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. **A determinação de equações volumétricas na engenharia florestal**. Piracicaba: IPEF Série Técnica, 9, 26, 1993.

GONÇALVES, F. G.; YATSKOV, M.; SANTOS, J. R.; TREUHAFT, R. N.; LAW, B. E. Relacionando LANDSAT ETM+ e dados de inventário florestal para mapeamento de estágios sucessionais em uma floresta tropical úmida. **Ambiência**, v. 6, p. 167-174, 2010.

GOOGLE EARTH®. Versão 7.0.2. 2013. Software. Disponível em: <<http://www.google.com/earth/index.html>>. Acesso em: 15 jan. 2013.

GUANTER, L. **New algorithms for atmospheric correction and retrieval of biophysical parameters in Earth Observation**. Application to ENVISAT/MERIS data. Tese (Doutorado em Física) – Departamento de física aplicada, Universidade de Valencia, Espanha, 2006.

GÜRTLER, S.; EPIPHANIO, J. C. N.; LUIZ, A. J. B.; FORMAGGIO, A. R. Planilha eletrônica para o cálculo da reflectância em imagens TM e ETM+ LANDSAT. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, p. 162- 167, 2005.

GUYOT, M.; GUYON, D.; RIOM, J. Factors affecting the spectral response of forest canopies: a review. **Geocarto International**, 4, 3, p. 3-18, 1989.

HADJIMITSIS, D. G.; PAPADAVID, G.; AGAPIOU, A.; THEMISTOCLEOUS, K.; HADJIMITSIS, M. G.; RETALIS, A.; MICHAELIDES, S.; CHRYSOULAKIS, N.; TOULIOS, L.; CLAYTON, C. R. I. Atmospheric correction for satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: impact on vegetation indices. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 10, p. 89-95, 2010.

- HOLMGREN, J.; JOYCE, S.; NILSSON, M.; OLSSON, H. Estimating Stem Volume and Basal Area in Forest Compartments by Combining Satellite Image Data with Field Data. **Scandinavian Journal of Forest Research**, 15, p. 103–111, 2000.
- HORLER, D.N.H., AHERN, F.J. Forestry information content of thematic mapper data. **International Journal of Remote Sensing**, 7, p. 405–428, 1986.
- HUETE, A. R. Soil influences in remotely sensed vegetation canopy spectra. In: ASRAR, G. Ed. *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*. New York: Wiley 1989. p.107–141.
- HUETE, A.R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.
- HUETE, A.R.; JACKSON, R.D.; POST, D.F. Spectral response of a plant canopy with different soil background. **Remote Sensing of Environment**, v. 17, n. 1, p. 37-53, 1985.
- HUETE, A.R.; LIU, H.Q. An error and sensitivity analysis of the atmospheric- and soil-correcting variants of the NDVI for the MODIS-EOS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 32, pp. 897–905, 1994.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual Técnico de Pedologia**. 2.ed. Rio de Janeiro, (Manuais Técnicos em Geociências, 4), 2007.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Introdução ao processamento digital de imagens**. Manuais técnicos em geociências-número 9. Rio de Janeiro, 2001, 91 p.
- JACKSON, R.D.; HUETE, A.R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, v. 11, n. 2, p. 185-200, 1991.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.
- JORDAN, C. F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, v.50, p.663-666, 406, 1969.
- KAMEI, A.; NAKAMURA, K.; YAMAMOTO, H.; NAKAMURA, R.; TSUCHIDA, S.; YAMAMOTO, N.; SEKIGUCHI, S.; KATO, S.; LIU, C. C.; HSU, K. H.; WU, A. M. Cross Calibration of Formosat-2 Remote Sensing Instrument (RSI) using Terra Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 50, 11, p. 4821 – 4831, 2012.
- KAUFMAN, Y. J. The atmospheric effect on remote sensing and its correction. In: **Theory and Application of Optical Remote Sensing**. New York: Ghassem Asrar, 1989. 341 p.
- KILKKI, P., PÄIVINEN, R. Reference sample plots to combine field measurements and satellite data in forest inventory. In: REMOTE SENSING—AIDED FOREST INVENTORY, 1986, Finland. **Proceedings...**University of Helsinki, Department of Forest Mensuration and Management, Research Notes, vol. 19, Hyytiälä, Finland, 1987. p. 209–215.
- KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance visible and near infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.1, n.3. p. 155-159, 1970.
- KREBS, F. **Relatório de estágio supervisionado**. Relatório apresentado ao curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

- LE MAIRE, G.; MARSDEN, C.; VERHOEF, W.; PONZONI, F.J.; LO SEEN, D.; BÉGUÉ, A.; STAPE, J.-L.; NOUVELLON, Y. Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of Eucalyptus plantations. **Remote Sensing of Environment**, 115, 586–599, 2011.
- LILLESAND, T., M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 6th ed. John Wiley e Sons Press, 2008.
- LINHARES, C. A.; PONZONI, F. J. Análise multivariada de dados dendrométricos e radiométricos referentes à uma plantação de Pinus. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10. (SBSR), 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. p. 1641-1647.
- LIRA, S. A. **Análise de correlação: Abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Setores de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004. 209 p.
- LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDIZIO, E.; MORAN, E. Relationship between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 198, n.1-3, p. 149-167, 2004.
- LUIZ, A. J. B.; GÜRTLER, S.; GLERIANI, J. M.; EPIPHANIO, J. C. N.; CAMPOS, R. C. Reflectância a partir do número digital de imagens ETM+. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11. (SBSR), 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2071 - 2078.
- MACHADO, S. A.; AGUIAR, L. P.; FIGUEIREDO FILHO, A.; KOEHLER, H. S. Modelagem do Volume do Povoamento para Mimosa scabrela Benth, na região Metropolitana de Curitiba. **Revista Árvore**, v. 32 n.3, p. 465-478, 2008.
- MACIEL, M.N.M. **Estimativa de parâmetros estruturais de uma floresta primária na Amazônia Oriental através de dados orbitais**. 2002. 144f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- MADUGUNDU, R.; VYJAYANTHI, N.; JHA, C. S. Estimation of LAI and above-ground biomass in deciduous forests: Western Ghats of Karnataka, India. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 10, p. 211-219, 2008.
- MÄKELÄ, E., PEKKARINEN, A. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. **Forest Ecology and Management**, v.196, p. 245–255, 2004.
- MANJUNATH, A. S.; MURALIKRISHNAN, S. Geometric and radiometric evaluation of Resourcesat-1 sensors. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 10, 159-164, 2008.
- MANJUNATH, A. S.; MURALIKRISHNAN, S. Geometric and radiometric evaluation of Resourcesat-1 sensors. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 10, 159-164, 2008.
- MARKHAM, B. L., BARKER, J. L. Landsat MSS and TM Post-Calibration Dynamic Ranges, Exoatmospheric Reflectances and At-Satellite Temperatures. EOSAT Landsat Technical Notes, n. 1, Agosto, 1986.
- MARTINS, F. S. R. V. ; SANTOS, J. R. ; XAUD, R. X. ; XAUD, H. A. M. Análise de ferramentas de SIG para estimativa de biomassa potencial: um estudo de caso em região de

contato floresta/savana, Roraima. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2011, Curitiba. **Anais... XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, 2011. p. 4126-4133.

MATHER, P. M. *Computer Processing of Remotely Sensed Images: An introduction*. New York: John Wiley & Sons, 1999. 352 p.

MATLOOBI, M. Light harvesting and photosynthesis by the canopy. In: **Advances in Photosynthesis - Fundamental Aspects**. InTech, 2012.

MCDONALD, A J.; GEMMELL, F.M.; LEWIS, P. E. Investigation of the utility of spectral vegetation indices for determining information on coniferous forests. **Remote Sensing of Environment**, 66, p.250-272, 1998.

MENG, Q.; CIESZEWSKI, C. J.; MADDEN, M.; BORDERS, B. A linear mixed-effects model of biomass and volume of trees using Landsat ETM+ images. **Forest Ecology and Management**, v. 244, p. 93–101, 2007.

MOHAMEDAIN, M. S.; CSAPLOVICS, E.; MOHAMED, A. A.; MOHAMED, A. D. Estimation of Forest Variables using Remote Sensing and GIS: Case Study of Nabag Forest-South Kordofan, Sudan. **Journal of Agriculture e Social Sciences**, v. 8. P. 62-64, 2012.

MONTGOMERY, D. C.; ELIZABETH, A. P.; VINING, G. G. **Introduction to linear regression analysis**. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 4 ed., 2006.

MYERS, V.I. Soil, water and plant relations. In: **Remote Sensing with Special Reference to Agriculture and Forestry**. Washington: National Academy of Sciences, 1970.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Landsat 5 (L5) Thematic Mapper (TM) Calibration Parameters Files (CPFs)**. Disponível em: <[ftp://edclpdsftp.cr.usgs.gov/pub/data/CPF/TM/TM\\_CPF/L5CPF20100701\\_20100930.11](ftp://edclpdsftp.cr.usgs.gov/pub/data/CPF/TM/TM_CPF/L5CPF20100701_20100930.11)>. Acesso em: 08 mar. 2012. 2012 c.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Landsat 5 (L5) Thematic Mapper (TM) calibration parameter files (CPFs)**. Disponível em: <[http://landsat.usgs.gov/science\\_L5\\_cpf.php](http://landsat.usgs.gov/science_L5_cpf.php)>. Acesso em: 27 abril 2011. 2010 a.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Landsat 5**. Disponível em: <<http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/landsat5.html>>. Acesso em: 17 out. 2012. 2012 a.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **LDCM**. Disponível em: <<http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/ldcm.html>>. Acesso em: 17 out. 2012. 2012 b.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). NASA Goddard Space Flight Center. **Landsat-7 Science Data User's Handbook**, 2006. Disponível em: <[http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7\\_Handbook.pdf](http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 2013. Referência técnica.

NATIONAL REMOTE SENSING AGENCY (NRSA). **IRS-P6 data user's handbook**. Hyderabad, India. 2003. Disponível em: <[http://www.nass.usda.gov/research/Cropland/docs/P6\\_data\\_user\\_handbook.pdf](http://www.nass.usda.gov/research/Cropland/docs/P6_data_user_handbook.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 2013. 142 p. Referência técnica.

NILSON, T.; PETERSON, U. Age dependence of forest reflectance: analysis of main driving factors. **Remote Sensing of Environment**, 48, 319–331, 1994.

NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY (NCNU). **Australes, The Southern Pines**. 2012. Disponível em: <<http://repository.lib.ncsu.edu/ir/bitstream/1840.16/2882/8/australes.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2012.

ORUE, N. E. **Estimativa de volume de povoamentos de Pinus spp. utilizando dados do satélite Landsat 7**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

PANDYA, M. R.; DADHWAL, V.K.; NAVALGUND, R. R. Effect of WiFS viewing geometry on crop reflectance' a simulation study using SAIL model Internatzonal **Journal of Remote Sensing**, 21, 1931 – 1938, 2000.

PANDYA, M.R.; SINGH, R.P.; CHAUDHARI, K.N.; MURALI, K.R.; KIRANKUMAR, A.S.; DADHWAL, V.K.; PARIHAR, J.S. Spectral characteristics of sensors onboard IRS 1D and P6 satellites: estimation and their influence on surface reflectance and NDVI. **J. Indian Soc. Remote Sens.**, 35, 4, p. 341–358, 2007.

PANDYA, M.R.; SINGH, R.P.; MURALI, K.R.; BABU, P.N.; KIRANKUMAR, A.S.; DADHWAL V.K. Bandpass solar exoatmospheric irradiance and Rayleigh optical thickness of sensors on board Indian Remote Sensing Satellites-1B,-1C,-1D, and P4. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 40, 3, p. 714–718, 2002.

PETERSON, D. L.; SPANNER, M. A.; RUNNING, S. W.; TEUBER, K. B. Relationship of Thematic Mapper simulator data to leaf area index of temperate coniferous forests. **Remote Sensing of Environment**, 22, 323-341, 1987.

PETERSON, D.L.; WESTMAN, W.E.; STEPHENSON, N.J.; AMBROSIA, V.G.; BRASS, J.A.; SPANNER, M.A. Analysis of forest structure using Thematic Mapper Simulator data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-24(1), 113-121, 1986.

PINHEIRO, E. S.; DURIGAN, G.; ADAMI, M. Imagens Landsat e QuickBird são capazes de gerar estimativas precisas de biomassa aérea de Cerrado?. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 2913-2920.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: A. Silva Vieira, 2009.

PRICE, J. C. Calibration of satellite radiometers and the comparison of vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 21, p. 15–27, 1987.

PUHR, G.B.; DONOGHUE, D.N.M. Remote sensing of upland conifer plantations using Landsat TM data: a case study from Galloway, south-west Scotland. **International Journal of Remote Sensing**, 21, 633–46, 2000.

PULLIZA, D. T.; RODRIGUES, R. E.; SOUZA, A. L. M.; NARDOTO, J. P.; SANTOS, W. M. D. P.; PORTALETTE, L. C.; GALVAN, L. Utilização de técnicas de sensoriamento remoto para o mapeamento de área plantada com as principais culturas na safra 2009/2010 no estado de Mato Grosso do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 124-131.

RADAMBRASIL. **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim**: Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: DNPM, 1986. 790p. (Levantamento de Recursos Naturais, volume 33).

- RICHARDS, J.A.; JIA, X. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 4. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 454 p.
- RIPPLE, W. J.; WANG, S.; ISAACSON, D. L.; PAIRRE, D. P. A preliminary comparison of Landsat Thematic Mapper and SPOT-1 HRV multispectral data for estimating coniferous forest volume. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 12, n. 9, p. 1971-1977, 1991.
- ROBINOVE, C. J. Computation with physical values from Landsat digital data. **Photogramm. Eng. Remote Sens.**, vol. 48, p. 781-784, 1982.
- ROBINOVE, C.J.; CHAVEZ JR., P.S.; GEHRING, D.; HOLMGREN, R. Arid land monitoring using Landsat Albedo Difference Images. **Remote Sensing of Environment**, 11, p. 133-56, 1981.
- RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, n. 2, p. 95-107, 1996.
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: ERTS Symposium, 3., 1973. **Proceedings...** NASA SP-351, NASA, Washington, DC, v. 1, 1973. p. 309-317.
- RUIZ, L. F. C.; DALMOLIN, R. S. D.; TEN CATEN, A.; MIOLA, A.; ROLIM, S. B. A. Comparação entre classificadores de imagem orbital aplicado no mapeamento da bacia Vacacaí Mirim, RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, III, 2012, Presidente Prudente. **Anais...**, 2012.
- SALVADOR, R.; PONS, X. On the applicability of Landsat TM images to Mediterranean forest inventories. **Forest Ecology and Management**, 104, 193-208, 1998.
- SCHNEIDER, R. P. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal**. Santa Maria: UFSM, CEPEF, 1997. 217 p.
- SCHOTT, J. R. **Remote sensing: the image chain approach**. New York: Oxford University, 2 ed., 2007.
- SCHOWENGERDT, R.A. **Remote sensing models and methods for image processing**. 3 ed., California: Elsevier, 2007. 515 p.
- SESHADRI, K.S.V. **Imaging Sensors of Resourcesat-1**. ISRO Release. NNRMS Bulletin, 2004.
- SHIMABUKURO, Y. E.; MAEDA, E. E.; FORMAGGIO, A. R. Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas aplicados ao estudo dos recursos agrônômicos e florestais. **Revista Ceres**, v. 56, n. 4, p. 399-409, 2009.
- SONG, C.; WOODCOCK, C. E.; SETO, K. C.; LENNEY, M. P. ; MACOMBER, S. A. Classification and change detection using landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? **Remote Sensing of Environment**, v. 75, n. 2, p. 230-244, 2001.
- SOUSA, C. L. Uso de imagens-índice e imagens-proporção para avaliar a quantidade de madeira em povoamentos de Pinus spp. Dissertação (Mestrado em sensoriamento Remoto) – INPE, São José dos Campos, 1997. 137 p.
- SOUSA, C. L.; PONZONI, F. J. Avaliação de índices de vegetação e de bandas TM/Landsat para estimativa de volume de madeira em floresta implantada de Pinus spp. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9. (SBSR), 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. p. 1537-1547.

- SPANNER, M. A. PIERCE, L. L.; PETERSON, D. L.; RUNNING, S. W. Remote Sensing temperate coniferous forest leaf area index. The influence of canopy closure, understory and background reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, n. 1, p. 95-111, 1990.
- SRIVASTAVA, V. K.; RAI, A. M.; DIXI, R. K.; OZA M.P.; NARAYANA A. Preparation of volume table of SAL (Shorea robusta) - an approach using satellite data. **International Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 1, p. 214-221, 1999.
- STERNBERG, H.; KERSTEN, T.; JAHN, I.; KINZEL, R. Terrestrial 3D laser scanning - data acquisition and object modelling for industrial Aas-built documentation and architectural applications. In: THE INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, 35, 7, 2004. p. 942-947.
- TEILLET, P.M.; BARKER, J.L; MARKHAM, B.L.; IRISH, R R; FEDOSEJEVS, G.; STOREY, J.C. Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets. **Remote Sensing of Environment**, 78: 39-54, 2001.
- TEIXEIRA, M.B.; COURA NETO, A.B.; PASTORE, U.; RANGEL FILHO, A.L.R. Vegetação: as regiões fitoecológicas, sua natureza e seus recursos econômicos – estudo fitogeográfico. In: RADAMBRASIL. **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim**: Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: DNPM, 1986. P. 541-620. (Levantamento de Recursos Naturais, volume 33).
- TOKOLA, T., PITKÄNEN, J., PARTINEN, S., MUINONEN, E. Point accuracy of a non-parametric method in estimation of forest characteristics with different satellite materials. **International Journal of Remote Sensing**, 17, p. 2333-2351, 1996.
- TOKOLA, T.; HEIKKILÄ, J. Improving satellite image based forest inventory by using a priori site quality information. **Silva Fennica**, 31, 1, p. 67-78, 1997.
- TOMPPO, E. Satellite image based national forest inventory of Finland. **The Photogrammetric Journal of Finland**, vol. 12, n.1, 115–120, 1990.
- TOMPPO, E.; GAGLIANO, C., DE NATALE, F.; KATILA, M.; MCROBERTS, R.E. Predicting categorical forest variables using an improved k-Nearest Neighbour estimator and Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 500-517, 2009.
- TROTTER, C.; DYMOND, J.; GOULDING, C. Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM. **International Journal of Remote Sensing**, 18, 10, 2209– 2223, 1997.
- TUCKER, C. J. Red and Photographic Infrared linear Combinations for Monitoring Vegetation. **Remote Sensing of Environment**, 8, p. 127-150, 1979.
- TURNER, D. P.; MICHAEL, G.; LEFSKY, M. A.; RITTS, W. D.; TUYL, S. V.; LAW, B. E. Monitoring forest carbon sequestration with remote sensing and carbon cycle modeling. **Environmental Management**, v. 33, p. 457–466, 2004.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Plants database**. 2012. Distribution: Pinus elliottii Engelm. Disponível em: <[http://plants.usda.gov/java/profile?symbol=PIEL&mapType=large&photoID=piel\\_001\\_avp](http://plants.usda.gov/java/profile?symbol=PIEL&mapType=large&photoID=piel_001_avp)>. Acesso em: 26 jan. 2012.

- WAECHTER, J.L. Aspectos ecológicos da vegetação da restinga do Rio Grande do Sul, Brasil. **Comunicações do Museu de Ciências e Tecnologias PUCRS – Série Botânica**, v. 33, p. 49-68, 1985.
- WATZLAWICK, L.F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucaria utilizando imagens do satélite IKONOS II. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, p.169-181, 2009.
- WEBER, E. J.; HASENACK, H.; FERREIRA, C.J.S. **Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação**. Porto Alegre: UFRGS – IB - Centro de Ecologia, 2004.
- WILLIAMS, D. L.; NELSON, R. F. Use of remotely sensed data for assessing forest stand conditions in the eastern United States. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 24, 130–138, 1986.
- WILLIAMS, D.L.; GOWARD, S.; ARVIDSON, T. Landsat: Yesterday, today, and tomorrow. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 72 (10), pp. 1171–1178, 2006.
- WOOLLEY, J.T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Plant Physiology**, v.47, n.3, p.656-662, 1971.
- XAVIER, A. C.; SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C.; FREITAS, C. C. Estimativa de IAF de plantações de eucaliptos a partir de dados TM/Landsat. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9. (SBSR), 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. p. 1585-1596.
- XU, B.; GONG, P.; PU, R. Crown Closure Estimation of Oak Savanah in a Dry Seavon with Landsat TM Imagery: Comparison of Various Indices through Correlation Analysis. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 24, n. 9, p. 1811-1822, 2003.
- ZAKARIA, H. E. A. Integration of Remote Sensing and GIS in Studying Vegetation Trends and Conditions in the Gum Arabic Belt in North Kordofan, Sudan. Thesys (Doctor of Natural Science) - Technical University of Dresden, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Dresden, 2010.