

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**TESE DE DOUTORADO**

**MODELOS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA EM ÁREA DE EUCALIPTO NO  
SUDESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

**ALINE BIASOLI TRENTIN**

**ORIENTADORA: PROFA. DRA. DEJANIRA LUDERITZ SALDANHA**

**CO-ORIENTADORA: DRA. TATIANA MORA KUPLICH**

**PORTO ALEGRE, JULHO DE 2014**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**MODELOS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA EM ÁREA DE EUCALIPTO NO  
SUDESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

**ALINE BIASOLI TRENTIN**

**Orientadora: Profa. Dra. Dejanira Luderitz Saldanha  
Co-orientadora: Dra. Tatiana Mora Kuplich**

**Banca Examinadora:**

**Prof. Dr. Elódio Sebem (PPG Agricultura de Precisão/UFSM)  
Prof. Dr. Igor Poletto (Engenharia Florestal/UNIPAMPA)  
Prof. Dr. Laurindo Antonio Guasselli (PPG Geografia/UFRGS)  
Prof. Dr. Roberto Verdum (PPG Geografia/UFRGS)**

**Tese apresentada ao Programa de Pós-  
graduação em Geografia como requisito  
para obtenção do título de Doutora em  
Geografia.**

**PORTO ALEGRE, JULHO DE 2014**

CIP - Catalogação na Publicação

Trentin, Aline Bissoli

Modelos para estimativa de biomassa em área de eucalipto no Sudeste do Estado do Rio Grande do Sul / Aline Bissoli Trentin. -- 2014.

93 f.

Orientadora: Dejanira Luderitz Saldanha.  
Coorientadora: Tatiana Mora Kuplich.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, BR-RS, 2014.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Biomassa. 3. Eucalipto. I. Saldanha, Dejanira Luderitz, orient. II. Kuplich, Tatiana Mora, coorient. III. Título.

*Dedico este trabalho aos meus pais, Dimas e Neiva. Tenho enorme orgulho da educação e de todo amor que me deram.*

## AGRADECIMENTOS

Neste período de doutorado muitas surpresas agradáveis e desagradáveis aconteceram, contribuindo de alguma forma para meu crescimento pessoal e profissional. Por este motivo, devo agradecer:

- ✓ Primeiramente e com muito orgulho, a minha orientadora Dejanira, pelos momentos de apoio, amizade e confiança. E principalmente, por todo o aprendizado que tive neste período de doutorado;
- ✓ A minha co-orientadora, Tatiana, pela amizade e confiança antes e durante o doutorado, que mesmo distante sempre estava disposta a ajudar;
- ✓ Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela possibilidade de cursar esta pós-graduação;
- ✓ À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de estudo;
- ✓ À Celulose Riograndense - representada pelo Elias Araújo, e a SERTEF - pelo Renato, Reginaldo e seus auxiliares, pelo auxílio nos trabalhos de campo, desde financeiro, pessoal responsável e equipamentos;
- ✓ Especialmente e com amor, ao meu esposo (Adriano), que foi muito importante principalmente na etapa final desta tese, pelo auxílio nos trabalhos de campo, pela compreensão e paciência.
- ✓ A minha família, por todo amor, e em especial a minha irmã Carline, com muito carinho, pela amizade e pela enorme ajuda na etapa final desta tese.
- ✓ Aos amigos (especialmente Eléia - pelos pensamentos positivos e amizade) e demais pessoas que acompanharam ou estiveram envolvidas em meu período de doutorado.
- ✓ E a Deus, pela força e determinação que me auxiliam em mais uma etapa da minha vida.

## RESUMO

O tema desta tese envolve a avaliação de dados de sensoriamento remoto e de campo como preditores de estimativa de biomassa em áreas de silvicultura, no sudeste do Estado do Rio Grande do Sul. Tem como objetivo geral avaliar modelos de variação temporal de biomassa vegetal acima do solo para povoamentos de eucalipto, utilizando variáveis dendrométricas e índices espectrais. A metodologia consistiu inicialmente, na organização de um banco de dados no aplicativo Spring. Foram elaborados mapas temáticos da evolução da silvicultura a partir da interpretação visual das imagens Landsat 5 TM e em seguida, extraídas as médias dos índices espectrais (NDVI, EVI e GPP) das imagens MODIS, a partir das quais se elaborou os perfis temporais da vegetação em hortos de eucalipto, oriundos de mudas de semente e mudas clonais, em diferentes idades (3, 5 e 7 anos). Estes perfis foram correlacionados com dados de precipitação do TRMM. Em uma terceira etapa foram associados os dados adquiridos em campo (IAF, DAP e H) quando se estimou a biomassa do eucalipto por meio de equações alométricas. Por último foram correlacionados os dados MODIS, IAF e a biomassa estimada, avaliando os modelos de predição de biomassa para o eucalipto. Os resultados observados nos mapas de evolução da silvicultura demonstraram que a região apresenta um crescente desenvolvimento neste setor. Os perfis temporais dos índices espectrais comprovaram a capacidade dos produtos MODIS para a avaliação dos ciclos fenológicos e da produtividade em diferentes plantios de eucalipto, no entanto, a correlação com os dados de precipitação (TRMM) não apresentou resultados satisfatórios. Os dados de IAF permitiram diferenciar os plantios clonais e por semente, além da idade do eucalipto. Os dados de inventário (DAP e H) proporcionaram bons resultados da estimativa de biomassa acima do solo para os plantios de eucalipto estudados. A correlação dos dados (de campo e espectrais) demonstrou pequena possibilidade na estimativa de biomassa em áreas de plantios arbóreos, com destaque para os dados de IAF e GPP. Conclui-se que a utilização conjunta de dados de campo e orbital, possibilita análises confiáveis para povoamentos de eucalipto. Assim, este trabalho demonstra a relação entre dados de satélite e de campo, e contribui com novas informações, alternativas e sugestões para o estudo de povoamentos arbóreos na região estudada.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, biomassa, eucalipto.

## ABSTRACT

This thesis involves the evaluation of remote sensing data and field as predictors of estimated biomass in forestry areas in the southeastern state of Rio Grande do Sul. We evaluate models of temporal variation of above ground biomass for eucalyptus stands, using dendrometric variables and spectral indices. The methodology consisted of organization of a database application Spring. Thematic maps with the evolution of forestry were developed from visual interpretation of Landsat 5 Thematic Mapper images and then extracted averages of spectral indexes (NDVI, EVI and GPP) derived from MODIS images from which elaborated the temporal profiles of vegetation in eucalyptus plantations, from seedlings of seed and clonal considered at different ages (3, 5 and 7 years old). These profiles were correlated with precipitation data from TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). Following that, these profiles were associated with field data (IAF, DAP and H) and biomass of eucalyptus estimated through allometric equations. Finally, data were correlated with the MODIS data, IAF and the estimated biomass, evaluating prediction models of biomass for eucalyptus. The results observed for the evolution of forestry, showed that the region presents a growing development in forestry sector. The temporal profiles of spectral indices proved the ability of MODIS products for evaluation of phenological cycles and productivity in different eucalyptus plantations. However, the correlation with precipitation data (TRMM) did not provide satisfactory results. The IAF data allowed to differentiate between clonal and seed stands, and also the age of eucalyptus stands. The inventory data (DAP and H) have provided good results for eucalyptus plantations above-ground biomass estimation. The correlation of the data (spectral and field) demonstrated small possibility for estimating biomass in eucalyptus plantations, with emphasis on the data of IAF and GPP. It is concluded that the joint use of data from field and orbital, enables reliable analyses for stands of eucalyptus. This work demonstrates the relationship between satellite and field data, and contributes with new information, alternatives and suggestions for studying arboreal settlements in the region studied.

Keywords: Remote Sensing, biomass, eucalyptus.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da área de estudo (A), uso da terra (B), altitude (C) e declividade (D). .....	16
Figura 2 - Áreas de silvicultura no Estado do Rio Grande do Sul. ....	20
Figura 3 - Unidades de Paisagem Natural encontradas na área de estudo. ....	24
Figura 4 - Área (mil ha) ocupada por plantios arbóreos no RS. ....	25
Figura 5 - Expressões fenotípicas da forma de propagação das plantas: sexuada (sementes) e assexuada (propágulos vegetativos). ....	27
Figura 6 - Ciclos vegetativo-reprodutivos da vegetação. ....	27
Figura 7 - Resposta espectral da vegetação. ....	29
Figura 8 - Distribuição dos pixels no espaço espectral Vermelho x Infravermelho Próximo. ....	30
Figura 9 - Densidade da cobertura florestal. ....	38
Figura 10 - Simplificação das etapas do desenvolvimento do trabalho. ....	44
Figura 11 - Localização dos talhões/polígonos clonais e de semente; Imagem EVI, cena 257/2007. ....	47
Figura 12 - Localização dos hortos florestais escolhidos para amostragem em campo. ....	48
Figura 13 - Método de utilização do IAF em campo. ....	49
Figura 14 - Método de amostragem em campo para uma parcela. ....	50
Figura 15 - Espacialização temporal das áreas de silvicultura (eucalipto, pinus e acácia-negra) na área de estudo referente aos anos de 1986 (A), 1998 (B), 2006 (C) e 2011 (D). ....	54
Figura 16 - Área (mil ha) destinada para atividade de silvicultura na área de estudo no período de 1986-2011. ....	55
Figura 17 - Série temporal (2003-2012) de EVI em talhões clonais de eucalipto. ....	57
Figura 18 - Série temporal (2003-2012) de EVI em talhões de semente de eucalipto. ....	57
Figura 19 - Série temporal (2003-2012) de NDVI em talhões clonais de eucalipto. ....	58
Figura 20 - Série temporal (2003-2012) de NDVI em talhões de semente de eucalipto. ....	58
Figura 21 - Imagem EVI e NDVI (cena 257 - ano 2007), destacando os talhões de semente 026 e 077. ....	59
Figura 22 - Série temporal (2003-2012) de GPP em talhões clonais de eucalipto. ....	60
Figura 23 - Série temporal (2003-2012) de GPP em talhões de semente de eucalipto. ....	60

Figura 24 - Média do EVI nos talhões clonais e de semente e sua relação com a precipitação mensal acumulada entre 2003-2012. ....	61
Figura 25 - Média do NDVI nos talhões clonais e de semente e sua relação com a precipitação mensal acumulada entre 2003-2012. ....	61
Figura 26 - Diferença entre as folhas do Eucalipto <i>Saligna</i> e <i>Dunnii</i> . ....	62
Figura 27 - Média de GPP nos talhões clonais e de semente e sua relação com a precipitação mensal acumulada entre 2003-2012. ....	63
Figura 28 - Dados de IAF correspondentes aos períodos de verão, outono e inverno, para os plantios de eucalipto clonais e de semente em diferentes idades. ....	65
Figura 29 - Coeficiente de variação (%) correspondente aos períodos de verão, outono e inverno, para os plantios de eucalipto clonais e de semente. ....	66
Figura 30 - Dados de IAF correspondentes aos períodos de verão, outono, inverno e o respectivo desvio padrão, para os plantios de eucalipto clonais e de semente em diferentes idades. ....	67
Figura 31 - Dispersão dos dados de DAP (cm) e Altura (m) de acordo com o número de amostras nos talhões de eucalipto (clonais e por semente) com 3, 5 e 7 anos de idade. ....	68
Figura 32 - Relação entre DAP (cm) e Altura (m) correspondente aos plantios de eucalipto (clone e semente) nos três anos estudados. ....	71
Figura 33 - Povoamentos de eucalipto com diferentes tipos de propagação (clonal e semente) e idade (3, 5 e 7 anos). ....	72
Figura 34 - Correlação entre DAP (cm) e IAF Janeiro, com nível de significância $\alpha = 0,05$ . .	75
Figura 35 - Correlações entre os dados MODIS e de campo, com nível de significância $\alpha = 0,20$ . ....	77

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Características das bandas espectrais do sensor TM - Satélite Landsat 5.....	32
Quadro 2 - Descrição dos dados inseridos no aplicativo Spring. ....	43
Quadro 3 - Características dos dados Landsat.....	45
Quadro 4 - Data das imagens Landsat 5, sensor TM, escolhidas para a análise temporal da silvicultura. ....	45
Quadro 5 - Especificações dos produtos MODIS utilizados no estudo.....	46
Quadro 6 - Equações alométricas utilizadas no estudo. ....	51
Quadro 7 - Data das imagens referente à data de trabalho de campo.....	52
Quadro 8 - Relação entre UPN e área de silvicultura (2011) presentes no recorte espacial estudado.....	56
Quadro 9 - Correlações lineares anuais no período 2003-2012 entre as médias anuais dos índices espectrais MODIS e da precipitação TRMM.....	63
Quadro 10 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação em plantios de eucalipto clonais e por semente para os dados de DAP. ....	69
Quadro 11 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação em plantios de eucalipto clonais e por semente para os dados de H. ....	70
Quadro 12 - Biomassa estimada através de equações alométricas em plantios clonais e por semente, em diferentes idades. ....	72

**LISTA DE EQUAÇÕES**

Equação 1 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.....	34
Equação 2 - Índice de Vegetação Realçado.....	35
Equação 3 - Produção Primária Bruta .....	36
Equação 4 - Produção Primária Líquida.....	37
Equação 5 - Índice de Área Foliar .....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas  
 BRDE - Banco Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul  
 CAP - Circunferência à Altura do Peito  
 CMPC - *Compania Manufacturera de Papeles y Cartones*  
 CO<sub>2</sub> - Gás Carbônico  
 CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos  
 DAP - Diâmetro à Altura do Peito  
 EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
 ENVI - *Environment for Visualizing Images*  
 EOS - *Earth Observing System*  
 ETM+ - *Enhanced Thematic Mapper Plus*  
 EVI - *Enhanced Vegetation Index*  
 FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental  
 GPP - *Gross Primary Production*  
 H - Altura  
 HF - Hortos Florestais  
 IAF - Índice de Área Foliar  
 IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
 INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
 IV - Índice de Vegetação  
 LAI - *Leaf Area Index*  
 LDCM - *Landsat Data Continuity Mission*  
 LP DAAC - *Land Processes Distributed Active Archive Center*  
 MODIS - *MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer*  
 MSS - *Multispectral Scanner Subsystem*  
 NASA - *National Aeronautics and Space Administration*  
 NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*  
 NPP - *Net Primary Production*  
 OLI - *Operational Land Imager*  
 RBV - *Retum Bean Vidicon*  
 SEMA - Secretaria do Meio Ambiente  
 SIG - Sistema de Informação Geográfica  
 SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas  
 TIRS - *Thermal InfraRed Sensor*  
 TM - *Thematic Mapper*  
 TOPODATA - Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil  
 TRMM - *Tropical Rainfall Measuring Mission*  
 UFSM - Universidade Federal de Santa Maria  
 USGS - *United States Geological Survey*

## SUMÁRIO

### Capa

Folha de rosto.....	i
Dedicatória.....	ii
Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	iv
Abstract.....	v
Lista de Ilustrações .....	vi
Lista de Quadros .....	viii
Lista de Equações .....	ix
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	x
Sumário.....	xi
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
Tema e justificativa .....	13
Objetivos.....	15
Área de estudo .....	15
Relevo.....	16
Solos .....	17
Clima .....	17
Organização do documento .....	18
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>1 SILVICULTURA E SENSORIAMENTO REMOTO: ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>19</b>
1.1 Silvicultura .....	19
1.2 O processo histórico da silvicultura.....	20
1.3 O Zoneamento Ambiental para a atividade da silvicultura .....	22
1.4 A vegetação natural e a silvicultura no RS.....	24
1.5 Técnicas de propagação em silvicultura.....	26
1.6 Sensoriamento Remoto da vegetação .....	28
1.6.1 Comportamento espectral .....	28
1.7 Fonte de dados .....	30
1.7.1 Satélite Landsat .....	31
1.7.2 Sensor MODIS .....	32
1.7.2.1 Índices de Vegetação .....	33

1.7.2.2 Produtividade Primária .....	36
1.8 Índice de Área Foliar .....	37
1.9 Biomassa vegetal .....	39
1.9.1 Métodos de quantificação de biomassa .....	40
<b>CAPÍTULO II</b>	
2 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS .....	43
2.1 Organização do banco de dados .....	43
2.2 Evolução da silvicultura .....	44
2.3 Séries temporais.....	46
2.4 Dados de campo .....	48
2.4.1 Índice de Área Foliar .....	49
2.4.2 Dados de inventário.....	50
2.5 Estimativa de biomassa .....	51
2.6 Modelos de predição de biomassa.....	51
<b>CAPÍTULO III</b>	
3 A EVOLUÇÃO DA SILVICULTURA EM UMA PORÇÃO DO SUDESTE DO RIO GRANDE DO SUL .....	53
3.1 Mapeamento das áreas de silvicultura.....	53
<b>CAPÍTULO IV</b>	
4 SÉRIES TEMPORAIS DE ÍNDICES ESPECTRAIS E PRECIPITAÇÃO .....	57
4.1 Índices espectrais.....	57
4.2 Índices espectrais e precipitação.....	61
<b>CAPÍTULO V</b>	
5 DADOS DE CAMPO E BIOMASSA.....	65
5.1 Índice de Área Foliar .....	65
5.2 Dados dendrométricos .....	68
5.3 Biomassa estimada .....	72
<b>CAPÍTULO VI</b>	
6 MODELOS DE PREDIÇÃO DE BIOMASSA .....	75
<b>CONCLUSÕES</b> .....	79
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	81
APÊNDICE A - Quadro de correlações .....	92

## INTRODUÇÃO

---

### **Tema e justificativa**

A tecnologia de geoprocessamento, incluindo o sensoriamento remoto, permite a determinação dos padrões espaciais e temporais dos diversos usos e cobertura da terra, constituindo uma ferramenta importante para o planejamento ambiental e o desenvolvimento socioeconômico. O sensoriamento remoto é uma técnica que fornece subsídios para o monitoramento constante da superfície terrestre, gerando dados contínuos no tempo e no espaço e permite a elaboração e tratamento de assinaturas temporais de índices de vegetação associados à produção de biomassa vegetal.

Os Índices de Vegetação (IV's) são medidas radiométricas adimensionais que indicam a abundância relativa e o vigor da vegetação em determinada área (JENSEN, 2009). São medidas relacionadas à densidade foliar verde e podem ser associadas aos dados de campo para calibração de modelos sobre os processos vegetais. Além disso, os próprios índices e suas derivações são úteis no monitoramento da fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação, incluindo o processo de fotossíntese em escala de dossel ou de ecossistema, auxiliando em estudos de fenologia, produtividade primária e fixação de carbono atmosférico (GLENN et al., 2008).

Os índices de vegetação têm sido utilizados para estudos da dinâmica da cobertura vegetal e na determinação de padrões espaciais e temporais (FERREIRA; HUETE, 2004) em função da alta periodicidade dos dados, como por exemplo, os produtos do sensor MODIS. No caso específico da silvicultura, os índices de vegetação podem ser úteis no desenvolvimento de modelos capazes de prever o potencial produtivo em diferentes regiões, possibilitando definir o grau de intervenção por meio de práticas de manejo e na otimização do uso de recursos visando melhorias na produção arbórea (SANTANA, 2008).

A análise da produção arbórea por meio do monitoramento da biomassa ao longo do tempo pode fornecer importantes informações sobre a estabilidade dos ecossistemas, uma vez que grande parte das espécies vegetais possui ciclos fenológicos específicos (JENSEN, 2009). A biomassa é um importante indicador do potencial florestal para estocar carbono e tem recebido muita atenção após a adoção do Protocolo de Quioto. Com o avanço dos satélites de observação da Terra, a biomassa pode ser estimada por observação de campo combinada com

dados de sensoriamento remoto, sendo as análises estatísticas essenciais para entender essas associações (BAJRACHARYA, 2008).

A amostragem em campo para estimativa da biomassa pode ser realizada por métodos destrutivos - com corte da vegetação, e por métodos não destrutivos - considerando variáveis biofísicas da vegetação aplicadas em modelos alométricos (KUNTSCHIK, 2004; BAJRACHARYA, 2008). Ainda, os dados de sensoriamento remoto são considerados por muitos autores, como uma alternativa para estimativa não-destrutiva de biomassa (BOX et al., 1989; SIMS et al., 2006; MAIRE et al., 2011a).

Muitos trabalhos têm utilizado amostragens destrutivas para a estimativa de biomassa em plantios arbóreos (CALDEIRA et al., 2001; SILVA et al., 2004), relacionando com variações climáticas (SANTANA et al., 2008) e solos (MELLO; GONÇALVES, 2008). Na região sudeste do estado do Rio Grande do Sul, algumas pesquisas destacam o monitoramento e quantificação da biomassa em plantios de acácia-negra (CALDEIRA et al., 2001) e eucalipto utilizando métodos destrutivos (SAUSEN, 2011), com determinação ou utilização de equações de regressão para estimativa de biomassa (SCHUMACHER; CALDEIRA, 2001; BARICHELLO et al., 2005; LONDERO, 2011).

No entanto, amostragens destrutivas demandam grande logística de campo e o trabalho é dispendioso, por isso, muitos estudos optam pela utilização de modelos alométricos para quantificar a biomassa acima do solo (VIEIRA et al., 2008). Assim, as variáveis biofísicas da vegetação e os dados de sensoriamento remoto, surgem como alternativas práticas e eficientes para estimativas não-destrutivas (WATZLAWICK et al., 2006; VIANA et al., 2012).

De acordo com Lu (2006), a biomassa inclui a massa viva acima e abaixo do solo, como as árvores, arbustos, raízes e massa morta da serapilheira fina e grosseira associada ao solo. Pela dificuldade em coletar os dados em campo da biomassa abaixo do solo, muitas pesquisas são direcionadas para estimativas de biomassa acima do solo. Nesse sentido, Xavier et al. (2002) comentam que para áreas florestais, as variáveis biofísicas como a altura (H) e o diâmetro à altura do peito (DAP) das árvores são importantes, principalmente devido a sua utilização em equações alométricas objetivando cálculos de volume ou produção.

Nesse sentido, esta pesquisa se destaca pela possibilidade de avaliar modelos de estimativa de biomassa, a partir de dados de sensoriamento remoto e medidos em campo por método não-destrutivo, em povoamentos de eucalipto localizados em uma porção da região sudeste do estado do Rio Grande do Sul. Este tema mostra-se como importante contribuição na área do conhecimento, a partir da relação entre dados de satélite e de campo,

proporcionando novas informações e alternativas para o estudo de povoamentos arbóreos na região estudada.

A observação da resposta fenológica e da biomassa nos povoamentos de eucalipto, considerando parâmetros ambientais, pode revelar os condicionantes que refletem na vegetação. Com isso, esta tese apresenta uma etapa no desenvolvimento de modelos para estimativa de biomassa em eucalipto, bem como contribuições na busca por dados com finalidade de validar estes modelos. Além disso, a elaboração de hipóteses e as sugestões apresentadas condicionam este trabalho como uma referência para avaliação de estimativas de biomassa, com a utilização de dados de sensores remotos e dados oriundos de campo, para a região estudada.

## **Objetivos**

O **objetivo geral** desta tese é avaliar modelos de variação temporal de biomassa vegetal acima do solo para povoamentos de eucalipto, estimada através de dados de campo e de sensoriamento remoto, utilizando variáveis dendrométricas e índices espectrais, no sudeste do Estado do Rio Grande do Sul.

Como **objetivos específicos** destacam-se:

- 1) Analisar a evolução da silvicultura na área de estudo a partir de imagens orbitais Landsat para entender a dinâmica do local;
- 2) Comparar espectros temporais de índices de vegetação (NDVI e EVI) e produtividade primária (GPP) a partir de séries temporais MODIS;
- 3) Estimar a biomassa vegetal aérea a partir de equações alométricas utilizando variáveis dendrométricas obtidas em campo;
- 4) Avaliar modelos para estimativa de biomassa a partir de análises de regressão que relacionem índices espectrais e biomassa estimada de eucalipto.

## **Área de estudo**

A área de estudo se localiza na região sudeste do Estado do Rio Grande do Sul entre as coordenadas: 52°40'O, 29°57'S e 51°45'O, 30°30'S (Figura 1). Estão inseridos neste recorte

espacial, os municípios de Arroio dos Ratos, Butiá, Minas do Leão, Rio Pardo, Pantano Grande, Encruzilhada do Sul, Dom Feliciano, São Jerônimo e Barão do Triunfo. Nesta região é crescente o investimento na atividade de silvicultura, principalmente com eucalipto e acácia-negra. Os povoamentos predominantes são de eucalipto, destinados à produção de madeira para a fabricação de papel e celulose. Este fato ocorre devido à proximidade geográfica da empresa CMPC - Celulose Riograndense, instalada no município de Guaíba e responsável por este setor da produção.

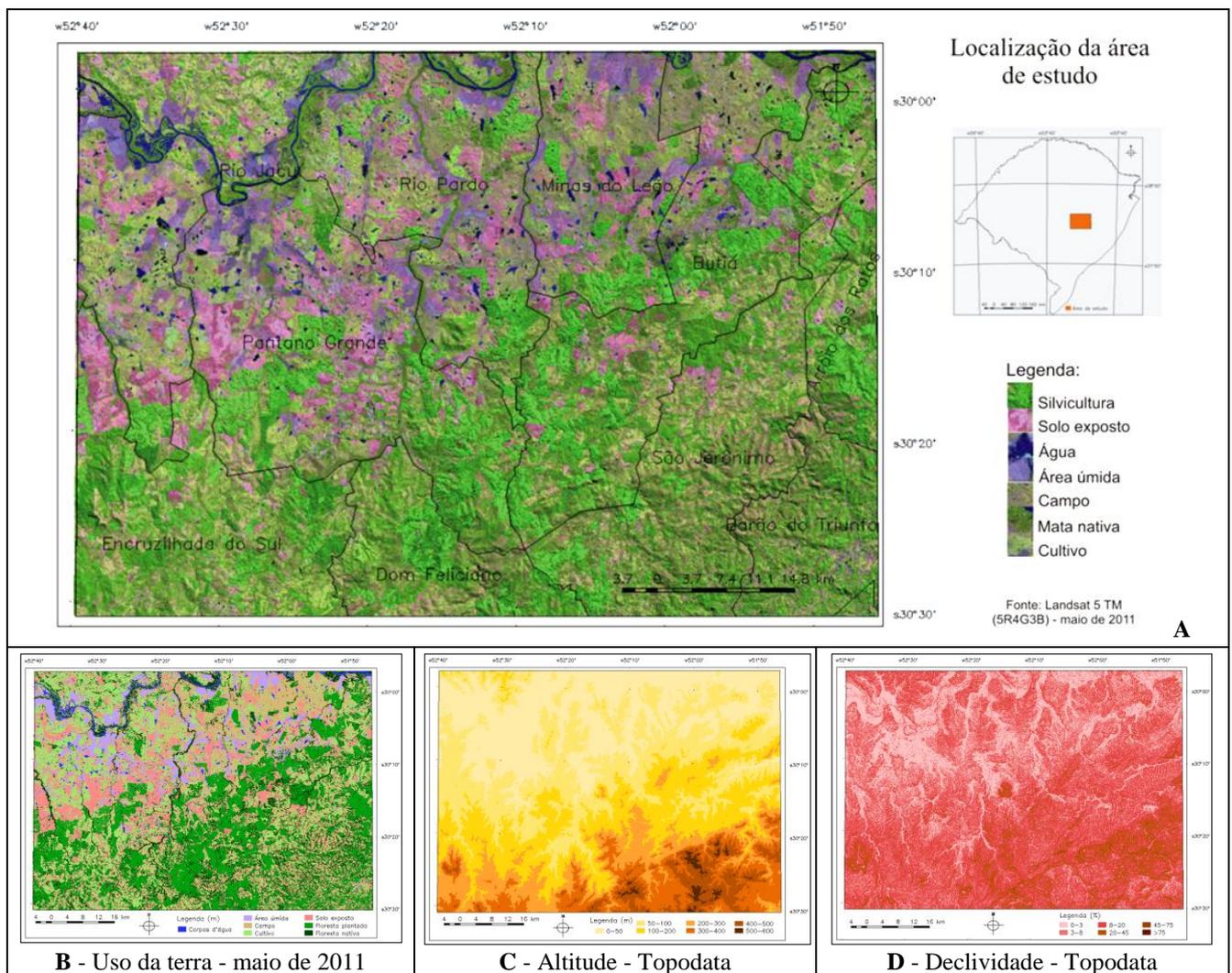


Figura 1 - Localização da área de estudo (A), uso da terra (B), altitude (C) e declividade (D).

## Relevo

O relevo, de acordo com o Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA), se destaca por apresentar duas características bem distintas na área de estudo.

Em relação à altitude, ocorrem áreas de baixa altitude (menores de 100 metros) na porção norte (na região geomorfológica da Depressão Central), enquanto na porção sul destaca-se os locais com altitude mais elevada, com até 600 metros (pertencente ao Planalto Sul-riograndense). Da mesma forma, a declividade apresenta locais mais planos (0-3%) na porção norte, sendo que no restante da área de estudo há predomínio de uma topografia ondulada com declives moderados (até 45%) (EMBRAPA, 2006).

## Solos

Conforme o Mapa Exploratório de Solos do Estado do Rio Grande do Sul disponibilizado pelo IBGE (2002) em escala 1:1.000.000, na área de estudo se encontram sete tipos: (a) Neossolo Litólico – constituídos por material mineral ou material orgânico pouco espesso, ocorrendo nos relevos mais escarpados; (b) Argissolo Bruno-Acinzentado - textura argilosa de coloração escura, com caráter alítico; (c) Argissolo Vermelho e (d) Vermelho-Amarelo - são constituídos por material mineral e horizonte B textural, com cores mais avermelhadas ou amareladas, respectivamente; (e) Luvisolo Crômico - de profundidade mediana e constituídos por material mineral, com horizonte B argiloso de atividade alta e saturação por bases; (f) Planossolo Háptico e Hidromórfico - solos minerais mal drenados com horizonte superficial ou subsuperficial eluvial (IBGE, 2007; EMBRAPA, 2006).

## Clima

De acordo com Rossato (2011), podem ser identificados quatro tipos climáticos no RS: Subtropical I - pouco úmido com inverno frio e verão fresco (a) e pouco úmido com inverno frio e verão quente (b); Subtropical II - medianamente úmido e variação longitudinal de temperaturas; Subtropical III - úmido com variação longitudinal de temperaturas; e Subtropical IV - muito úmido com inverno fresco e verão quente (a) e muito úmido com inverno frio e verão fresco.

Na área de estudo, predominam o clima Subtropical I (a) - com maior influência dos sistemas polares, responsável pela maior parte das precipitações (média de 1200-1500 mm anuais) e temperatura média anual entre 17-20°C (região do Escudo Sul-Riograndense), além do tipo climático Subtropical II - com maior influência dos sistemas polares e interferência

dos sistemas tropicais marítimos, sendo os sistemas frontais responsáveis pela maior parte da precipitação (média anual entre 1500-1700 mm), com temperatura média anual entre 17-20°C, porém, a característica do relevo amplifica as médias térmicas por aquecimento adiabático (área da Depressão Central) (ROSSATO, 2011).

### **Organização do documento**

A partir dos objetivos apresentados na introdução desta tese, no Capítulo I é apresentado o referencial teórico acerca do estado da arte em relação aos temas Silvicultura e Sensoriamento Remoto, destacando os principais assuntos que estão presentes neste trabalho. No Capítulo II é exposto o método de realização do trabalho, com ênfase nos procedimentos e técnicas utilizadas. A partir do terceiro capítulo são apresentados os resultados da tese: o Capítulo III destaca a evolução da silvicultura na área de estudo; o Capítulo IV aborda as séries temporais de NDVI, EVI e GPP, bem como sua correlação com dados de precipitação; no Capítulo V é realizada a análise dos dados coletados em campo e a estimativa da biomassa; e no Capítulo VI são avaliados os modelos de predição de biomassa encontrados para os povoamentos de eucalipto. Por fim, este documento apresenta as conclusões do trabalho.

## CAPÍTULO I

---

### 1 SILVICULTURA E SENSORIAMENTO REMOTO: ESTADO DA ARTE

#### 1.1 Silvicultura

As mudanças na cobertura da terra, principalmente o desmatamento de áreas florestadas, são as que acarretam maiores consequências para o meio, devido à contribuição das florestas para o sequestro de carbono na conversão em biomassa e pela proteção a espécies animais e vegetais. Além disso, outros fatores como a transpiração das árvores, criam condições favoráveis de umidade para a precipitação, e os dosséis interceptam a água da chuva facilitando a penetração no solo e evitando a erosão do solo pela diminuição do escoamento superficial (MORAN, 2009).

Nesse sentido se destacam os sistemas de monocultura arbórea, que contribuem para os processos naturais que ocorrem na superfície, como o ciclo do carbono (MUUKKONEN; HEISKANEN, 2007). Os plantios arbóreos, manejados e de crescimento rápido, estão sendo indicados como possíveis drenos ou sumidouros do carbono atmosférico. Essa situação ocorre devido a grande produção de biomassa e absorção do dióxido de carbono atmosférico, estocando-o na biomassa viva das plantas, na serapilheira e no solo, favorecendo o aporte de resíduos orgânicos e conseqüentemente menor revolvimento do solo durante o cultivo (KORN et al., 2007; SAUSEN, 2011; SCHUMACHER et al., 2011).

De acordo com a ABRAF (2012), em 2011 a área ocupada por povoamentos de Eucalipto (*Eucalyptus* spp.) e Pinus (*Pinus* spp.) no Brasil totalizou 6.515.844 ha, sendo que 74,8% correspondem à área de Eucalipto e 25,2% aos plantios de Pinus. No estado do Rio Grande do Sul, a área total de plantios arbóreos em 2011 foi de aproximadamente 162.300 ha (plantios próprios, não considerando áreas arrendadas) concentrados principalmente na região sudeste do estado, abrangendo as microrregiões Serras de Sudeste, São Jerônimo, Cachoeira do Sul e Camaquã (Figura 2). As espécies mais utilizadas são *Pinus elliottii*, *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Acacia mearnsi* (BRDE, 2003). Tanto em âmbito nacional quanto estadual, o eucalipto é a espécie que apresenta a maior área de cultivo devido à alta produtividade e rápido crescimento, com ciclo entre 6-7 anos (SAUSEN, 2011), sendo destinado principalmente para a indústria de celulose (ABRAF, 2012).

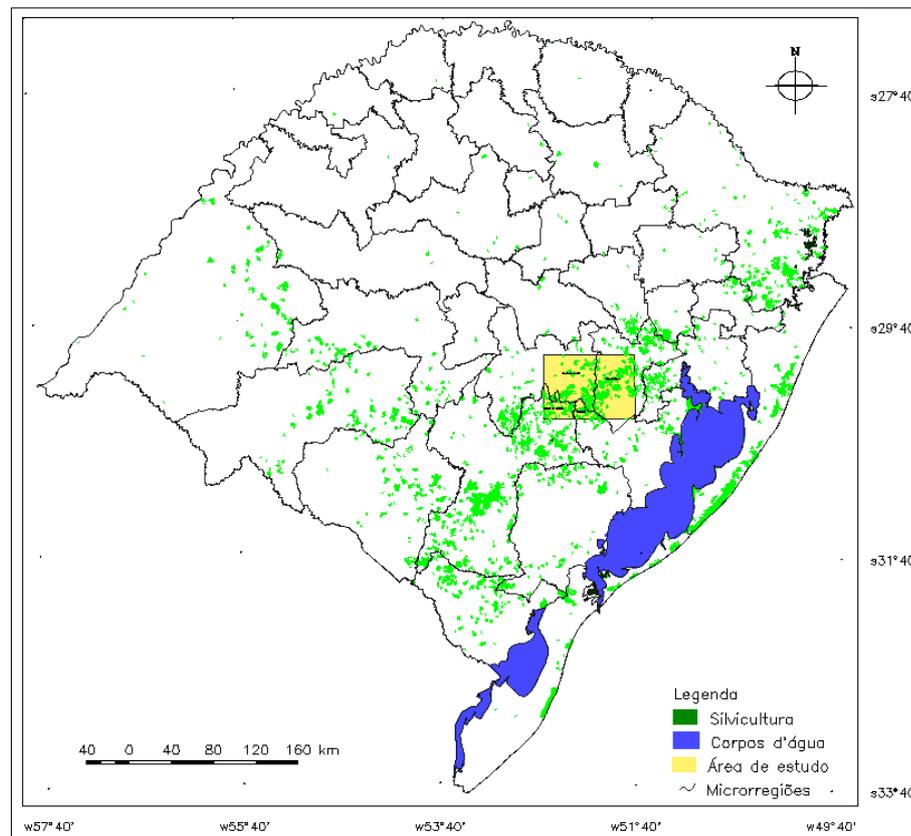


Figura 2 - Áreas de silvicultura no Estado do Rio Grande do Sul.  
Fonte: Modificado de FEPAM (2012).

De acordo com dados do IBGE (2011), a quantidade de madeira produzida para papel e celulose no Brasil no ano de 1990 foi de aproximadamente 33 milhões (mi) de metros cúbicos ( $m^3$ ), 46 mi  $m^3$  em 2000 e 76 mi  $m^3$  no ano de 2011. Dentro desses valores, o Rio Grande do Sul contribuiu com aproximadamente 1,2 mi em 1990, 2 mi em 2000 e 2,5 mi em 2011. Em 20 anos, os dados da produção nacional demonstram um crescimento exponencial, com um aumento de 42 mi  $m^3$ . No Rio Grande do Sul, ocorreu maior aumento entre os anos 1990-2000 (830.000  $m^3$ ), enquanto entre 2000-2011 a produção apresentou, aproximadamente, metade do crescimento da década anterior (400.000  $m^3$ ).

## 1.2 O processo histórico da silvicultura

Os plantios comerciais com espécies exóticas iniciaram no Brasil no início do século XX com o objetivo de substituir o uso de madeira nativa, conforme Mendonça (2009). Destacam assim, conforme Sampaio e Boeckel (2000), três fases da implantação da

silvicultura no Brasil: (1) introdução do eucalipto com o objetivo de resolver o problema do fornecimento de combustível para locomotivas, madeira para postes, dormentes e construções; (2) geração de incentivos fiscais visando à expansão da silvicultura com o reflorestamento/florestamento no período entre 1966 e 1988, com "grande expansão da área reflorestada no Brasil, crescimento das atividades empresariais na silvicultura, evolução da ciência florestal e o incremento do número de profissionais vinculados ao setor"; e (3) de 1989 até os dias atuais, quando as empresas reorganizam os plantios arbóreos reduzindo custos e incrementando programas de incentivo ao reflorestamento em pequenos e médios imóveis rurais (SAMPAIO; BOECKEL, 2000).

No Rio Grande do Sul (RS), o eucalipto foi introduzido no final do século XIX, plantado em uma fazenda na região sul do estado e adaptando-se muito bem ao clima. Historicamente, nas propriedades da região sul os cultivos de eucalipto exercem função de "capão" (pequeno bosque) servindo de sombreamento para o gado nas estâncias (BINKOWSKI, 2009).

A introdução do processo de silvicultura no RS relaciona-se com o início da política florestal brasileira a partir dos anos 1960-1970. Com a aprovação do Código Florestal de 1965 ocorreu a concessão de incentivos fiscais para o plantio arbóreo e a obrigatoriedade na reposição de áreas desmatadas. Em seguida, a Lei n. 5106 de 1966 ampliou os incentivos para reflorestamento e em 1967 foi criado o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF) para execução da política florestal brasileira (BARCELOS, 2010).

Nessa época, instalou-se intensa atividade de silvicultura, com a plantação de pinus na região nordeste do RS, criando grandes povoamentos e influenciando o êxodo rural ocorrido ao longo da década de 1970, além da alteração da paisagem local. Na região nordeste, a silvicultura se expandiu para a Serra Gaúcha que se tornou grande produtora de madeira para o complexo moveleiro. Também nesta época, plantios de acácia-negra para a extração de tanino tornaram-se importantes na região do Vale dos Sinos, que se firmou como pólo calçadista ao longo dos anos 1970-1980 (BARCELOS, 2010).

Na Metade Sul do RS a atividade econômica sempre esteve relacionada à pecuária e a diversificação das atividades inicia-se nesta região incluindo o plantio arbóreo, como promissor (GRACIOLI, 2010). Empresas de grande porte iniciam estudos na região sul e percebem que o crescimento de espécies, como o eucalipto, é três vezes mais rápido devido ao clima e a abundância de água. Outra vantagem dessa região se deve a uma rede fluvial que proporciona um transporte a custo mais baixo e à logística do Porto de Rio Grande que torna-se a passagem para exportação da celulose (ANESI, 2007).

A fim de propiciar desenvolvimento à Metade Sul do Rio Grande do Sul e expandir a produção florestal (plantios arbóreos), em 2004 o governo estadual lançou políticas públicas para atrair os investimentos das empresas do setor florestal (BINKOWSKI, 2009). O objetivo socioeconômico seria transformar a matriz econômica "conservadora e concentradora de renda", histórica e culturalmente pastoril, em região de produção de madeira e celulose. As bases do empreendimento, em parte com capital estrangeiro, concentrariam a construção de um pólo de produção com a implantação de fábricas de celulose, promovendo o escoamento dessa produção através de vias navegáveis, pelo Porto de Rio Grande, destinando ao mercado internacional (SUERTEGARAY; SILVA, 2009).

Dada a estagnação econômica do sul do estado, essas políticas transformaram-se em um modelo de crescimento regional, levando grupos empresariais, com o apoio do governo, a ampliar os projetos de silvicultura nesta região (ANESI, 2007), gerando por sua vez, uma nova matriz econômica concentradora de renda. As empresas foram atraídas pelos incentivos fiscais, com menor custo de produção e mão de obra, além de características climáticas adequadas. Em 2005 iniciaram-se os investimentos em aquisição de terras e plantio dessas monoculturas, prevendo também a instalação e crescimento das fábricas de celulose. Destacou-se neste período, as empresas Votorantin Celulose e Papel, Stora Enso e Aracruz Celulose S.A, que concentraram seus cultivos na região centro-oeste e centro-sul do estado (BINKOWSKI, 2009).

### **1.3 O Zoneamento Ambiental para a atividade da silvicultura**

A expansão significativa da silvicultura remete para a importância econômica que esta atividade desempenha na região, e faz lembrar que os impactos ambientais dependem de decisões sobre quais as espécies a serem plantadas, qual o local, quais proporções de espécies, com que finalidades e como são manejadas essas plantações (GUADAGNIN et al., 2009). Nesse sentido, em decorrência da grande expansão da silvicultura, em 2004 se iniciou o processo de planejamento para avaliar e definir as diretrizes de inserção dos empreendimentos florestais no contexto das diversas paisagens do Estado (SEMA, 2010).

Com a Resolução nº 084/2004, o Conselho Estadual do Meio Ambiente incluiu a silvicultura no sistema de licenciamento. Em consequência, a Secretaria Estadual do Meio Ambiente instituiu um grupo de trabalho para a realização do zoneamento da silvicultura, que em 2005, definiu os procedimentos para o licenciamento desta atividade, estabelecendo-se os

portes e o potencial poluidor em função da espécie a ser plantada. Em 2006, a FEPAM encaminhou a proposta de Zoneamento Ambiental para a definição da Atividade de Silvicultura no Rio Grande do Sul, que constitui em instrumento de orientação em escala macrorregional utilizando parâmetros de uma matriz de vulnerabilidade que serve como uma referência inicial (SEMA, 2010).

Após discussão do tema - uso e ocupação do solo pela silvicultura - na Câmara Técnica de Biodiversidade e Política Florestal, foi aprovado em 2009 o Zoneamento Ambiental para a Atividade de Silvicultura no Rio Grande do Sul. O objetivo do zoneamento foi a elaboração de um instrumento de gestão ambiental para a silvicultura, compreendendo um diagnóstico integrado dos aspectos ambientais, sociais e econômicos, definindo os objetivos de conservação relativos à atividade nas unidades de planejamento, avaliando os impactos envolvidos e fornecendo diretrizes de sustentabilidade ambiental para a atividade (SEMA, 2010).

As Unidades de Paisagem Natural (UPN) utilizadas no Zoneamento Ambiental para a Atividade de Silvicultura foram definidas a partir da integração de bases digitais de geomorfologia, vegetação potencial original, solo e altimetria, na escala 1:250.000, além do mosaico de imagens Landsat do Estado do Rio Grande do Sul. Essas unidades formam regiões naturais homogêneas que refletem as características fisionômicas e paisagísticas originais (CORRÊA, 2009).

Na área de estudo são encontradas três UPN's (DP5, PS3 e PS4) (Figura 3). Nessas áreas recomenda-se a conservação de banhados e matas paludosas ao longo dos cursos d'água e conservação dos campos nativos remanescentes (DP5); conservação da fitofisionomia de Estepe-Parque com floresta de galeria, manutenção da conectividade da vegetação natural e conservação das formações rochosas, recursos hídricos e solos (PS3); e conservação da Floresta Estacional Semidecidual, corredores ecológicos, recursos hídricos e solos, bem como, proteção de nascentes e áreas de potencial turístico. As restrições estão voltadas as áreas de campo nativo, os quais só poderão ser utilizados para silvicultura em locais altamente antropizados (agricultura mecanizada, sobrepastoreio), e às áreas florestais nativas, em estágios sucessionais médio e avançado de regeneração, que não poderão ser convertidas (SEMA, 2010).

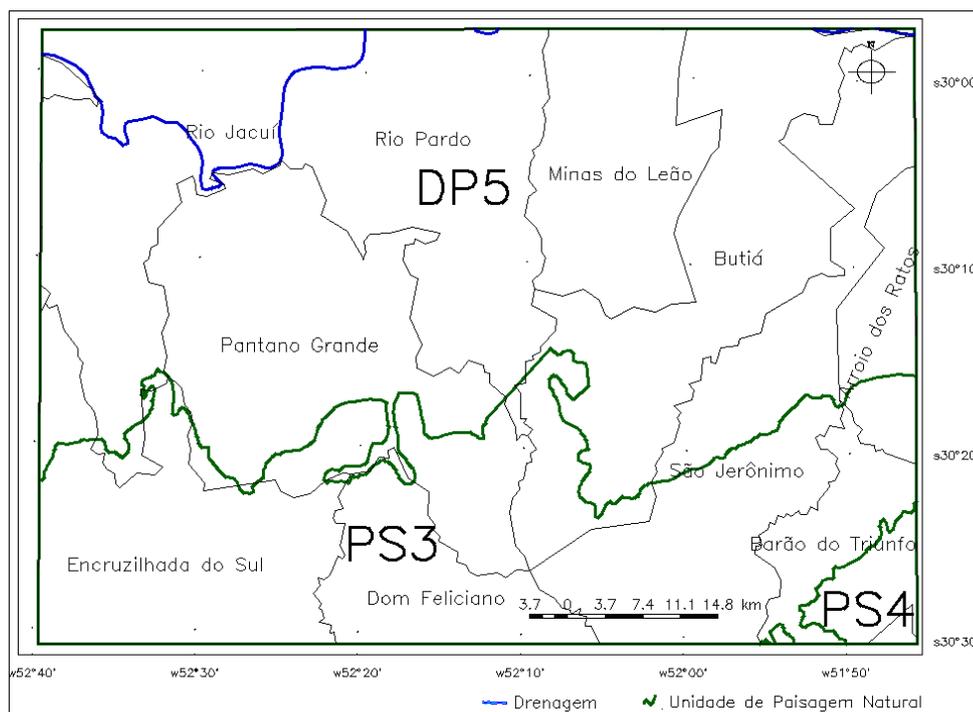


Figura 3 - Unidades de Paisagem Natural encontradas na área de estudo.

#### 1.4 A vegetação natural e a silvicultura no RS

No Estado do Rio Grande do Sul estão presentes dois biomas, a Mata Atlântica - posicionado na porção norte do estado e o Pampa - na porção centro-sul. A ocorrência desses dois biomas, com vegetação composta por campos e florestas, está relacionada a fatores ambientais. O fator climático se destaca devido à localização do estado na transição das zonas tropical e subtropical. Além do clima, variáveis como a biologia das plantas e o relevo podem explicar a coexistência desses dois tipos de vegetação (MARCHIORI, 2004).

O Bioma Mata Atlântica ocupa aproximadamente 13% do território nacional e se localiza onde se concentra grande parte da população. Na atualidade, está fragmentado com remanescentes florestais de aproximadamente 27% de sua cobertura florestal original. É composto principalmente por florestas ombrófila densa, aberta e mista e florestas estacionais semidecíduais e decíduais (IBGE, 2004).

O Bioma Pampa está presente em aproximadamente 2% do território brasileiro, ocorrendo apenas no Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2004), onde cobre grandes extensões caracterizadas por um relevo suave-ondulado na porção central do Estado, forte-ondulado na Serra do Sudeste e plano nas regiões litorâneas e na divisa com a Argentina. A vegetação é constituída por várias formações, onde o campo dominado por gramíneas é a mais

representativa e caracteriza a matriz geral, com inclusões de florestas nas margens de rios. Na Serra do Sudeste, a vegetação arbóreo-arbustiva, em solos rasos originados de rochas graníticas, está encaixada neste bioma ocupando aproximadamente 1/4 da sua área. A estrutura vegetativa é muito diversa, em resposta a vários fatores, como o clima, o solo e o manejo a que esta vegetação está submetida (BOLDRINI, 2009).

Os ecossistemas florestais e campestres são fortemente influenciados pelas atividades humanas. A alteração da paisagem por meio da agricultura, pastoreio e plantios arbóreos, têm mudado a vegetação original (BEHLING et al., 2009). Diversos fatores têm contribuído para a conversão de campos em lavouras e plantios arbóreos, principalmente os de ordem econômica vinculados ao retorno financeiro das atividades (VALLS et al., 2009).

De acordo com informações disponibilizadas pelo IBGE (2007), em relação à área ocupada por plantios arbóreos no RS, desde a década de 1970, houve um acréscimo linear constante de aproximadamente 100 mil ha a cada 5 anos até 1985, quando esse crescimento diminui para aproximadamente 50 mil ha a cada 5 anos até 2006 (Figura 4).

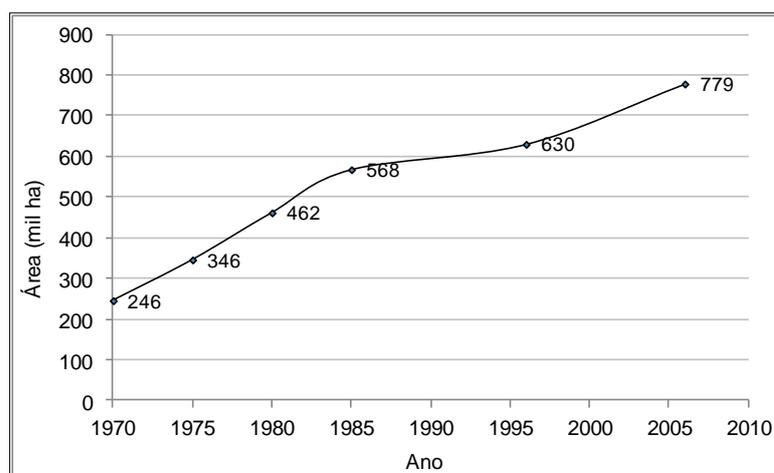


Figura 4 - Área (mil ha) ocupada por plantios arbóreos no RS.  
Fonte: IBGE, 2007.

De acordo com os resultados do Inventário Florestal do RS e utilizando as regiões fisiográficas, observa-se que a maior área de plantios arbóreos do Estado encontra-se na região da Depressão Central, com 55.140 ha (20,07%), seguida pela região do Litoral (19,98%), Serra do Sudeste (19,80%) e Campanha (11,33%). Especificamente aos povoamentos de eucalipto, três regiões concentram 74,9% dos plantios no Estado, sendo na Depressão Central 40,47%, na Campanha 24,20% e na Serra do Sudeste 10,23%. Em relação ao pinus, 34,71% estão concentrados na região do Litoral, 25,47% na Serra do Sudeste, 12,18% nos Campos de Cima da Serra e 11,25% no Planalto Médio. Relativo à distribuição

da acácia-negra, 40,23% estão situados na região da Encosta do Sudeste e 37,62% na Encosta Inferior do Nordeste (SEMA e UFSM, 2001).

### 1.5 Técnicas de propagação em silvicultura

A maior parte dos plantios arbóreos no RS é realizada com espécies do gênero *Eucalyptus* (*grandis*, *saligna* e *dunnii*). O *Eucalyptus globulus* tem sido alvo de interesse nos últimos anos, em função de suas características favoráveis à produção de papel. No entanto, o manejo para o aperfeiçoamento dos povoamentos e o aumento da produção resultou no desenvolvimento de processos como a clonagem, formados tanto por espécies puras como por híbridos entre espécies (HIGA et al., 2009).

A silvicultura clonal corresponde ao conjunto de técnicas silviculturais para implantação e manejo de um povoamento clonal. Por apresentar um antecessor comum, as plantas derivadas de um clone serão geneticamente idênticas. Este processo possibilita uniformidade dos plantios, maior controle da qualidade dos produtos, combinações genéticas raras, maximização do ganho em produtividade e qualidade da madeira, controle de doenças e rotações economicamente viáveis (XAVIER et al., 2009).

A silvicultura clonal com eucalipto é uma das mais desenvolvidas e se encontra bem estabelecida, com implementação de forma intensiva em diferentes regiões do mundo, principalmente devido às condições ambientais, ao domínio da tecnologia, a existência de variabilidade genética para propósitos comerciais e facilidade de propagação vegetativa (XAVIER et al., 2009).

A forma de propagação vegetal pode ser sexuada (semente) ou assexuada (propágulos vegetativos - dos quais se origina o clone). De acordo com Xavier et al. (2009), ao considerar que um organismo é descrito pelo seu fenótipo (F) e resultante de efeitos genotípicos (G), dos efeitos ambientais (E) e da interação genótipo x ambiente (GE), a propagação assexuada se mantém inalterada nas plantas resultantes, diferente da propagação por semente, que formam plantas com variações (Figura 5).

Xavier et al. (2009) ainda destaca que os períodos de crescimento vegetativo e desenvolvimento reprodutivo das plantas são determinados pela sazonalidade e pela resposta às mudanças durante o ciclo de vida. Plantas perenes apresentam repetidos ciclos vegetativo-reprodutivos e as mudanças que ocorrem nesses ciclos têm importância no processo de

propagação, constituído pelas fases: semente (ou propágulo), juvenil, de transição, adulta, senescência (Figura 6).



Figura 5 - Expressões fenotípicas da forma de propagação das plantas: sexuada (sementes) e assexuada (propágulos vegetativos).

Fonte: Modificado de Xavier et al. (2009).

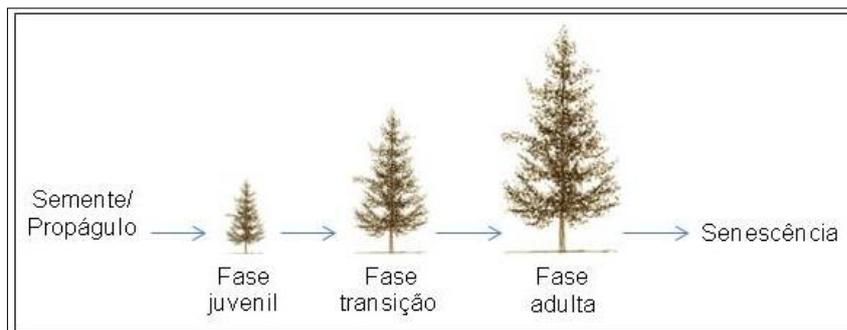


Figura 6 - Ciclos vegetativo-reprodutivos da vegetação.

Fonte: Modificado de Xavier et al. (2009).

Schumacher e Caldeira (2001) comentam que o padrão de crescimento de um plantio arbóreo na fase juvenil apresenta tendência a utilizar os nutrientes para a formação da copa (concentrando maior biomassa nesse compartimento), enquanto que à medida que se desenvolve ocorre o aumento da biomassa no tronco e a diminuição nas folhas.

Em trabalho desenvolvido por Silva et al. (2004), a biomassa foi variável de acordo com a idade da vegetação, sendo que com 01 ano o compartimento folhas apresentou maior percentual, enquanto que com 04 anos o maior percentual de biomassa foi representado pela madeira. Nesse sentido, Sausen (2011) destaca que a alocação da biomassa (principalmente a razão entre o caule e a parte aérea) a partir da metade do ciclo (3-4 anos), em povoamentos de eucalipto, pode representar a estimativa do acúmulo de carbono na biomassa das árvores.

## 1.6 Sensoriamento Remoto da vegetação

### 1.6.1 Comportamento espectral

O fluxo radiante ao incidir sobre uma planta pode apresentar três formas de interação: absorção, reflexão e transmissão (TUCKER; SELLERS, 1986; NOVO, 2008). A absorptância se refere a razão entre o fluxo de energia absorvido e a energia incidente no alvo. Na vegetação, a radiação absorvida pelos pigmentos contidos na folha corresponde a aproximadamente 50% do total que chega até a planta, auxiliando na síntese de compostos ricos em energia (fotossíntese), alterando estruturas moleculares e acelerando reações. A reflectância é dada pela quantidade de energia refletida em razão da energia que incide na superfície das folhas ou do dossel. E a transmitância é a razão entre o fluxo transmitido através do dossel e das camadas que constituem a folha pelo fluxo incidente (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009; JENSEN, 2009)

A porção da energia absorvida é a de maior interesse nas pesquisas relacionadas à produção vegetal. No entanto, em sensoriamento remoto orbital ou suborbital, a absorptância é geralmente estimada a partir da quantificação da porção refletida, devido às restrições tecnológicas dos equipamentos contidos nos satélites, os quais registram a radiação refletida ou emitida pelos alvos da superfície terrestre. Nesse sentido, para se inferir sobre o estado da vegetação considera-se o comportamento da energia refletida, permitindo uma medida indireta da radiação absorvida pela vegetação (MOREIRA, 2005).

As propriedades espectrais das folhas verdes permitem especificar produtos e limitações das aplicações do sensoriamento remoto na vegetação terrestre. O resultado da observação direta da região do vermelho e infravermelho-próximo pode ser indicativo da densidade de clorofila na superfície. Esta quantidade está relacionada com a capacidade que as plantas apresentam em fixar dióxido de carbono e água gerando carboidratos, e assim produzir informações sobre a capacidade fotossintética da vegetação (TUCKER; SELLERS, 1986).

A fotossíntese é o processo de armazenamento de energia pelas plantas que ocorre com a presença de luz (JENSEN, 2009). A integração entre a vegetação e a presença de luz, proveniente principalmente do sol, desencadeia a resposta espectral da vegetação (Figura 7). No espectro visível, a reflectância da vegetação fotossinteticamente ativa está associada à absorção da radiação pelos pigmentos da planta (principalmente pela clorofila) e não é superior a 0,2, sendo que o máximo nessa região corresponde a reflectância na porção do

verde. No infravermelho próximo, a vegetação apresenta alta reflectância em função do espalhamento interno entre as paredes celulares e o ar no mesófilo esponjoso das folhas. Na região do infravermelho médio, a reflectância da vegetação está condicionada pelo conteúdo de água presente nas folhas (GATES, 1965; MOREIRA, 2005; NOVO, 2008; PONZONI; SHIMABUKURO, 2009).

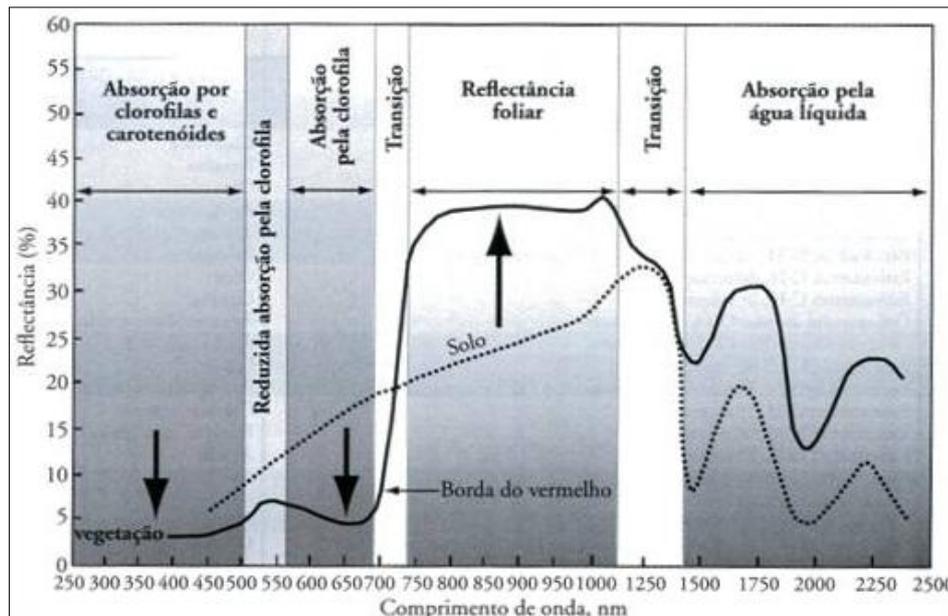


Figura 7 - Resposta espectral da vegetação.  
Fonte: Jensen (2009).

A capacidade das folhas em realizar fotossíntese aumenta em conjunto com o crescimento da planta até atingir a maturidade fisiológica, a partir da qual, a taxa fotossintética declina fortemente. A fotossíntese está intimamente relacionada à quantidade de radiação absorvida na região espectral do azul e do vermelho. Quando a vegetação atinge a fase senescente, ocorre menor absorção da energia pelos pigmentos fotossintéticos nessa região, caracterizando uma reflectância espectral maior na faixa visível do espectro (MOREIRA, 2005).

De acordo com Ponzoni e Shimabukuro (2009) a reflectância de um dossel vegetal em imagens de satélite apresenta pequenas diferenças em relação à reflectância medida em uma folha isolada. Na região do espectro visível a reflectância de uma folha apresenta valores mais altos do que os valores referentes ao dossel. Ao contrário, na região do infravermelho próximo, os valores de reflectância de um dossel são mais altos e ocorre devido ao espalhamento múltiplo da radiação eletromagnética entre as camadas de folhas.

As relações que ocorrem entre a biomassa e a resposta espectral da vegetação no infravermelho próximo (direta) e na região do vermelho (inversa) podem ser observadas na Figura 8. Relacionando as bandas do vermelho (eixo X) e infravermelho próximo (eixo Y) é possível verificar a distribuição dos pixels de acordo com o que representam na imagem. Um solo exposto úmido apresenta baixa reflectância nos dois comprimentos de onda, enquanto um solo seco tem reflectância alta tanto no vermelho quanto no infravermelho próximo. À medida que um dossel vegetal se desenvolve, ocorre o aumento da reflectância no infravermelho próximo e absorção na região do vermelho em função do processo de fotossíntese. Dessa forma, com o aumento da biomassa e da cobertura do dossel, a reflectância tende a apresentar direção perpendicular e mais distante da linha do solo (SILLEOS et al., 2006; JENSEN, 2009; PONZONI; SHIMABUKURO, 2009).

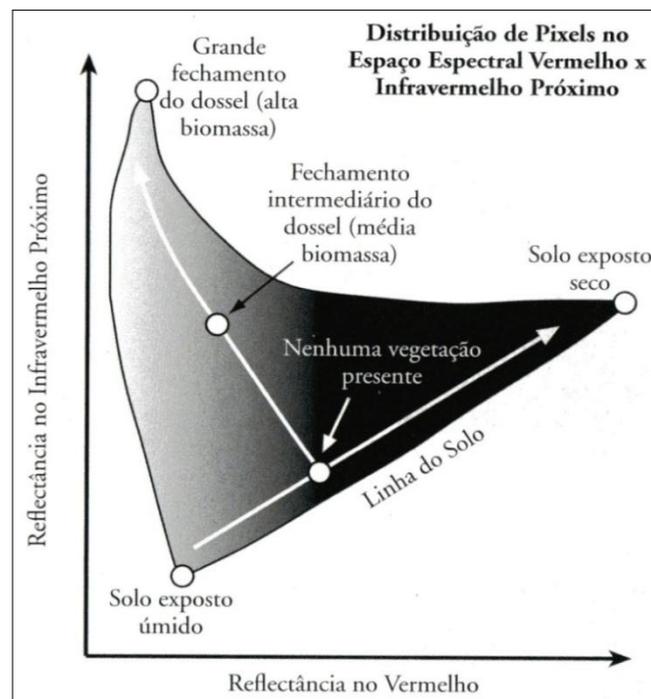


Figura 8 - Distribuição dos pixels no espaço espectral Vermelho x Infravermelho Próximo.  
Fonte: Jensen (2009).

### 1.7 Fonte de dados

A utilização de dados de sensoriamento remoto permite ao usuário eficiência na obtenção dos produtos e a precisão dos resultados quando os dados condizem com a escala de trabalho. De acordo com Paruelo et al. (2001) e Sun et al. (2008), o sensoriamento remoto fornece dados valiosos para a identificação e descrição de ecossistemas, em escalas regionais

e globais. Imagens coletadas remotamente e seus produtos derivados podem auxiliar na compreensão da dinâmica sazonal da vegetação (LIANG; SCHWARTZ, 2009), para a estimativa da cobertura da terra e as mudanças em diferentes escalas espaciais (IPCC, 2001).

Box et al. (1989) destaca que a habilidade em vincular dados de sensores a bordo de satélites e medidas tomadas em campo em diferentes biomas, é importante e proporciona condição de que podem ser desenvolvidos modelos sofisticados sobre fenômenos da biosfera, baseados em dados de sensoriamento remoto. Dessa forma, técnicas de sensoriamento remoto para estimar variáveis do ecossistema devem ser utilizadas para aproveitar dados confiáveis e minimizar erros (GLENN et al., 2008).

### 1.7.1 Satélite Landsat

O programa Landsat é o sistema de observação da Terra mais antigo idealizado pela NASA. Foram sete satélites lançados (Landsat 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7), sendo que o Landsat 6 falhou em atingir a órbita. Nos satélites 1, 2 e 3 faziam parte os sensores MSS (*Multispectral Scanner Subsystem*) e RBV (*Retum Bean Vidicon*), MSS e TM (*Thematic Mapper*) nos satélites 4 e 5 e ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) no Landsat 7 (JENSEN, 2009; MOREIRA, 2005).

Os sensores MSS e TM foram os mais importantes da série Landsat, sendo o TM mais utilizado a partir da sua disponibilidade por apresentar melhores resoluções que o MSS. A utilidade do MSS era restrita a estudos geológicos e inventários de vegetação, enquanto o TM apresenta bandas importantes para a penetração na água, discriminação de tipos e vigor de vegetação, medidas de umidade de plantas e solos, diferenciação de nuvens, neve e gelo, e identificação hidrotermal em alguns tipos de rochas (JENSEN, 2009). No Quadro 1 estão listadas algumas características ou aplicações correspondentes a cada banda espectral do Landsat 5, sensor TM (MOREIRA, 2005).

Com o encerramento das atividades do último satélite da série (Landsat 5), a NASA lançou o oitavo projeto - o Landsat 8 LDCM (*Landsat Data Continuity Mission*), mais avançado que seus antecessores. O Landsat 8 possui dois instrumentos imageadores: (a) sensor ótico (*OLI – Operational Land Imager*) com 9 bandas espectrais (resolução espacial de 30 metros) incluindo uma pancromática (15 metros), ampliando os estudos de atmosfera e qualidade da água; e (b) sensor infravermelho termal (*TIRS - Thermal InfraRed Sensor*) com

duas bandas (100 metros de resolução espacial) que favorecem o monitoramento do consumo de água especialmente em regiões áridas (NASA, 2013).

Quadro 1 - Características das bandas espectrais do sensor TM - Satélite Landsat 5.

<b>Banda</b>	<b>Características/Aplicações</b>
1	Estudos batimétricos em corpos d'água transparentes, absorção de clorofila e pigmentos fotossintetizantes, atenuação atmosférica.
2	Sensibilidade a sedimentos em suspensão.
3	Absorção da vegetação verde/densa - contraste com outras áreas, variação litológica, mapeamento da drenagem, delimitar mancha urbana.
4	Delineamentos de corpos d'água, reflexão da vegetação, sensibilidade a morfologia do terreno, feições geológicas, identificação de macrófitas, silvicultura e agrícolas.
5	Sensibilidade a umidade das plantas, ruídos na cena com excesso de chuva.
6	Propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7	Sensibilidade a morfologia do terreno, identificação de minerais e alteração hidrotermal.

### 1.7.2 Sensor MODIS

A preocupação em monitorar as mudanças globais incentivou o desenvolvimento do programa internacional EOS (*Earth Observing System*) liderado pela NASA, que tem como objetivo permitir a observação continuada das mudanças globais em nível de atmosfera e superfície (JUSTICE et al., 1998). O programa está dividido em três componentes: (1) Ciência de Observação da Terra; (2) Sistema de Observação (plataformas e sensores); e (3) Sistema de Controle de Dados e Informações (SOARES et al., 2007).

As duas plataformas mais importantes do EOS foram denominadas Terra (com cinco sensores) e Aqua (com seis sensores). Entre os temas contemplados estão o estudo de nuvens, aerossóis, balanço de radiação, ciclo do carbono, evaporação, fitoplâncton e matéria orgânica dos oceanos, vapor d'água na atmosfera, precipitação, umidade da superfície, gelo e neve, temperatura e cobertura vegetal (SOARES et al., 2007).

Um dos principais interesses está na área de observação da Terra, destacando-se a utilização dos produtos do sensor MODIS (*MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer*), o principal instrumento a bordo das plataformas Terra e Aqua. Os

produtos MODIS incluem reflectância espectral, cobertura da terra, índices espectrais de vegetação, cobertura de neve e gelo, temperatura de superfície e fogo, além de variáveis biofísicas que possibilitam estudos de ciclos biogeoquímicos (RUNNING et al., 1994; JUSTICE et al., 1998). O instrumento fornece observações globais da superfície terrestre com periodicidade de 2 dias, possui 36 bandas espectrais no intervalo de 0,4 a 14,4  $\mu\text{m}$  do espectro, e resolução espacial de 250 metros (2 bandas), 500 metros (5 bandas) e as demais de 1 km (SOARES et al., 2007).

Imagens de sensores de baixas e médias resoluções como o MODIS fornecem medidas consistentes, valiosas e aplicáveis em escalas espaciais adequadas para detectar os efeitos de muitos processos que causam a degradação da cobertura vegetal (JACQUIN et al., 2010). O estudo da vegetação terrestre em grande escala, requer a compreensão da distribuição global dos tipos de vegetação, bem como suas propriedades estruturais/biofísicas e variações espaciais/temporais (JUSTICE et al., 1998; HUETE et al., 2002). Em caso específico, a utilização dos produtos MODIS no monitoramento da vegetação em escalas regionais (ANDERSON; SHIMABUKURO, 2007) se deve ao registro de dados em bandas espectrais do visível e infravermelho, planejadas para o desenvolvimento de índices de vegetação.

Entre os produtos relacionados ao estudo dos ecossistemas terrestres com destaque para a vegetação estão: (i) o MOD13 - contém os índices de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*), disponibilizados a cada 16 dias com resolução espacial de 1 km, 500 m e 250 m (LATORRE et al., 2007; SOARES et al., 2007) e (ii) o produto MOD17 - que contém o dado de Produtividade Primária Bruta (*Gross Primary Production - GPP*), com resolução espacial de 1 km e periodicidade de 8 dias (LATORRE et al., 2007).

#### 1.7.2.1 Índices de Vegetação

O conceito de índice de vegetação (IV) se refere a uma transformação espectral de duas ou mais bandas, indicadas para ressaltar as propriedades da vegetação, permitindo comparações espaciais e temporais da atividade fotossintética e das variações estruturais do dossel (HUETE et al., 2002). Como as relações entre os dados de campo e os dados remotos muitas vezes não são diretas, dada a complexidade das interações da radiação eletromagnética (REM) com dosséis vegetais, os índices realçam o contraste entre a grande absorção da REM

na região visível do espectro e a reflectância na região do infravermelho (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009; SINGH, 1989; MYNENI et al., 1995).

Os IVs minimizam as interferências relativas às variações provenientes do ângulo solar e dos efeitos atmosféricos, observados em dados multitemporais (CARVALHO Jr. et al., 2008). Além disso, diminuem a variabilidade causada por fatores externos à vegetação e servem como indicadores do crescimento e vigor da vegetação verde (JENSEN, 2009). No caso do sensor MODIS, as bandas espectrais estreitas evitam as regiões de absorção da água no espectro eletromagnético, fazendo com que os índices não sejam afetados pelas variações sazonais do conteúdo de água na atmosfera (CARVALHO Jr. et al., 2008).

Os dados de IV do sensor MODIS possibilitam comparações temporais e espaciais das condições da vegetação, para monitorar a atividade fotossintética em suporte a detecção de mudança e interpretações biofísicas e da fenologia. Em sua concepção, os produtos contemplam o imageamento sem nuvens, uma cobertura global com boa resolução temporal e espacial, dados consistentes e precisão nas variações interanuais da vegetação (ANDERSON et al., 2003).

A resposta espectral da vegetação está relacionada com os pigmentos fotossintetizantes e espaços intercelulares das folhas, que interagem com a radiação eletromagnética, provocando alterações nas bandas do visível e infravermelho próximo (LATORRE et al., 2007). A associação entre estas bandas corresponde ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que constitui uma razão normalizada para o intervalo de -1 a +1 (ANDERSON et al., 2003), calculada através da Equação 1 (JUSTICE et al., 1998).

$$\text{NDVI} = (\rho_{ivp} - \rho_v) / (\rho_{ivp} + \rho_v) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\rho_{ivp}$  = reflectância no infravermelho próximo;

$\rho_v$  = reflectância no vermelho;

Para Huete (2004) o NDVI permite comparações significativas das condições da vegetação, sendo importante no monitoramento das mudanças sazonais e interanuais e na detecção de mudanças fenológicas (JENSEN, 2009; PONZONI; SHIMABUKURO, 2009). Por ser uma razão, reduz ruídos multiplicativos presentes nas diferentes bandas e datas, como: diferenças de iluminação, sombras de nuvens, determinadas atenuações atmosféricas e

algumas variações topográficas, bem como, eliminando diferenças sazonais do ângulo de elevação solar (JENSEN, 2009; LATORRE et al., 2007).

Estudos relacionados a cobertura da terra, fenologia e estoque de carbono pela vegetação demonstram a grande utilização do NDVI. Anderson e Shimabukuro (2007) empregaram o NDVI a fim de registrar a fenologia e a sazonalidade da vegetação para o Estado do Mato Grosso, utilizando correlações com amostras de diferentes formações vegetais e precipitação. Ratana et al. (2005) concluíram em pesquisa que o NDVI é suficientemente estável para comparar variações sazonais, interanuais e a longo prazo da estrutura da vegetação, fenologia e parâmetros biofísicos.

Avaliando espécies arbóreas na Califórnia a partir de índices de vegetação, Gamon et al. (1995) consideraram o NDVI como um vantajoso indicador da estrutura do dossel, conteúdo de clorofila e nitrogênio, da fração de energia interceptada pela vegetação e do potencial da atividade fotossintética sobre uma ampla variação de tipos vegetais. Além disso, concluíram que o NDVI é sensível as diferenças de cobertura em dosséis esparsos, diminuindo essa sensibilidade em dosséis moderados e densos em função de saturação (GAMON et al., 1995).

Contrastando com pesquisas que apontam a baixa eficiência do sensoriamento remoto na estimativa de biomassa, Maire et al. (2011a) mostraram que a utilização de séries temporais NDVI no acompanhamento de um povoamento de eucalipto retornou estimativas adequadas do volume e altura da vegetação. Concluíram que o modelo resultante pode ser um método econômico e preciso para o mapeamento e acompanhamento da biomassa de eucalipto em grandes escalas (MAIRE et al., 2011a).

Outro índice muito utilizado em trabalhos científicos e disponível entre os dados MODIS é o EVI (Índice de Vegetação Realçado), desenvolvido para aprimorar o sinal da vegetação, melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa. Neste índice foram adicionados parâmetros que remetem ao sinal de fundo do dossel e reduzem as influências atmosféricas (ANDERSON et al., 2003; PONZONI; SHIMABUKURO, 2009) e é calculado pela Equação 2 (JUSTICE et al., 1998):

$$\text{EVI} = \mathbf{G} * (\rho_{ivp} - \rho_v) / (\mathbf{L} + \rho_{ivp} + \mathbf{C1} * \rho_v - \mathbf{C2} * \rho_A) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$\rho_{ivp}$  = reflectância no infravermelho próximo;

$\rho_v$  = reflectância no vermelho;

$\rho_A$  = reflectância no azul;

*C1 = coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o vermelho (6);*  
*C2 = coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o azul (7,5);*  
*L = fator de ajuste para a interferência do solo (1);*  
*G = fator de ganho (2,5).*

Em trabalho desenvolvido por Huete et al. (2002), os autores demonstraram a capacidade dos índices de vegetação MODIS para avaliação de variações sazonais da vegetação, da cobertura da terra e dos parâmetros biofísicos. Ainda, o NDVI e o EVI evidenciaram uma faixa sensível para o monitoramento e avaliação das variações espaciais e temporais em condição e quantidade de vegetação.

Em síntese, os índices de vegetação são importantes ferramentas que auxiliam em registros precisos da distribuição dos tipos de vegetação, além de estimativas de suas variáveis biofísicas (IAF, biomassa) e das propriedades estruturais (porcentagem de fechamento do dossel) (JENSEN, 2009).

#### 1.7.2.2 Produtividade Primária

A produtividade primária é determinada pela quantidade de radiação solar interceptada pelo dossel e pela eficiência da conversão dessa radiação em biomassa (ANDERSON et al., 2003; SANTANA et al., 2008) por unidade de área e tempo (PARUELO et al., 2000). É um importante atributo do ecossistema e fornece uma medida precisa do crescimento da vegetação terrestre e sua produtividade (PARUELO et al., 2000; ANDERSON et al., 2003), influenciada principalmente, pela disponibilidade de água e de nutrientes (SANTANA et al., 2008).

A quantidade de carbono convertido em carboidratos durante a fotossíntese, ou seja, a fixação da energia fotossintética à vegetação é chamada de produção primária bruta (PPB ou *GPP - Gross Primary Production*). Esta produção é necessária para o crescimento das plantas, onde parte é incorporada aos tecidos vegetais, como folhas, raízes e madeira, e outra parte é convertida novamente em CO<sub>2</sub>. A diferença entre a fotossíntese e a respiração vegetal (R) refere-se à produção primária líquida (PPL ou *NPP - Net Primary Production*) (BOX et al., 1989; IPCC, 2001; RUNNING et al., 2004). Estas variáveis são calculadas a partir da Equação 3 (BOX et al., 1989; FIELD et al., 1995):

$$GPP - R = NPP$$

Equação 3

Para Field et al. (1995), a Equação 3 está relacionada ao cálculo da NPP em termos da troca de CO<sub>2</sub>. No entanto, destaca que em escala local a NPP pode ser definida e medida em termos de dados de biomassa (Equação 4), dada por:

$$NPP = b_{t+1} - b_t + L_{t+1} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$b_t$  e  $b_{t+1}$  - biomassa inicial e final da planta no intervalo de medida;

$L_{t+1}$  - camada de serapilheira produzida durante o intervalo.

Em geral, a produtividade primária informa sobre a produção/crescimento da vegetação e permite maior acurácia na relação com os fluxos de carbono se comparado ao NDVI, possibilitando o entendimento das variações sazonais (RUNNING et al., 2000). Além disso, pode ser utilizada para estimar rendimento de safra, disponibilidade de forragem e produção florestal (JUSTICE et al., 1998).

Confirmando a possibilidade da utilização de modelos baseados em dados de sensoriamento remoto, Sims et al. (2006) mostraram que a relação entre EVI e GPP (medida por torre de fluxo) apresentou melhor resultado do que a relação GPP (MOD17) e GPP medida por torre de fluxo. As correlações entre EVI/GPP foram maiores em locais com vegetação decídua e menores em locais com pouca variação sazonal do EVI, porém com resultados satisfatórios, demonstrando que o EVI pode fornecer estimativas de GPP para locais diferenciados (SIMS et al., 2006).

## 1.8 Índice de Área Foliar

O índice de área foliar (IAF ou *LAI - Leaf Area Index*) expressa a área foliar verde total, considerando apenas um lado da folha, por unidade de área do terreno ocupado pelas plantas (Equação 5) (JENSEN, 2009; PONZONI; SHIMABUKURO, 2009). É um parâmetro biológico importante que define a área que interage com a radiação solar e que fornece grande parte do sinal registrado pelo sensor (CHEN et al., 1997).

$$IAF = \text{área foliar} / \text{área do terreno} \quad \text{Equação 5}$$

Como uma das mais importantes variáveis biofísicas, o IAF é um indicador da densidade da vegetação e importante na descrição de muitos processos físicos e biológicos do dossel (CHEN; BLACK, 1991; PRICE; BAUSCH, 1995; CHEN et al., 1997), relacionado diretamente com a evapotranspiração, fotossíntese e produtividade (XAVIER et al., 2002). Além disso, é um atributo físico do dossel que pode contribuir na estimativa de variáveis radiométricas, uma vez que a maior parte da cobertura da vegetação é dominada pelas folhas, que contém clorofila, a qual é a entrada para a produção de energia das plantas (PRICE; BAUSCH, 1995).

As medidas de IAF podem ser realizadas por métodos diretos ou indiretos. Métodos diretos se referem à coleta da serapilheira, equações alométricas e amostragem destrutiva (MAIRE et al., 2011b). Através do método indireto, o IAF é estimado a partir do registro da radiação eletromagnética interceptada e não interceptada pela vegetação (SOUSA; PONZONI, 1998), sendo que em campo geralmente é utilizado um leitor óptico (MAIRE et al., 2011b).

Maire et al. (2011b) destaca que o IAF se altera em relação à idade da planta, atingindo um valor máximo entre o segundo ou terceiro ano (em povoamentos arbóreos implantados). Da mesma forma, Xavier et al. (2002) em estudo de clones de eucalipto, concluíram que o decréscimo do IAF com a idade reflete o fato de que o incremento anual atinge seu pico entre 3-4 anos e decresce conforme se aproxima o período de corte (sete anos). Bajracharya (2008) explica que conforme aumenta a densidade do dossel florestal, ocorre o aumento do índice de sombra, ocasionando a diminuição do grau de exposição do solo, além da redução da temperatura (Figura 9).

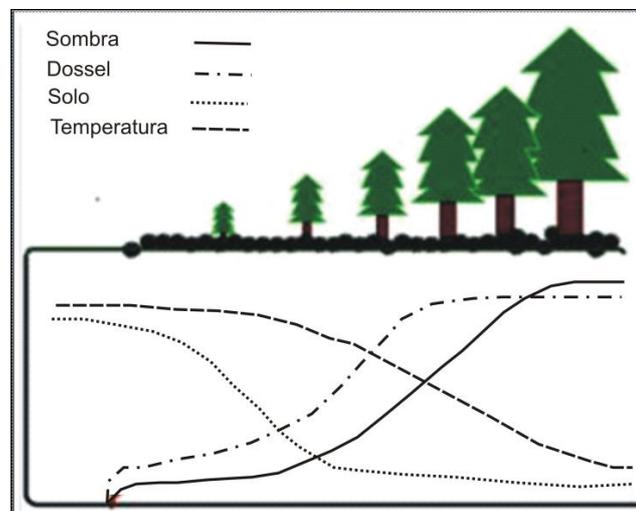


Figura 9 - Densidade da cobertura florestal.  
Fonte: Modificado de Bajracharya (2008).

Em plantações de eucalipto, que apresentam rápido crescimento, o IAF é sazonalmente dinâmico, variando espacialmente dependendo das condições pedoclimáticas (MAIRE et al., 2011b). Xavier et al. (2002) comentam que a quantificação e a variação do IAF ao longo do tempo são importantes, uma vez que este parâmetro pode ser utilizado em modelos de crescimento, permitindo simular efeitos de variações climáticas e da fertilidade do solo no seu potencial produtivo. No entanto, com a dificuldade para medições do IAF em uma rotação completa das plantas em grandes áreas, o sensoriamento remoto é uma das ferramentas disponíveis que contribui para a obtenção de séries temporais com dados precisos (MAIRE et al., 2011a).

## **1.9 Biomassa vegetal**

A capacidade que a vegetação tem de acumular carbono provém da atividade fotossintética. O processo de fotossíntese compreende uma fase de respiração, onde as plantas absorvem o gás carbônico e o convertem, utilizando água e luz solar, em biomassa, liberando oxigênio para a atmosfera. Como um processo físico-químico, a radiação eletromagnética incidente (luz solar), quando associada ao CO<sub>2</sub>, água e nutrientes (compostos inorgânicos) resultam na síntese de compostos orgânicos (carboidratos) (VEGA, 2003).

De acordo com Roy e Ravan (1996), a distribuição da biomassa em ecossistemas florestais deriva da condição da vegetação, do tipo, da sua estrutura e localização. Para Vieira et al. (2008), a biomassa vegetal é uma função da arquitetura da floresta, da densidade da madeira e do volume da madeira - obtido pelo diâmetro e altura. Mais detalhadamente, Silveira et al. (2008) destacam que a soma dos componentes - biomassa viva horizontal acima do solo (composta de árvores e arbustos), biomassa morta acima do solo (serapilheira e troncos caídos) e biomassa abaixo do solo (raízes) - resulta na biomassa total do material vegetal de uma floresta.

A biomassa é determinante para avaliar o potencial da emissão de carbono lançado na atmosfera, sendo que mudanças regionais relacionadas à quantidade de biomassa têm sido associadas às características funcionais dos ecossistemas e as mudanças climáticas (LU, 2006). Os ecossistemas florestais se destacam entre os ecossistemas terrestres como principal componente em relação à troca de carbono com a atmosfera, em função da biomassa florestal ser resultado do processo de acumulação de carbono. Dessa forma, a biomassa é um

parâmetro essencial na modelagem do balanço de carbono terrestre, devido a sua relação com o carbono estocado pela vegetação (aproximadamente metade da biomassa corresponde ao carbono) e na quantidade de carbono transferido para a serapilheira e o solo (ZHENG et al., 2007).

A biomassa florestal depende da cobertura da terra, conteúdo de clorofila do dossel e densidade florestal, sendo que todos esses parâmetros influenciam na reflectância espectral registrada pelo sensor (ZHENG et al., 2007). Além disso, parâmetros como idade e espécie da vegetação, tipo de solo e condições de cultivo podem influenciar a partição da biomassa (HOPPE et al., 2006).

O monitoramento da biomassa ao longo do tempo pode prover importantes informações sobre a estabilidade do ecossistema e se estão ocorrendo mudanças significativas (JENSEN, 2009). O conhecimento da alocação de biomassa é importante para o entendimento dos processos de ciclagem de nutrientes e é essencial para definições das estratégias de manejo, como a aplicação de fertilizantes e a intervenção por meio de desbaste em povoamentos implantados (SANTANA et al., 2008).

### 1.9.1 Métodos de quantificação de biomassa

A estimativa de biomassa vegetal pode ser realizada por métodos destrutivos e não-destrutivos. Os métodos destrutivos permitem a quantificação direta da biomassa, porém demanda muita logística. Além disso, em alguns casos não é possível recorrer a este método devido a impossibilidade legal do corte da vegetação em áreas de conservação ou preservação e quando se trata de propriedades particulares que não permitem a destruição da vegetação. Os métodos não-destrutivos estão baseados na utilização de equações alométricas e em produtos de sensoriamento remoto (KUNTSCHIK, 2004; BAJRACHARYA, 2008). A determinação de biomassa através das equações utiliza variáveis biofísicas, como altura e diâmetro, dados coletados em campo e que são inseridas em uma função representando esta relação (KUNTSCHIK, 2004; BAJRACHARYA, 2008).

Da mesma forma, Higuchi e Carvalho Júnior (1994) destacam a quantificação de biomassa florestal pelos mesmos métodos: diretos (determinação) ou indiretos (estimativas). Para os autores, os métodos diretos compreendem uma medição feita diretamente na biomassa, onde as árvores de uma determinada parcela são derrubadas e pesadas, e em seguida realizada a extrapolação da amostra para a área total. O método indireto refere-se à

correlação da biomassa com outra variável onde não há necessidade da destruição do material vegetal. As estimativas podem ser realizadas por meio de relações quantitativas, utilizando dados de inventários florestais e de sensoriamento remoto.

Os métodos destrutivos ou diretos apresentam maior acurácia para dados de biomassa, porém necessitam de uma boa amostragem para o desenvolvimento de modelos de estimativa de biomassa e para avaliar os resultados destas estimativas. Entretanto, este método requer muito tempo, trabalho intensivo, dificuldade de implementação em áreas de difícil acesso e não proporcionam a distribuição espacial em grandes áreas. Assim, dados de sensoriamento remoto apresentam vantagens como a repetitividade, a visão sinóptica, o formato digital - que possibilita o processamento de uma quantidade grande de dados, e a alta correlação entre as bandas espectrais e os parâmetros da vegetação, e se tornam fonte primária para estimativa de biomassa em grandes áreas, especialmente de difícil acesso (LU, 2006).

Considerando a dificuldade para a determinação de biomassa através do método destrutivo, muitas pesquisas têm demonstrado a eficácia na utilização de análises de regressão (equações alométricas) para desenvolver modelos estatísticos preditores de biomassa (HIGUCHI et al., 1998; SILVA, 2007). Em termos florestais, essas equações podem ser consideradas como a estimativa da biomassa (todo) em função das partes (DAP ou altura). Em muitos trabalhos, a variável DAP tem mostrado correlações significativas com o peso das árvores, enquanto a altura pode ser importante na caracterização do local, principalmente para diferir árvores com DAP semelhantes (SILVA, 2007).

Nesse sentido, dados de inventários florestais podem ser utilizados para a predição de biomassa acima do solo (CHAVE et al., 2005), em razão da quantidade de dados coletados, de grandes áreas amostradas e de um método de coleta planejado que representa a população de interesse (BROWN et al., 1989). Entre as variáveis coletadas, as mais importantes são o diâmetro do tronco, a altura total (CHAVE et al., 2005) e o cálculo do volume florestal (BROWN et al., 1989). Utilizando o diâmetro na altura do peito (DAP) e a altura total das árvores (H), Soares et al. (2005) apresentaram equações bastante precisas para estimativa de carbono em povoamento de eucalipto, com correlações maiores que 97,9%.

A utilização de equações alométricas, considerando variáveis resultantes de inventários florestais, é comum em áreas de plantios arbóreos (KUNTSCHIK, 2004). Clark et al. (2001) salientam que quando não existem equações alométricas disponíveis para predição de biomassa considerando determinada espécie e local é importante ajustar a equação que mais se aproxima das condições do local que está em estudo. Vieira et al. (2008), no entanto, observam que os modelos alométricos podem ser específicos para um determinado local e

destacam que podem ser utilizados modelos com apenas uma variável - como o DAP, quando o estudo se referir ao monitoramento da variação temporal.

Santana et al. (2008) obtiveram uma equação que gerou boas estimativas para a produção de eucalipto no Brasil, incluindo características climáticas no modelo. Esta variável destacou-se como fundamental para distinguir o acúmulo de biomassa entre regiões, sendo a produção de biomassa menor em áreas com menor disponibilidade de água. Em trabalho desenvolvido por Sausen (2011), o conteúdo de água no solo também influenciou no acúmulo de carbono na biomassa, principalmente na fração foliar.

Ao considerar avaliações temporais, o uso de satélites para estimativa de biomassa e carbono se torna uma solução viável em termos de: (1) custo e eficiência temporal comparado a inventários de campo, (2) integração da variabilidade espacial em ambiente regional e (3) comparações sucessivas para perturbações como desmatamento e reflorestamento (MAIRE, et al., 2011a). Bajracharya (2008) destaca que altas correlações entre bandas espectrais e os parâmetros de vegetação torna possível a utilização de imagens de satélite para estimativa de biomassa em áreas inacessíveis. Esta afirmação é confirmada pelos resultados encontrados por Tucker e Sellers (1986), que demonstraram que dados de reflectância produzem indicadores de índices biofísicos associados com dosséis vegetais, produtividade primária bruta e evapotranspiração, mais confiáveis do que estimativas associadas ao índice de área foliar.

## CAPÍTULO II

### 2 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

O estudo de modelos para estimativa de biomassa foi realizado em área de silvicultura, em hortos florestais (HF) de eucalipto da empresa CMPC - Celulose Riograndense. Os HF estão localizados na região sudeste do Rio Grande do Sul, sendo que os povoamentos de eucalipto apresentam diferenças em relação à idade, espécies e tipo de propagação.

#### 2.1 Organização do banco de dados

No banco de dados elaborado no aplicativo SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas) (CÂMARA et al., 1996), foram organizados produtos e informações cartográficas referentes a área de estudo (Quadro 2).

Quadro 2 - Descrição dos dados inseridos no aplicativo Spring.

BANCO DE DADOS - SPRING 5.1.8			
Dados	Escala/Resolução Espacial	Produto	Fonte
Base Cartográfica	1:50.000	Hidrografia	Hasenack; Weber (2010)
	1:500.000 e 1:2.000.000	Limites administrativos	BD SPRING
Relevo	1:250.000	Altimetria	TOPODATA
	1:250.000	Declividade	TOPODATA
Mapas Temáticos	1:1.000.000	Solo	IBGE
	-	Silvicultura	FEPAM
Imagens de satélite	30 metros	Mosaico Geocover	NASA
	30 metros	Landsat 5 TM	INPE
Produtos MODIS	250 metros	NDVI (MOD13)	NASA
	250 metros	EVI (MOD13)	NASA
	1 km	GPP (MOD17)	NASA

Legenda: BD SPRING - Banco de Dados SPRING; TOPODATA - Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil; FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental; NASA - *National Aeronautics and Space Administration*; INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*; EVI - *Enhanced Vegetation Index*; LAI - *Leaf Area Index*; GPP - *Gross Primary Production*; MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*; TM - *Thematic Mapper*.

Após a organização do banco de dados no Spring, o trabalho seguiu as etapas descritas conforme a Figura 10.

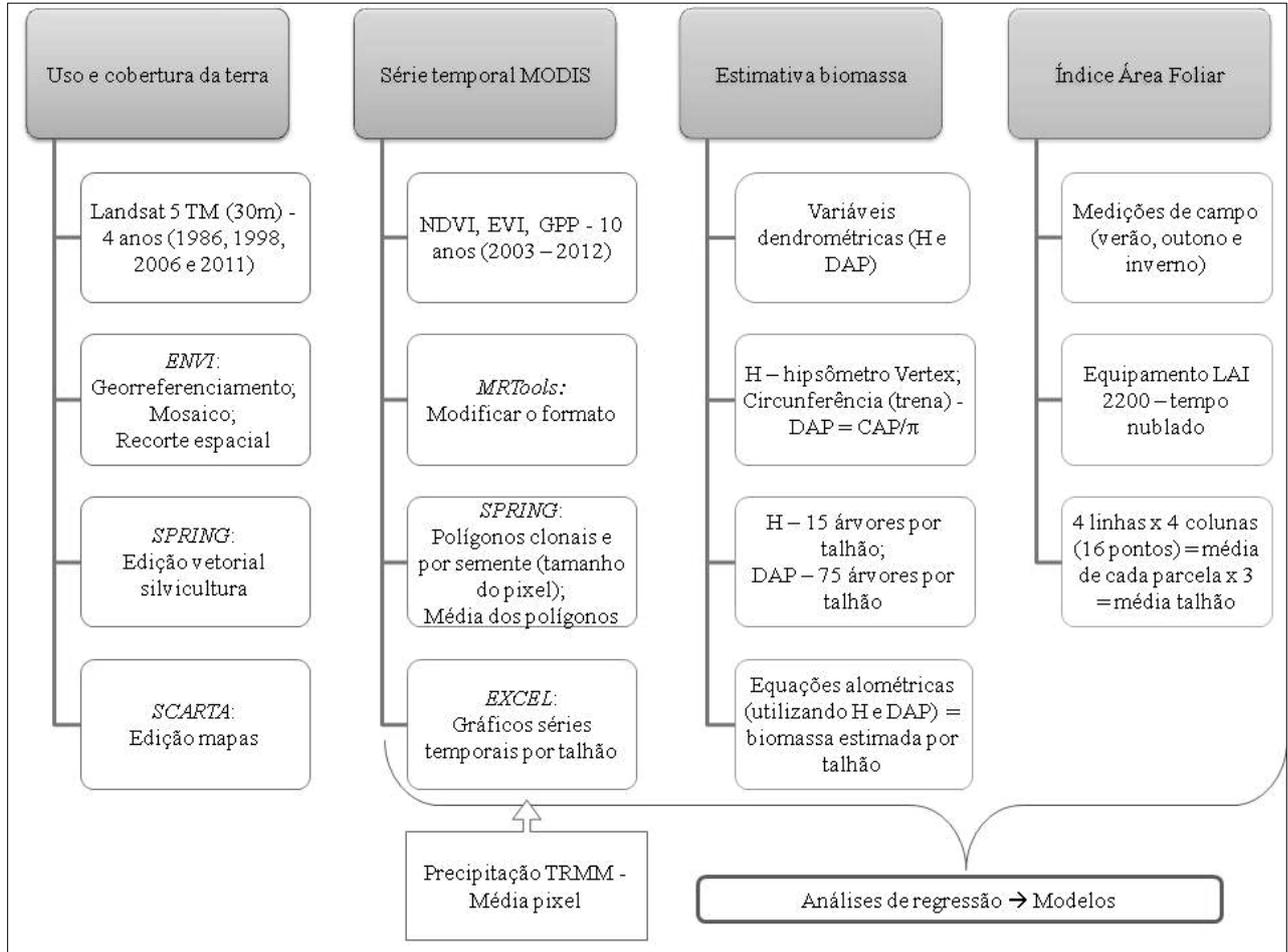


Figura 10 - Simplificação das etapas do desenvolvimento do trabalho.

## 2.2 Evolução da silvicultura

A fim de analisar a evolução da atividade de silvicultura (plantios arbóreos de eucalipto, pinus e acácia-negra) no Rio Grande do Sul, com destaque para a região sudeste do estado, realizou-se inicialmente uma pesquisa bibliográfica em trabalhos que sintetizam o assunto referente ao tema, destacando o desenvolvimento da atividade de silvicultura.

Os dados obtidos para o estudo da evolução da silvicultura se referem a imagens do satélite Landsat 5, sensor TM, com resolução temporal de 16 dias e resolução espacial de 30 metros (Quadro 3). As imagens são disponibilizadas gratuitamente no portal da Divisão de Processamento de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com uma

série que compreende desde o ano de 1984 até 2011, quando o satélite Landsat 5 encerrou as atividades.

Quadro 3 - Características dos dados Landsat.

Plataforma	Landsat
Sensor	TM
Altitude (km)	705
Faixa (km)	185
Resolução temporal	16
Nº de bandas	7 (R, G, B, IRP, 2 IRM, T)
Resolução espacial	30 m e 120 m (banda T)

Legenda e faixas aproximadas do espectro eletromagnético: R - vermelho (0,63-0,52  $\mu\text{m}$ ), G - verde (0,52-0,60  $\mu\text{m}$ ), B - azul (0,45-0,52  $\mu\text{m}$ ), IRP - infravermelho próximo (0,76-0,90  $\mu\text{m}$ ), IRM - infravermelho médio (1,55-1,75  $\mu\text{m}$ , 2,05-2,35  $\mu\text{m}$ ), T - termal.

Foram escolhidos quatro anos (1986, 1998, 2006 e 2011) (Quadro 4) para a realização da análise temporal da silvicultura na área de estudo. A época das imagens (outono/inverno) e os anos selecionados foram escolhidos a partir da análise das cenas disponíveis em acervo que não apresentavam cobertura de nuvem/ruído e considerando as datas mais próximas entre as duas órbitas-ponto utilizadas (221/81 e 222/81), a fim de não prejudicar o procedimento de mosaico.

Quadro 4 - Data das imagens Landsat 5, sensor TM, escolhidas para a análise temporal da silvicultura.

Ano	Órbita-Ponto	Data
1986	221-81	01/06
	222-81	10/07
1998	221-81	04/07
	222-81	25/06
2006	221-81	23/05
	222-81	28/04
2011	221-81	05/05
	222-81	26/04

Para todos os anos, as imagens Landsat 5 TM foram georreferenciadas em SIG (Sistema de Informação Geográfica) utilizando como referência o mosaico Geocover ortoretificado de imagens Landsat disponibilizado pela USGS (*United States Geological Survey*). Em seguida, realizou-se o mosaico das cenas correspondentes às órbitas-ponto 221/81 e 222/81 para cada ano estudado e por último procedeu-se o recorte espacial da área de estudo. Essas três etapas foram realizadas no *software* ENVI.

As imagens pré-processadas no *software* ENVI foram exportadas em formato *geotiff* e importadas para um banco de dados no *software* SPRING. Em seguida realizou-se a interpretação visual das imagens considerando uma composição falsa-cor (bandas 5R, 4G e 3B) e a edição vetorial das áreas de silvicultura. A edição final dos mapas foi realizada pelo *software* SCARTA disponível no pacote do sistema SPRING.

### 2.3 Séries temporais

Para a elaboração das séries temporais para a vegetação de eucalipto foram utilizadas cenas do sensor MODIS – produtos MOD13Q1 (NDVI e EVI) e MOD17A2 (GPP), adquiridas com disponibilidade gratuita no *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC)/NASA. Utilizou-se 23 cenas anuais (2 cenas mensais, com exceção do mês de outubro, com 1 cena) dos três produtos correspondentes à série temporal entre os anos de 2003 a 2012 (totalizando 230 cenas - 10 anos), com o propósito de analisar a temporalidade dos dados.

As imagens NDVI e EVI têm resolução espacial de 250 metros e resultam de um mosaico de pixels escolhidos entre as imagens diárias em um tempo de dezesseis dias, objetivando extrair pixels com melhor qualidade (sem interferência de nuvens e ruídos). Com relação às imagens GPP, as mesmas possuem resolução espacial de 1 quilômetro e resultam de uma composição de pixels de 8 dias (LATORRE et al., 2007) (Quadro 5). Para fins de comparação com datas semelhantes, as imagens GPP foram selecionadas em intervalos de 16 dias, conforme as datas das cenas de NDVI e EVI.

Quadro 5 - Especificações dos produtos MODIS utilizados no estudo.

Produto	Conteúdo	Composição	Resolução	Tile	Datas
MOD13	NDVI e EVI	16 dias	250 m	h13v12	2003 a 2012
MOD17	GPP	8 dias	1 km	h13v12	2003 a 2012

Com o propósito de modificar o formato dos arquivos (*\*.hdf* para *\*.tif*) e atribuir a uma projeção cartográfica, as imagens foram pré-processadas no *software* MRTTools sendo posteriormente incorporadas em um banco de dados no aplicativo Spring 5.1.8.

No aplicativo Spring 5.1.8 foram gerados polígonos com a área correspondente ao tamanho do pixel de cada produto (NDVI e EVI - 250 metros e GPP - 1 quilômetro) e relacionados a cada talhão a ser analisado: três talhões com plantios de eucalipto clonais (HF

001, 012 e 071) e três com plantios a partir de sementes (HF 026, 077 e 120) (Figura 11). Os talhões foram escolhidos em função de apresentarem data de plantio ao longo do ano de 2003, possibilitando a análise das fases de crescimento da vegetação desde o plantio.

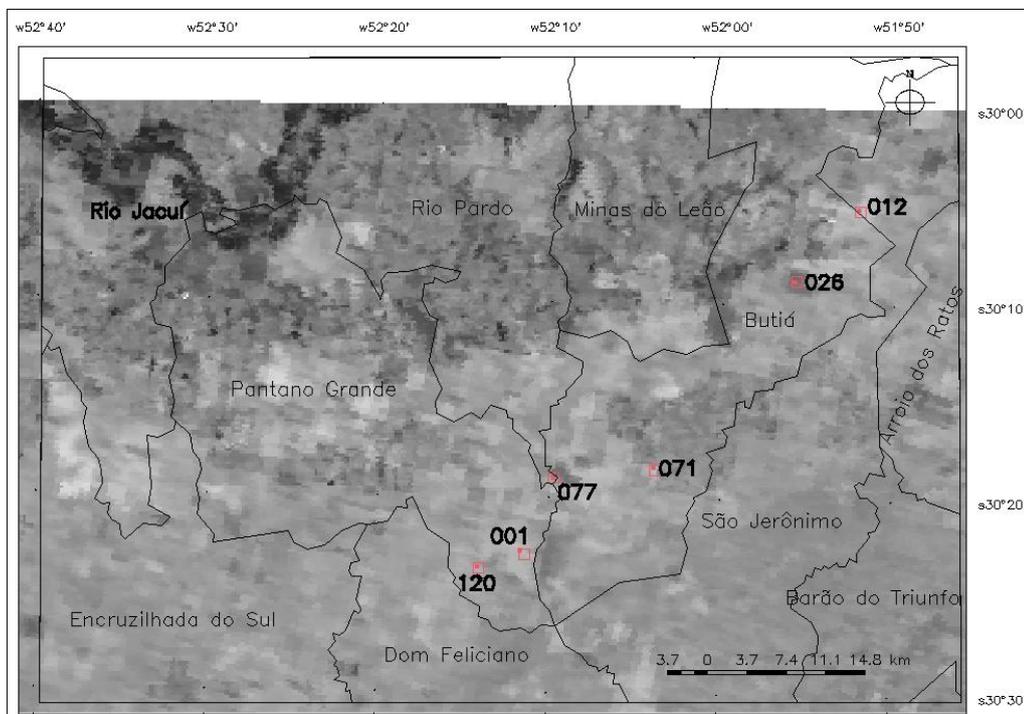


Figura 11 - Localização dos talhões/polígonos clonais e de semente; Imagem EVI, cena 257/2007.

Após a vetorização dos polígonos, foi extraída a média de cada amostra/polígono para cada uma das cenas MODIS que compõe a série temporal. Para isso, utilizaram-se estatísticas descritivas na ferramenta de análise exploratória de dados contida no aplicativo Spring. Os valores das médias foram plotados em tabela no *software* Microsoft Excel onde foram elaborados gráficos para a descrição do comportamento temporal de cada talhão.

A série de precipitação pluviométrica utilizada para relacionar com os dados das séries temporais (NDVI, EVI e GPP) foi organizada por Freitas et al. (2011) e utiliza o produto TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*). Os dados TRMM (3B43V6) são adquiridos usando o GES DISC DAAC (*Distributed Active Archive System*) que é parte da NASA's *Goddard Earth Sciences (GES) Data and Information Services Center (DISC)* e correspondem a uma série de precipitação acumulada mensal, com área de aproximadamente 0,25 graus (27,7 km). A precipitação de cada talhão foi extraída a partir de 1 pixel TRMM em posição mais próxima da coordenada geográfica informada.

## 2.4 Dados de campo

Para amostragem em campo foram considerados povoamentos de eucalipto em hortos da empresa Celulose Riograndense, os quais apresentam característica de formação em mosaicos, compostos por espécies (*E. dunnii* e *E. saligna*, principalmente), tipo de propagação (clonal e por semente) e idades diferentes. Neste trabalho não foram diferenciadas espécies, somente tipo de propagação (clonal e por semente) e idade (3, 5 e 7 anos).

Três hortos florestais (131 - Limoeiro, 077 - Aldo Sani e 064 - Ramos) foram escolhidos (Figura 12), sendo selecionados dois talhões em cada um deles: um com plantio de eucalipto por semente e outro com plantio de eucalipto clonal, resultando em seis talhões. Em cada um dos talhões foram marcadas três parcelas de 5 x 5 árvores (totalizando 18 parcelas de 4 linhas e 4 colunas - considerando as entrelinhas de plantio). Considerou-se esta amostra em função do tempo e dos recursos disponíveis para as coletas e análises.

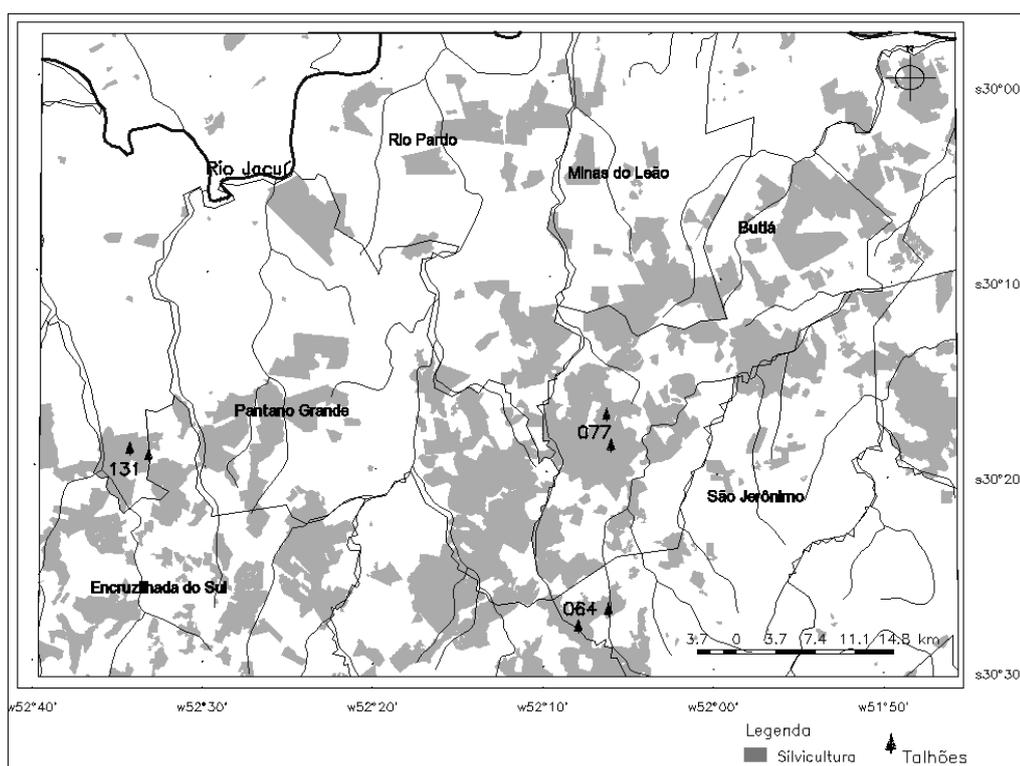


Figura 12 - Localização dos hortos florestais escolhidos para amostragem em campo.

Destaca-se que os hortos florestais escolhidos para amostragem em campo e os talhões selecionados para média dos índices espectrais do sensor MODIS, são diferentes. A escolha das áreas de amostragem em campo priorizou: a proximidade entre os talhões clonais e de semente (para facilitar o deslocamento); e idades de 3, 5 e 7 anos no período de coleta dos

dados em campo. Os talhões escolhidos para a extração das médias espectrais representam locais que foram plantados ao longo do ano de 2003, possibilitando a análise do crescimento da vegetação. Ressalta-se ainda, que a escolha dos talhões analisados por satélite também considerou a distância entre os talhões, uma vez que em função do tamanho do pixel poderia haver interferência nos resultados.

#### 2.4.1 Índice de Área Foliar

Os dados de Índice de Área Foliar (IAF) foram obtidos com a utilização do equipamento LAI 2200, com lentes de abertura em 45 graus, o qual utiliza dois cabos coletores (um em área externa (X) e outro (Y) na área onde foi realizada a medida do IAF). A área externa onde permanece o cabo medidor X deve ser livre de obstáculos no entorno (cerca de três vezes a altura dos obstáculos - como florestas, por exemplo). Quando o equipamento é ativado, o medidor X permanece na área externa (Figura 13A), enquanto o medidor Y é conduzido ao interior do horto florestal para a coleta dos dados (Figura 13B).



Figura 13 - Método de utilização do IAF em campo.

O IAF foi coletado em três períodos (avaliação sazonal): verão (13/01/2014), outono (06/05/2014) e inverno (19/06/2014), nas 18 parcelas correspondentes aos hortos escolhidos para o estudo e com tempo nublado (condição para a coleta dos dados). As medidas no interior de cada parcela foram feitas entre as linhas de plantio, a altura do peito, resultando em 4 linhas x 4 colunas (ou 16 pontos), dos quais resultou a média de cada parcela. Na última

observação (inverno), ocorreu erro na gravação dos dados no HF 064, não retornando dados para a idade de cinco anos.

#### 2.4.2 Dados de inventário

Os dados de inventário considerados neste estudo compreendem a altura da árvore (H) e o diâmetro à altura do peito (DAP), e foram coletados no dia 19 de junho de 2014. As medidas de H foram realizadas utilizando o equipamento hipsômetro Vertex, o qual retorna o valor da altura após medir a distância entre a base (a 1,3 metros) e a copa da árvore. Esta medida foi realizada em cinco, das vinte e cinco árvores totais (Figura 14), de cada uma das parcelas (parcelas consideradas para a medida de IAF).

O DAP foi calculado a partir da medida da circunferência à altura do peito (CAP), utilizando uma trena normal. Com o valor da CAP aplicou-se a fórmula do diâmetro ( $DAP = CAP/\pi$ ), resultando no dado de DAP requerido. Em campo, a CAP foi medida em todas as árvores (vinte e cinco) que compõe cada uma das parcelas (Figura 14). Para o cálculo da média de cada talhão, considerou-se a média de setenta e cinco árvores, que se refere ao total das três parcelas localizadas dentro do talhão.

A partir dos dados de DAP e H foram elaborados gráficos de dispersão para os povoamentos clonais e de semente, considerando o total das árvores amostradas em campo. Também foram elaborados gráficos de correlações, considerando os valores referentes às 15 alturas (3 parcelas x 5 árvores) e o valor de DAP correspondente.

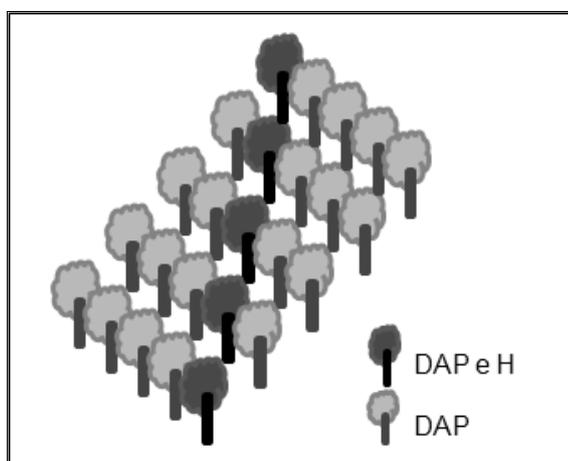


Figura 14 - Método de amostragem em campo para uma parcela.

## 2.5 Estimativa de biomassa

A estimativa da biomassa acima do solo para o eucalipto foi calculada utilizando equações alométricas disponíveis na literatura (Quadro 6). Foram escolhidas duas equações aleatórias geradas para plantios de eucalipto (SILVA et al., 2004; MELLO; GONÇALVES, 2008), que consideram os parâmetros DAP e H para o cálculo da biomassa do fuste. Uma terceira equação (CHAVE et al., 2005) foi selecionada com a finalidade de testar os parâmetros (DAP e H) de eucalipto, em uma equação gerada para florestas tropicais.

Quadro 6 - Equações alométricas utilizadas no estudo.

$Y = \exp(-2.977 + \ln(p \times DAP^2 \times H))$	Chave et al. (2005) <sup>1</sup>
$Y = \exp(-5,95150 + 1,18123 \times \ln(DAP^2 \times H))$	Silva et al. (2004)
$Y = \exp(-4,54731 + 2,13859 \times \ln DAP + 1,0236 \times \ln H)$	Mello; Gonçalves (2008)

Legenda: Y - biomassa (kg); ln - logaritmo natural; p - densidade da madeira; DAP - diâmetro à altura do peito; H - altura.

<sup>1</sup> p = 0,771 para eucalipto *saligna* - *Global Wood Density Database*.

A inserção dos valores de DAP e H nas equações alométricas resultou na biomassa estimada para cada árvore. Considerando que a biomassa total é a soma da biomassa de todas as árvores da parcela (BAKER et al., 2011), este valor foi extrapolado para o nível de hectare. Considera-se que os plantios clonais possuem espaçamento entre as árvores de aproximadamente 3 x 3m, totalizando 1.111 árvores por hectare, e plantios por semente espaçamento aproximado de 3 x 2,5m, totalizando 1.333 árvores por hectare. A partir desses valores realizou-se uma regra de três simples:

a) plantios clonais - 75 árvores (total de árvores amostradas) possuem média de Ykg em 675m<sup>2</sup> (se 10.000m<sup>2</sup> possuem 1.111 árvores, 75 árvores ocupam 675m<sup>2</sup>), portanto, 10.000m<sup>2</sup> (1 hectare) possuem Ykg.

b) plantios por semente - 75 árvores (total de árvores amostradas) possuem média de Ykg em 563m<sup>2</sup> (se 10.000m<sup>2</sup> possuem 1.333 árvores, 75 árvores ocupam 563m<sup>2</sup>), portanto, 10.000m<sup>2</sup> (1 hectare) possuem Ykg.

## 2.6 Modelos de predição de biomassa

A avaliação de modelos preditores de biomassa para o eucalipto foi estabelecida por meio de correlações lineares entre os dados espectrais (MODIS), os dados coletados em

campo (IAF, DAP e H) e a biomassa estimada (calculada por meio de equação alométrica utilizando o DAP e H). Foram realizadas 42 correlações (Apêndice A). A partir do coeficiente de correlação ( $r$ ) foi calculado o coeficiente de determinação das amostras ( $r^2$ ) e posteriormente realizado o teste  $T$  para a identificação das correlações com significância estatística (nível de significância  $\alpha = 0,05$  e  $\alpha = 0,20$ ).

Os dados do sensor MODIS utilizados para estas análises estatísticas, correspondem a médias amostrais dos pixels equivalentes aos hortos florestais onde foram obtidos os dados da vegetação em campo. A imagem referente às variáveis NDVI, EVI e GPP, corresponde a data mais próxima ao trabalho de campo (Quadro 7), possibilitando a comparação dos dados.

Quadro 7 - Data das imagens mais próximas aos trabalhos de campo, utilizadas nas correlações.

Data da imagem	Data do trabalho de campo
17/01/2014 - cena 017	13/01/2014
25/05/2014 - cena 145	06/05/2014
10/06/2014 - cena 161	19/06/2014

Por meio dessas relações simples foram observadas as tendências de ajuste entre as variáveis. Nesse sentido, Naghettini e Pinto (2007) destacam a utilização do coeficiente amostral de correlação ( $r_{x,y}$ ), resultado do grau de associação linear entre dois conjuntos ( $X$  e  $Y$ ) de observações ( $N$ ), que satisfaz a desigualdade  $-1 \leq r_{x,y} \leq 1$ , onde 1 representa associação positiva perfeita, -1 associação negativa perfeita e 0 para nenhuma associação. A partir dessa associação, foi possível a análise entre os parâmetros para a avaliação de modelos estatisticamente significantes que podem ser utilizados para predição de biomassa.

## CAPÍTULO III

---

### 3 A EVOLUÇÃO DA SILVICULTURA EM UMA PORÇÃO DO SUDESTE DO RIO GRANDE DO SUL

#### 3.1 Mapeamento das áreas de silvicultura

A cobertura da terra é afetada diretamente pelas mudanças naturais ou pelas atividades antropogênicas. Pode ser pronunciada quando um tipo de cobertura é substituído por outro, ou mais sutil, quando envolve alterações dentro da mesma classe de cobertura da terra (HUETE, 2004). Em relação à silvicultura no sudeste do Rio Grande do Sul, a interpretação visual das imagens Landsat 5 TM (composição 5R, 4G, 3B), correspondente aos anos de 1986, 1998, 2006 e 2011, mostrou que houve um aumento de 57.829 ha de áreas destinadas para a silvicultura.

Ao analisar o padrão espacial da expansão das áreas de silvicultura (eucalipto, acácia-negra e pinus), é possível observar que o avanço ocorreu na direção Nordeste-Sudoeste da área considerada para este estudo (Figura 15). No ano de 1986 (Figura 15 A) houve uma concentração predominante dos povoamentos entre a porção leste da área de estudo até a porção central, com povoamentos esparsos no restante da área. A partir do ano de 1998 (Figura 15 B), nota-se o início da expansão na porção oeste do recorte espacial da área de estudo, com intensa ocupação da área no ano de 2011 (Figura 15 D).

Na série temporal analisada observaram-se duas regiões do recorte espacial, noroeste e sudeste, onde os cultivos arbóreos não estão tão presentes. Na região noroeste isso ocorre possivelmente devido a influência da planície fluvial do Rio Jacuí, com grandes áreas de várzea voltadas para o cultivo do arroz, gerando também maior valor agregado a terra. Corroborando com a tendência referente à influência da planície fluvial, Canavesi et al. (2011) em estudo da distribuição do eucalipto no Estado de São Paulo, destaca que este cultivo não tolera locais alagados, explicando a pequena área cultivada em locais mais susceptíveis à inundação.

Na região sudeste da área de estudo, há maior participação de plantios de acácia-negra, os quais ocupam áreas de terra menores do que os plantios de eucalipto ou pinus. Assim, os resultados podem ter sido subestimados nessa área, devido à resolução espacial da imagem

(30 metros) dificultar a interpretação visual em pequenas áreas de plantios. Outra dificuldade pode estar relacionada as condições do relevo, o qual se apresenta mais dissecado em comparação ao restante da área, e em consequência pode ter dificultado a interpretação espectral dos alvos em função do sombreamento. Aliado a esta condição, a presença de declividades mais acentuadas torna este uso uma desconformidade legal, uma vez que de acordo com o Código Florestal - Lei n° 4.771 de 1965, declividades acima de 45° são áreas protegidas (CANAVESI et al., 2011).

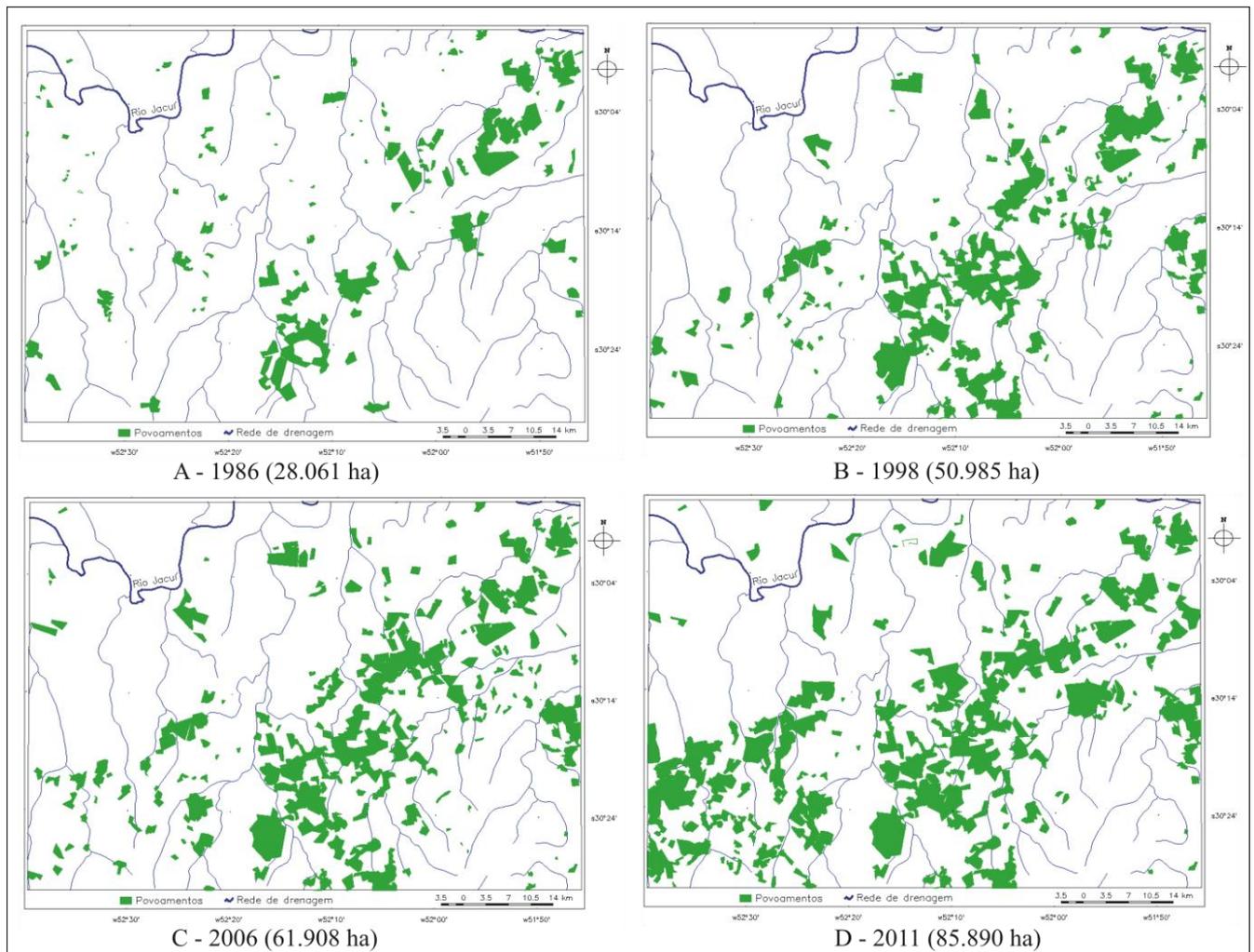


Figura 15 - Espacialização temporal das áreas de silvicultura (eucalipto, pinus e acácia-negra) na área de estudo referente aos anos de 1986 (A), 1998 (B), 2006 (C) e 2011 (D).

Em geral, a área de silvicultura em todos os anos estudados pode ter sido subestimada, devido a resolução espectral e espacial da imagem (30 metros). Na interpretação visual da imagem Landsat correspondente ao ano de 2011, observou-se 85.890 ha de área compreendida como silvicultura. De acordo com dados da empresa CMPC Celulosa, em março de 2014, a área de terras pertencentes a Celulose Riograndense em Guaíba

compreendia 219.962 ha, sendo 120.419 ha plantados com eucalipto e o restante formando áreas de proteção com vegetação nativa. Ao comparar estes resultados com o dado apresentado pela FEPAM em 2012 (aproximadamente 121.340 ha), nota-se uma diferença expressiva em relação ao resultado do mapeamento neste trabalho, bem como um acréscimo em relação à área informada pela empresa.

A diferença entre os dados da literatura e o dado da interpretação visual, possivelmente vincula-se a data das imagens, relacionada ao período de colheita e preparo do plantio em alguns hortos florestais, modificando a resposta espectral do alvo silvicultura, tendo em vista o solo ser altamente reflexivo pela característica granítica. Áreas de sombreamento e a resolução espacial também podem ter dificultado a interpretação de pequenas áreas de plantios arbóreos.

O gráfico representando o aumento da área de silvicultura, correspondente ao recorte espacial utilizado neste trabalho e extraído dos resultados da interpretação visual das imagens Landsat (Figura 16), mostra semelhança com o dado apresentado pelo IBGE (2007) sobre a área ocupada por plantios arbóreos no RS (Figura 4). Em ambos os resultados, há uma tendência constante de crescimento da atividade de silvicultura, sendo que nos últimos anos (na área de estudo a partir do ano de 2006) essas áreas mostraram uma maior progressão. Este crescimento acelerado também foi observado por Marchesan et al. (2012) na Serra do Sudeste, onde as áreas de plantios arbóreos com gêneros exóticos (*Eucalyptus*, *Pinus* e *Acácia*), apresentaram um aumento de 163.034,16 ha entre 2004 e 2011.

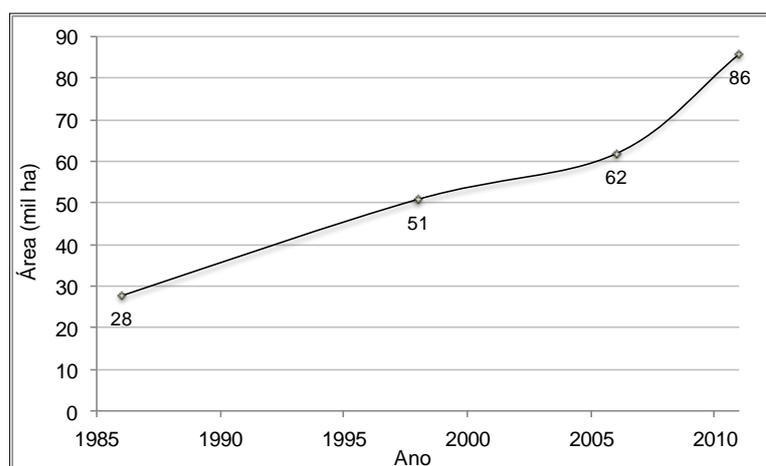


Figura 16 - Área (mil ha) destinada para atividade de silvicultura na área de estudo no período de 1986-2011.

Justificando esta tendência crescente da atividade de silvicultura no RS, Alba et al. (2009) destacam que o território Sul-rio-grandense localiza-se em latitude semelhante a da

Austrália, local de origem do eucalipto, o que torna o estado privilegiado para o setor de silvicultura.

A área de ocupação dos plantios arbóreos em 2011 em relação às Unidades de Paisagem Natural (UPN), classificadas para o Zoneamento Ambiental para a Atividade de Silvicultura, mostra maior concentração dos plantios na UPN PS3 (Quadro 8) em relação as demais UPN. A UPN PS3 está presente em 32% da área de estudo e concentra 44,9% dos plantios arbóreos (de acordo com a interpretação visual - 2011). Enquanto a maior área (66%) corresponde a UPN DP5, que concentra 54,9% dos povoamentos.

Quadro 8 - Relação entre UPN e área de silvicultura (2011) presentes no recorte espacial estudado.

UPN	Área		Silvicultura 2011	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)
DP5	353.508	66,1	46.910	54,9
PS3	171.714	32,1	38.390	44,9
PS4	9.429	1,7	127	0,1

A área correspondente a UPN PS3, que possui maior concentração de plantios arbóreos, corresponde à região da borda norte do Escudo Rio-grandense, representando zona de transição entre campo e floresta. Nessa região, o Zoneamento Ambiental para a Atividade de Silvicultura recomenda áreas de silvicultura somente em locais classificados como campos altamente antropizados. Ainda assim, os plantios arbóreos devem utilizar técnicas de conservação do solo, definidas em projeto técnico, de acordo com as características da área.

## CAPÍTULO IV

### 4 SÉRIES TEMPORAIS DE ÍNDICES ESPECTRAIS E PRECIPITAÇÃO

#### 4.1 Índices espectrais

Os gráficos representando as séries temporais de EVI mostram valores entre 0,2 e 0,8 para todos os talhões. Em geral, considerando toda a série temporal, as espécies clonais de eucalipto apresentam pequenas variações (aproximadamente 0,2) entre os talhões (Figura 17), enquanto os plantios a partir de semente (Figura 18) evidenciam maiores variações (aproximadamente 0,4) neste mesmo intervalo (2003-2012) de EVI. Este comportamento é inverso no segundo e terceiro ano de crescimento, possivelmente devido à resposta a adubação de manutenção (que ocorre em torno de 1 ano). Além disso, esta característica pode estar vinculada ao tipo de solo, disponibilidade hídrica e material genético, os quais podem apresentar diferentes comportamentos quanto ao crescimento em diferentes locais (FERREIRA, 2007).

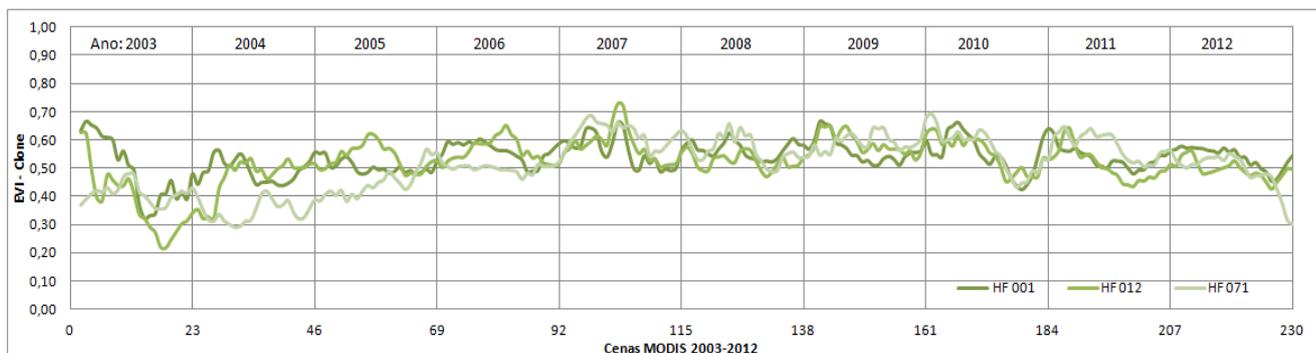


Figura 17 - Série temporal (2003-2012) de EVI em talhões clonais de eucalipto.

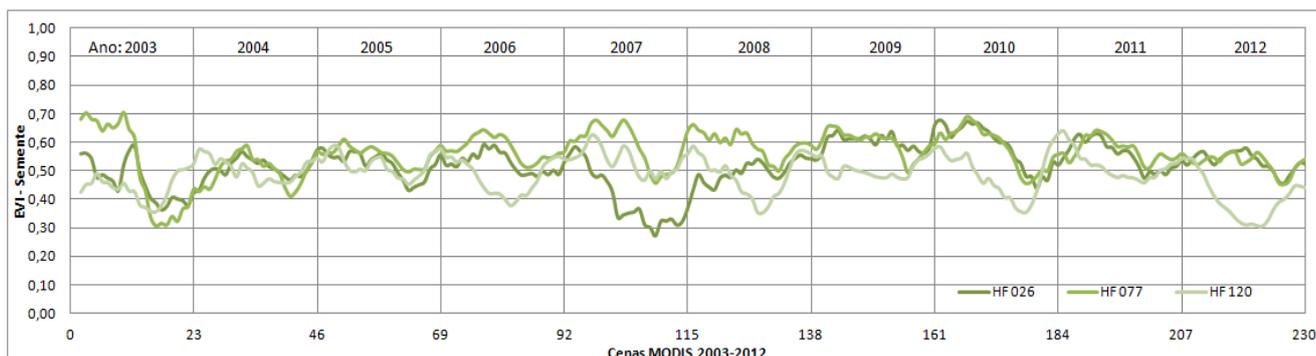


Figura 18 - Série temporal (2003-2012) de EVI em talhões de semente de eucalipto.

Mesmo com as variações entre os talhões, os gráficos demonstram uma característica sazonal comum nos dois tipos de plantios (clones e sementes), observando-se uma queda nos valores de EVI no período compreendido entre o final da primavera e início do verão.

Em relação aos dados de NDVI, representados nos gráficos (Figura 19 e 20), o intervalo dos valores nos talhões clonais e de semente foi de 0,4 a 0,9. Entre os talhões clonais (Figura 19) houve maior variação nos primeiros anos de plantio (até os 5 anos), com estabilização e pequena variação a partir do sexto ano (cenas 115-138). No HF 001 é observada uma feição de declínio do NDVI no ano de 2008, ocasionada devido a mistura espectral observada no pixel amostrado.

Os talhões com plantios por sementes (Figura 20) apresentam menor variação se comparado com os talhões clonais. A exceção ocorre no HF 026 no ano de 2007 (cenas 92-115), que apresenta uma queda significativa no valor de NDVI, possivelmente ocasionada pelo corte das árvores para início de um novo ciclo de plantio.

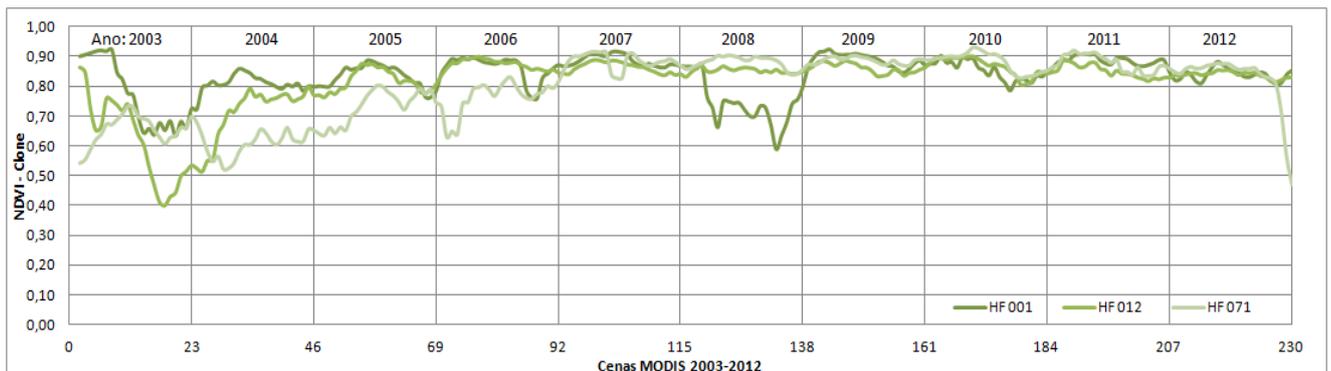


Figura 19 - Série temporal (2003-2012) de NDVI em talhões clonais de eucalipto.

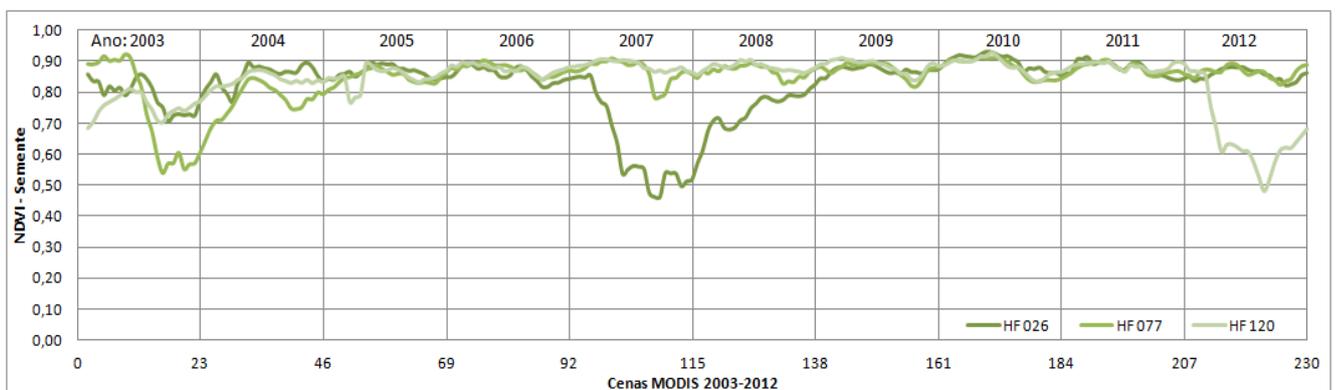


Figura 20 - Série temporal (2003-2012) de NDVI em talhões de semente de eucalipto.

Em comparação, os HF 012 e 077 (clone e semente, respectivamente) apresentam comportamento e valores semelhantes aos encontrados por Marsden et al. (2010) e Maire et

al. (2011), onde a data de colheita do ciclo anterior, a data de plantio e o período inicial de crescimento são bem definidos, com valores semelhantes a reflectância do solo no período inicial de crescimento, alcançando valores máximos de NDVI já no segundo ano do plantio.

Como exemplo, o comportamento do HF 026 pode ser observado nas imagens EVI e NDVI, mostradas na Figura 21. Em ambas, o pixel correspondente ao HF 026 aparece com tonalidade mais escura quando comparado ao pixel referente ao HF 077. Assim, de acordo com a hipótese ressaltada anteriormente para o HF 026, a feição de declínio nos gráficos de EVI e NDVI, pode ser comprovada nas imagens.

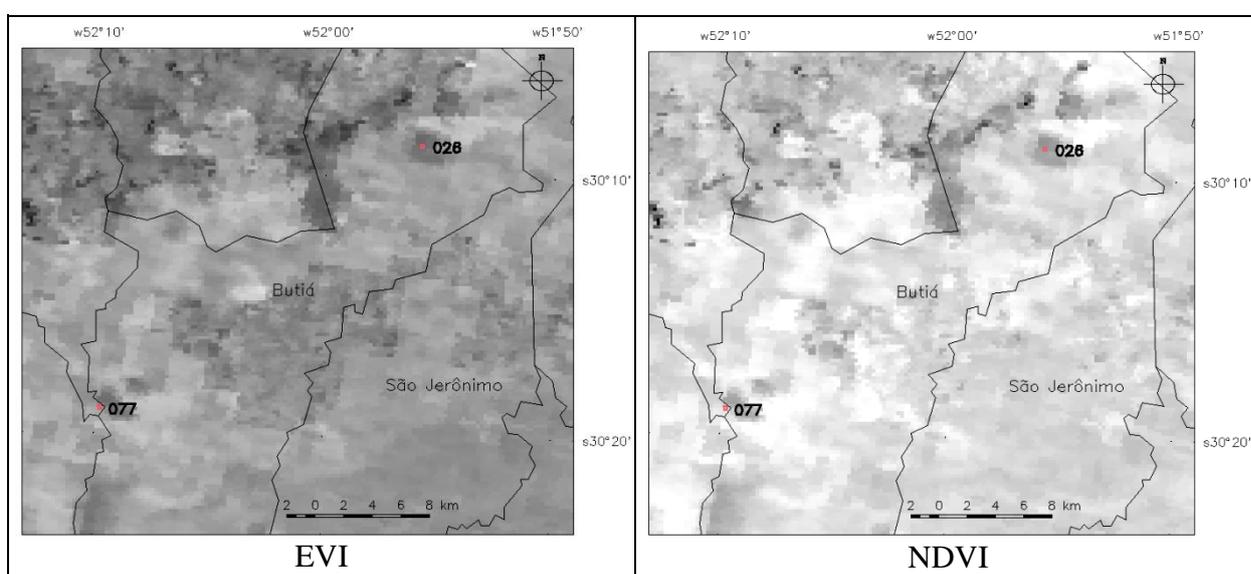


Figura 21 - Imagem EVI e NDVI (dia juliano 257 - ano 2007), destacando os talhões de semente 026 e 077.

Observa-se que entre os dados de EVI e NDVI, os valores de NDVI são maiores para os dois tipos de plantios, enquanto os valores de EVI apresentam-se menores. A diferença entre o EVI e NDVI pode estar associada à sensibilidade do EVI em relação ao solo e aos efeitos atmosféricos, sendo mais sensível às variações na resposta estrutural do dossel (HUETE et al., 2002), enquanto o NDVI pode conter interferência dos parâmetros solo e atmosfera. Outro fator observado se refere à oscilação dos dados entre os talhões (considerando tanto um período anual quanto o período de dez anos), onde os dados de EVI apresentam maiores variações em comparação aos dados de NDVI, que se mostram mais estáveis.

Os gráficos de GPP dos plantios clonais (Figura 22) e por semente (Figura 23) apresentam intervalo de variação semelhante (de 2 a 10) e característica sazonal definida, com menor produtividade no período de inverno e maior no período correspondente ao verão. Nos

plantios por semente, não houve diferenças entre os talhões. No gráfico de plantio clonal, o HF 012 exibe valores menores ao longo da série temporal em relação aos HF 001 e 071, os quais não apresentam diferenças entre si. A alteração encontrada no HF 012 pode estar relacionada a confusão espectral entre tipologia de cobertura da terra devido ao tamanho do pixel (1km), a espécie, adubação ou ainda erro referente a época do plantio.

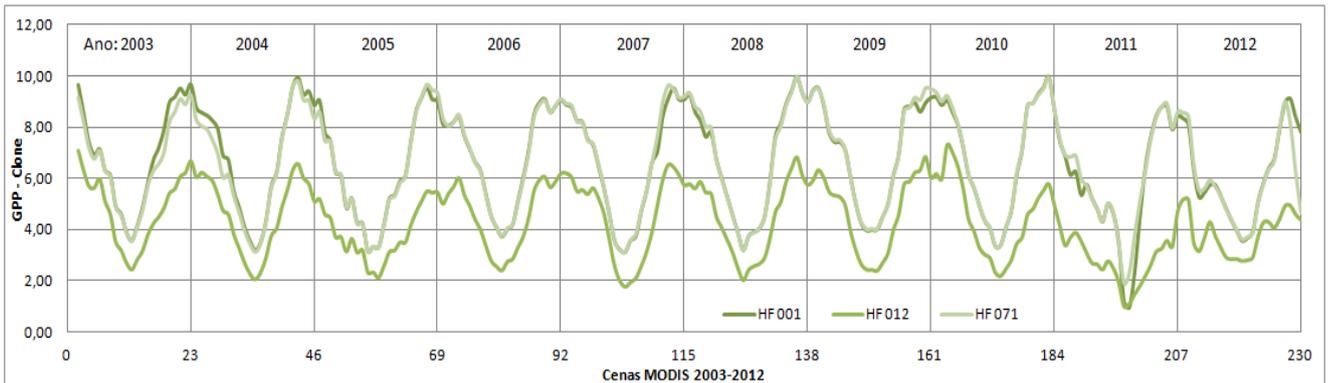


Figura 22 - Série temporal (2003-2012) de GPP em talhões clonais de eucalipto.

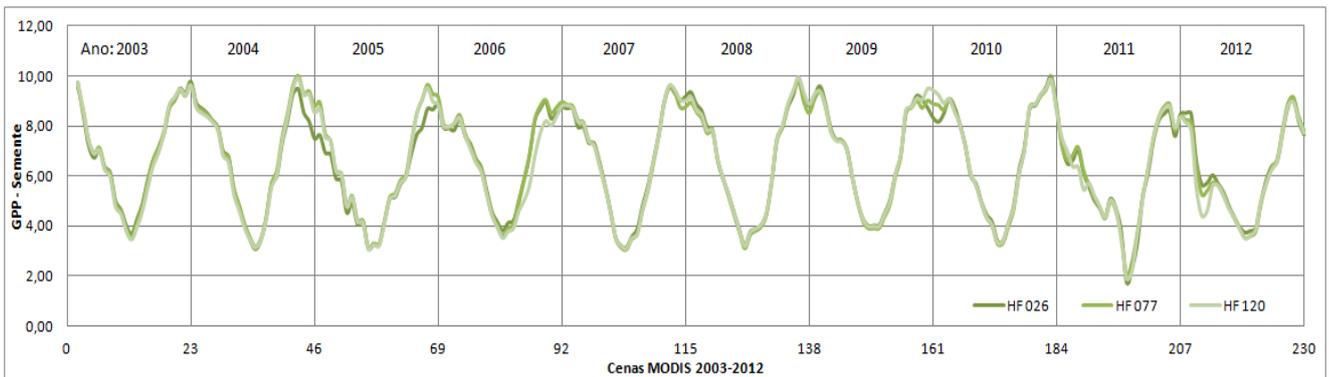


Figura 23 - Série temporal (2003-2012) de GPP em talhões de semente de eucalipto.

A ocorrência de outra feição diferenciada está presente nos plantios clonais e de semente no ano de 2011 (Figuras 22 e 23). Ao analisar as imagens EVI e NDVI (cena 257), que correspondem ao ponto da feição de decréscimo dos valores observada no gráfico da série temporal, não foi verificada presença de ruído ou qualquer outra interferência. Ao pesquisar sobre ocorrências climáticas naquele período, encontraram-se relatos de um inverno rigoroso, sendo que no referido período, constatou-se a maior sequência de dias de frio abaixo de 0°C da última década.

## 4.2 Índices espectrais e precipitação

Os gráficos representando as médias dos índices de vegetação EVI e NDVI (Figuras 24 e 25) mostram que os valores de NDVI (0,5 a 0,9) são superiores aos valores de EVI (0,3 a 0,7), como já destacado nos gráficos que apresentaram os talhões individuais. Observando o desenvolvimento anual dos povoamentos, entre o plantio até aproximadamente o quarto ano de crescimento, a média de EVI e de NDVI dos talhões oriundos de semente apresenta um valor superior aos talhões clonais. Esta diferença pode estar relacionada ao formato das folhas das árvores clonais e por semente. No geral, as plantas clonais referem-se à espécie de eucalipto *saligna*, que possui a folha estreita e alongada, enquanto as árvores de semente pertencem geralmente a espécie *dunnii*, e apresentam nos primeiros anos de desenvolvimento, folhas mais arredondadas (Figura 26), características que podem interferir na reflectância foliar.

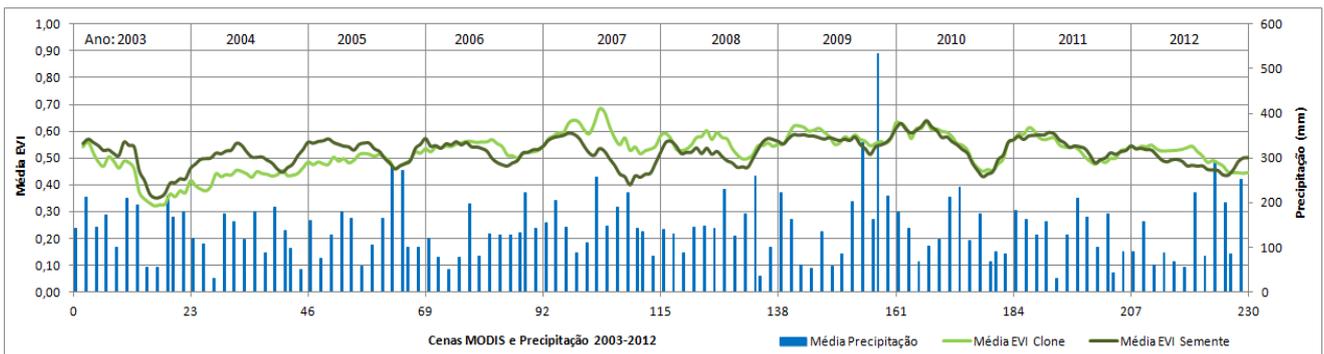


Figura 24 - Média do EVI nos talhões clonais e de semente e sua relação com a precipitação mensal acumulada entre 2003-2012.

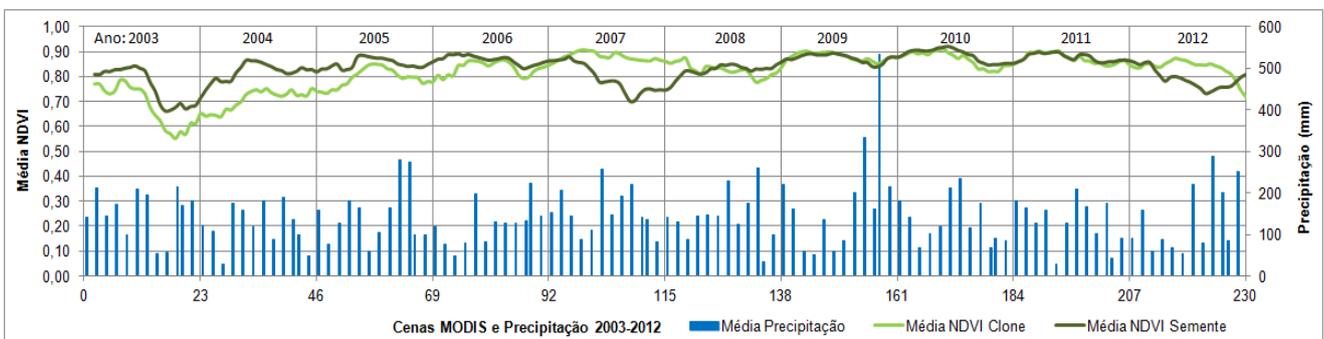


Figura 25 - Média do NDVI nos talhões clonais e de semente e sua relação com a precipitação mensal acumulada entre 2003-2012.

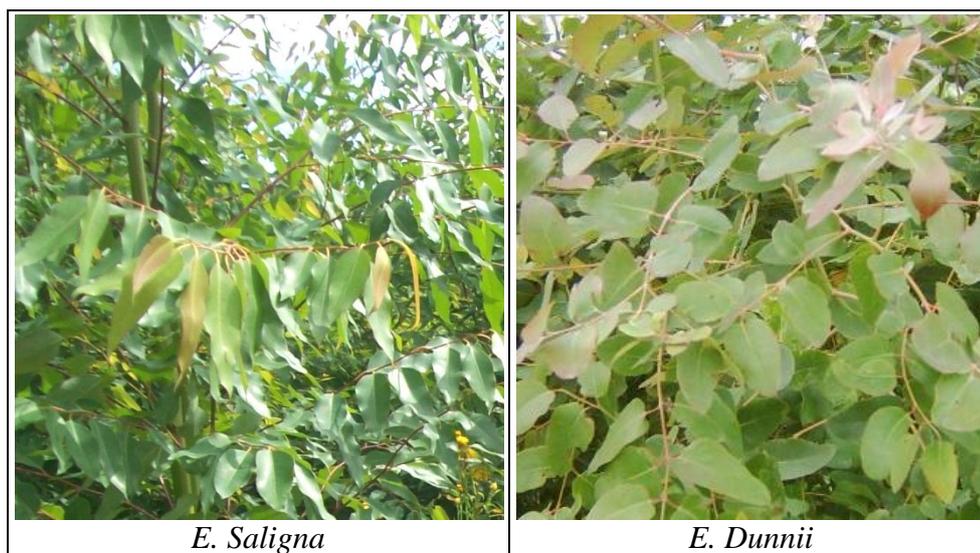


Figura 26 - Diferença entre as folhas do Eucalipto *Saligna* e *Dunnii*.

O comportamento geral do plantio clonal, observado tanto no EVI como no NDVI, mostra um acréscimo gradual desde o plantio até atingir um pico máximo no quarto ano. A média do plantio por semente demonstra crescimento gradual somente no primeiro ano, com a estabilização a partir desse período. Com esta diferença, pode-se afirmar que a partir do quarto ano de crescimento dos plantios clonais e por semente, as médias são praticamente igualadas, demonstrando que os povoamentos atingiram seu ápice de crescimento.

Ainda em relação as Figuras 24 e 25, que corresponde a média dos índices de vegetação em ambos os talhões (clonais e de semente) e sua relação com a precipitação mensal acumulada, é possível observar que não há relação visual direta entre essas variáveis (índices de vegetação e precipitação). No entanto, deve-se ressaltar que médias mensais podem mascarar os dados devido ao longo período de tempo. Além disso, considera-se também que a relação com uma cultura permanente, como o eucalipto, não necessariamente traz uma resposta da precipitação, mesmo considerando o retardo de tempo, diferente do que acontece com culturas temporárias.

Ao contrário do observado neste trabalho, Ribeiro et al. (2009), em estudo no Estado do Espírito Santo, obteve sincronia entre o conjunto de dados multitemporais EVI e variáveis climáticas (como a precipitação), possivelmente devido a condição de sazonalidade bem definida da precipitação, diferentemente das condições que ocorrem no RS.

O gráfico representando a produtividade - GPP (Figura 27) também não apresentou relação bem definida com a precipitação, da mesma forma que ocorreu com os índices EVI e NDVI. Considerando que o Estado do RS não apresenta condições sazonais claras em relação à precipitação, pode-se considerar como hipótese a utilização da variável temperatura, que

apresenta condições sazonais bem definidas no estado, e neste caso, poderia explicar melhor a relação entre o plantio arbóreo de eucalipto e uma variável climática.

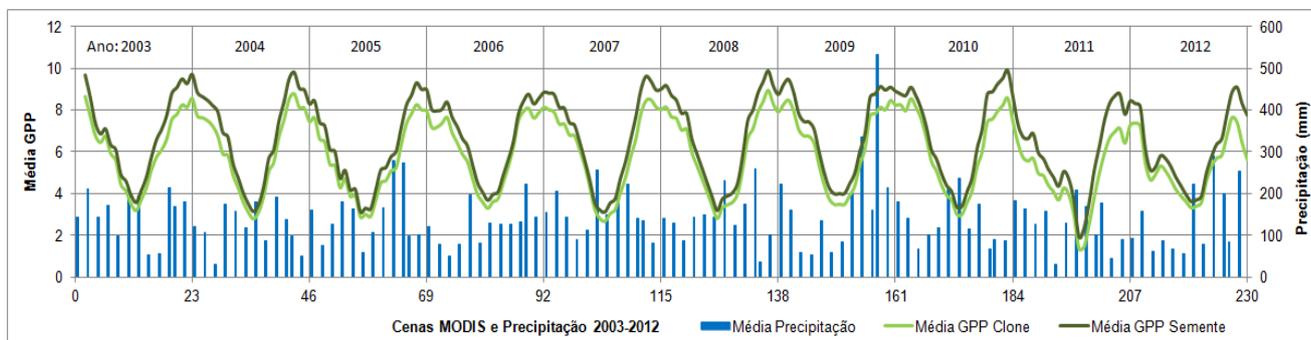


Figura 27 - Média de GPP nos talhões clonais e de semente e sua relação com a precipitação mensal acumulada entre 2003-2012.

Apesar dos dados (índices espectrais e precipitação) não apresentarem relações visualmente, estatisticamente foi possível obter associações lineares (nível de confiança de 95%) entre as médias anuais das variáveis espectrais e a média anual da precipitação (Quadro 9). Destacam-se para os plantios clonais, o NDVI em 2012, EVI nos anos de 2003 e 2005 e GPP em 2008 e 2010. Em relação aos plantios por semente, há tendência de correlação para os dados de NDVI em 2006, para o EVI em 2003 e 2005, e GPP em 2008 e 2010. Também foram testadas correlações entre os dados, considerando a resposta tardia da precipitação sobre os plantios arbóreos. No entanto, essas relações não apresentaram tendências significativas.

Quadro 9 - Correlações lineares anuais no período 2003-2012 entre as médias anuais dos índices espectrais MODIS e da precipitação TRMM.

<b>R Clone</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>
NDVI	0,3390	0,2468	-0,0670	0,0488	-0,2425	-0,3027	-0,3979	0,2393	-0,0858	<b>-0,4153</b>
EVI	<b>0,440798</b>	0,015935	<b>-0,41605</b>	-0,13727	0,313968	-0,024586	-0,29597	-0,04337	0,148462	-0,34514
GPP	0,000284	-0,32163	0,101306	0,057482	-0,35814	<b>-0,455021</b>	0,384816	<b>-0,48579</b>	-0,35404	-0,07793
<b>R Semente</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>
NDVI	0,3355	0,3051	-0,1135	<b>-0,4266</b>	-0,1643	0,0403	-0,3828	0,2829	0,0103	-0,0911
EVI	<b>0,523937</b>	-0,32286	<b>-0,6415</b>	-0,19904	-0,05702	-0,333076	-0,28629	-0,11417	0,221528	-0,14641
GPP	-0,011232	-0,34496	0,099201	0,049384	-0,3154	<b>-0,441943</b>	0,393313	<b>-0,49301</b>	-0,30006	0,031518

Ao comparar estes dados observa-se que as relações entre EVI x precipitação são significativas no mesmo período, tanto para plantios clonais como em plantios por semente. Isso ocorre também na relação entre GPP x precipitação. No caso do NDVI estes períodos não foram compatíveis. Mesmo possuindo pouca correlação, Wang et al. (2003) destacam a

influência da precipitação sobre o NDVI e por consequência na produtividade, tendo forte correlação (média de 0,79 em florestas de galeria) quando a escala espacial é adequada.

Com estes resultados e consultando os anos de ocorrência de El Niño e La Niña (CPTEC/INPE), observou-se que em 2002-2003 e 2004-2005 ocorreu o fenômeno El Niño com intensidade moderada e fraca, respectivamente, exatamente nos anos onde foi verificada correlação significativa com os dados de EVI. No mesmo contexto, nos anos que foram encontradas correlações com os dados de GPP (2008 e 2010) ocorreram os fenômenos La Niña e El Niño (forte e fraco, respectivamente). Estes dados podem demonstrar uma tendência entre os fenômenos El Niño e La Niña com os dados MODIS, no entanto, não podem ser considerados conclusivos, uma vez que são somente observações entre dados em um pequeno período de tempo, podendo ocorrer variações entre as correlações devido a outros fatores que não somente climáticos.

Ainda observando os resultados em relação ao comportamento sazonal, principalmente de GPP, destaca-se a variação significativa deste índice de acordo com as estações do ano. Assim, dados climáticos de temperatura poderiam resultar melhores correlações com os índices espectrais para esta região, uma vez que no Estado do RS a dinâmica sazonal é mais influenciada pela temperatura do que pela precipitação. Santana et al. (2008) reforçam que os fatores de crescimento podem tornar-se limitantes para as plantas: por poucos minutos (temperatura), outros por dias, semanas (água) ou até mesmo meses (nutrientes), destacando assim, a importância da relação entre as condições climáticas e plantas.

## CAPÍTULO V

### 5 DADOS DE CAMPO E BIOMASSA

#### 5.1 Índice de Área Foliar

O índice de área foliar atua como interface ativa entre o ecossistema e a atmosfera, e por isso, qualquer alteração deste índice (devido a condições climáticas, por exemplo) pode modificar a produtividade do povoamento (CANTINHO, 2012). De acordo com os dados de IAF coletados em campo, pode-se observar na Figura 28, a diferença sazonal entre os dados. Este contexto reforça a possibilidade de a variável temperatura influenciar nos dados da vegetação.

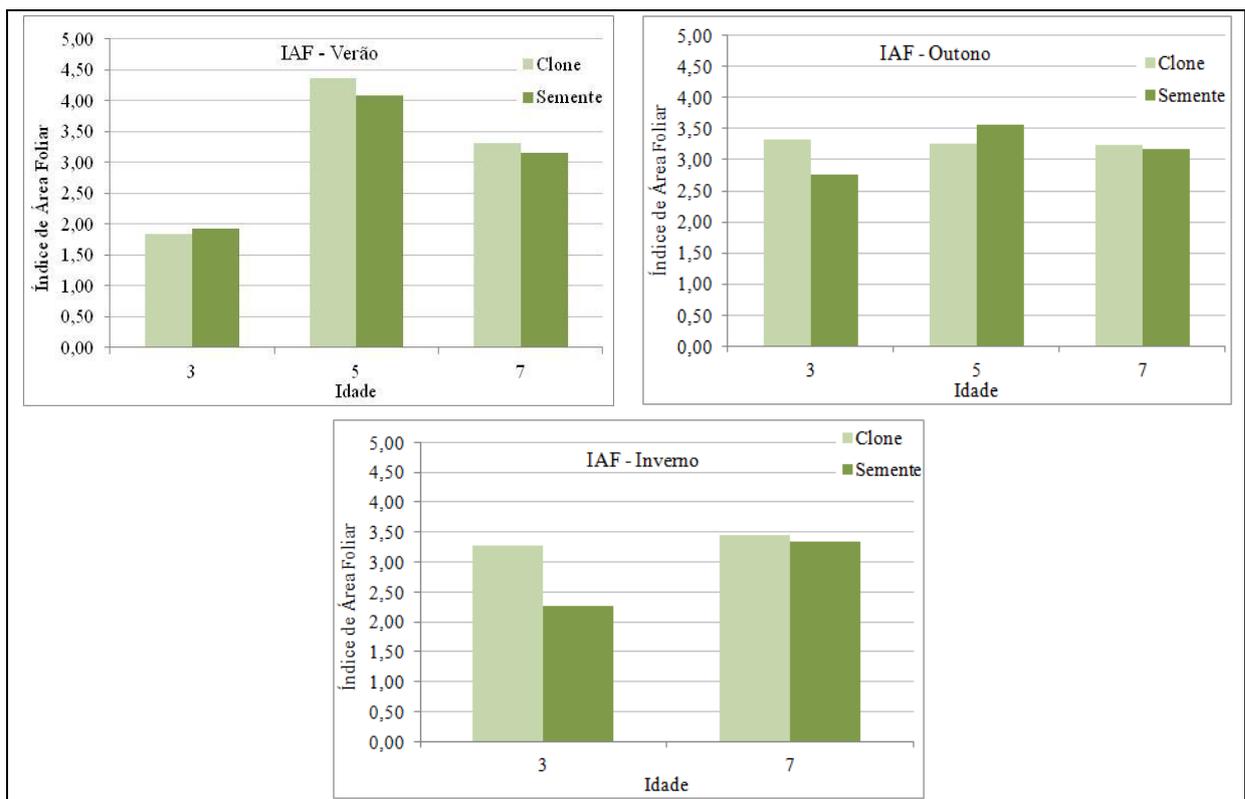


Figura 28 - Dados de IAF correspondentes aos períodos de verão, outono e inverno, para os plantios de eucalipto clonais e de semente em diferentes idades.

No período de verão, o IAF apresenta maior amplitude entre as idades (3, 5 e 7 anos) nos plantios de ambos os tipos (clones e sementes) se comparado aos dados coletados no período de outono e inverno. Corroborando com esta afirmação, Maire et al. (2011b)

comentam que em plantações de eucalipto, que apresentam rápido crescimento, o IAF é sazonalmente dinâmico, variando espacialmente dependendo das condições pedoclimáticas.

Estatisticamente, o coeficiente de variação entre os períodos de verão, outono e inverno (Figura 29), confirmou a diferença de amplitude encontrada nos dados de IAF. No período de verão, os dados de IAF variaram entre 35 e 40% para plantios por semente e clonais, respectivamente. Ao comparar o coeficiente de variação para plantios clonais entre o período de verão em relação ao outono e inverno, observa-se uma grande diferença, de 40% no verão, para 1,4% no outono e 3,5% no inverno. Em relação aos plantios por semente, o menor coeficiente de variação (12,83%) foi encontrado para o período do outono.

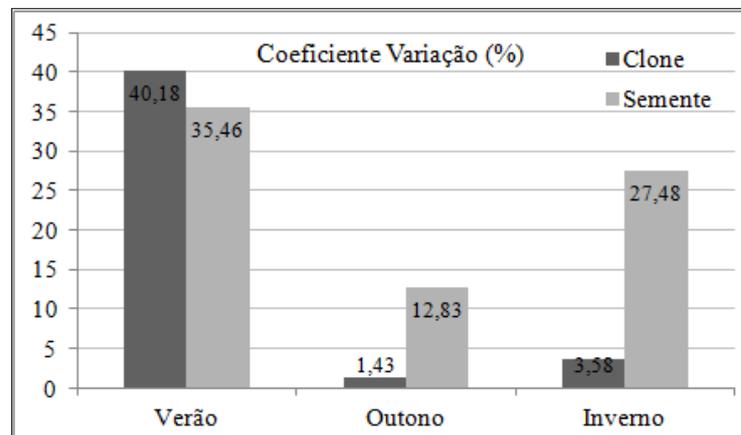


Figura 29 - Coeficiente de variação (%) do IAF correspondente aos períodos de verão, outono e inverno, para os plantios de eucalipto clonais e de semente.

Uma das características expressivas se refere ao comportamento do IAF em relação a idade do plantio, principalmente aos 3 e 5 anos. Com 3 anos, o IAF correspondente ao verão apresentou valores mais baixos (entre 1,5 e 2) em relação aos períodos de outono (2,5 a 3,5) e inverno (entre 2 e 3,5). O contrário ocorre com os plantios de 5 anos, que apresentaram valores superiores (maiores que 4) no verão. Por último, os plantios com idade de 7 anos mantiveram IAF semelhantes nos três períodos.

Outro fato que pode ser analisado é o valor de IAF aumentar entre 3 e 5 anos de idade até atingir um limite máximo, e a partir deste ponto, decrescer conforme avança a idade (7 anos). Confirmando esta avaliação, Xavier et al. (2002) comentam em seu trabalho o decréscimo do IAF com a idade após o pico do crescimento, refletindo o fato de o incremento anual nestas plantações atingir seu pico entre três e quatro anos, decrescendo quando se aproxima o período de corte (sete anos).

Em relação aos valores de IAF, Xavier et al. (2002) encontraram valor médio de 2,86 em plantios com variação de idade entre 1,5 e 6,5 anos. Chaves et al. (2007) encontrou média geral de IAF de 3,11 em eucalipto *grandis* aos 5,6 anos de idade, considerando povoamento que foi desbastado até os 2 anos, enquanto em povoamento onde não foi realizado o desbaste encontrou IAF de 4,02. Neste estudo (plantios com idade entre 3 a 7 anos), o IAF médio encontrado para o período de verão foi de 3,17 (clone) e 3,05 (semente) e de 3,27 (clone) e 3,17 (semente) para o outono, valores superiores aos encontrados por Xavier et al. (2002) e muito semelhantes ao IAF encontrado por Chaves et al. (2007) em povoamento com desrama.

De maneira geral, os valores de IAF apresentaram maiores variações (entre 1,5 e 4,5) no período de verão e tiveram comportamento mais semelhante (entre 2 e 3,5) nos períodos de outono e inverno (Figura 30). Em relação às idades, aos 3 e 5 anos o IAF demonstrou um desvio padrão maior (0,85 e 0,78 para clone, respectivamente, e 0,42 e 0,36 para semente, respectivamente), enquanto aos 7 anos tende a estabilizar-se (desvio padrão = 0,10) em todas as estações, tanto em plantios clonais como para semente.

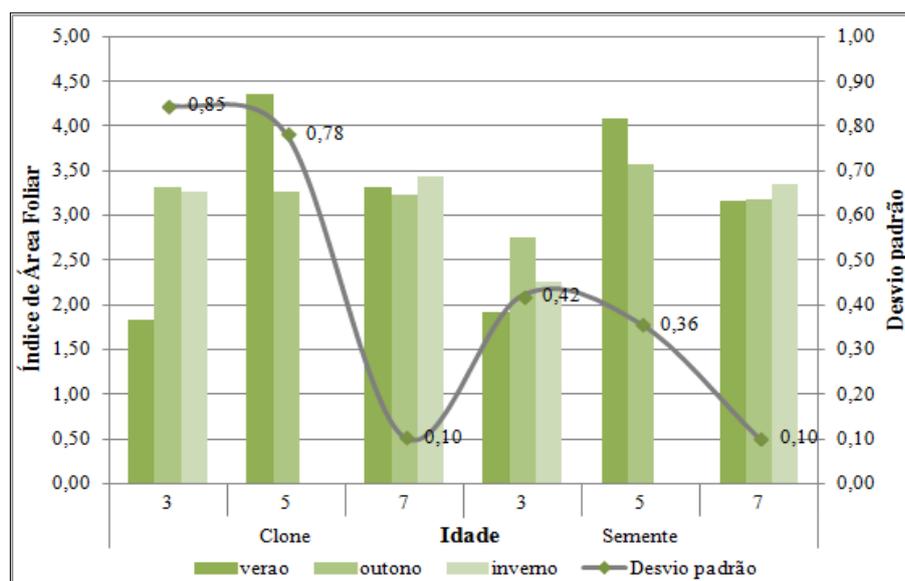


Figura 30 - Dados de IAF correspondentes aos períodos de verão, outono, inverno e o respectivo desvio padrão, para os plantios de eucalipto clonais e de semente em diferentes idades.

Este resultado, demonstrando a estabilidade do IAF aos 7 anos, pode estar vinculada a estabilidade no crescimento da planta, ratificando a afirmação de Xavier et al. (2002), que estimam o período de corte aos 7 anos. Por fim, se destaca a importância de quantificar o IAF em plantios arbóreos para observar sua variação ao longo do ciclo produtivo, sendo que esta quantificação possibilita sua utilização como variável de entrada em modelos de crescimento (Xavier et al., 2002).

## 5.2 Dados dendrométricos

Em relação aos dados de diâmetro à altura do peito e altura para os plantios de clone e semente, pode ser observada na Figura 31 a dispersão dos dados nas três idades estudadas.

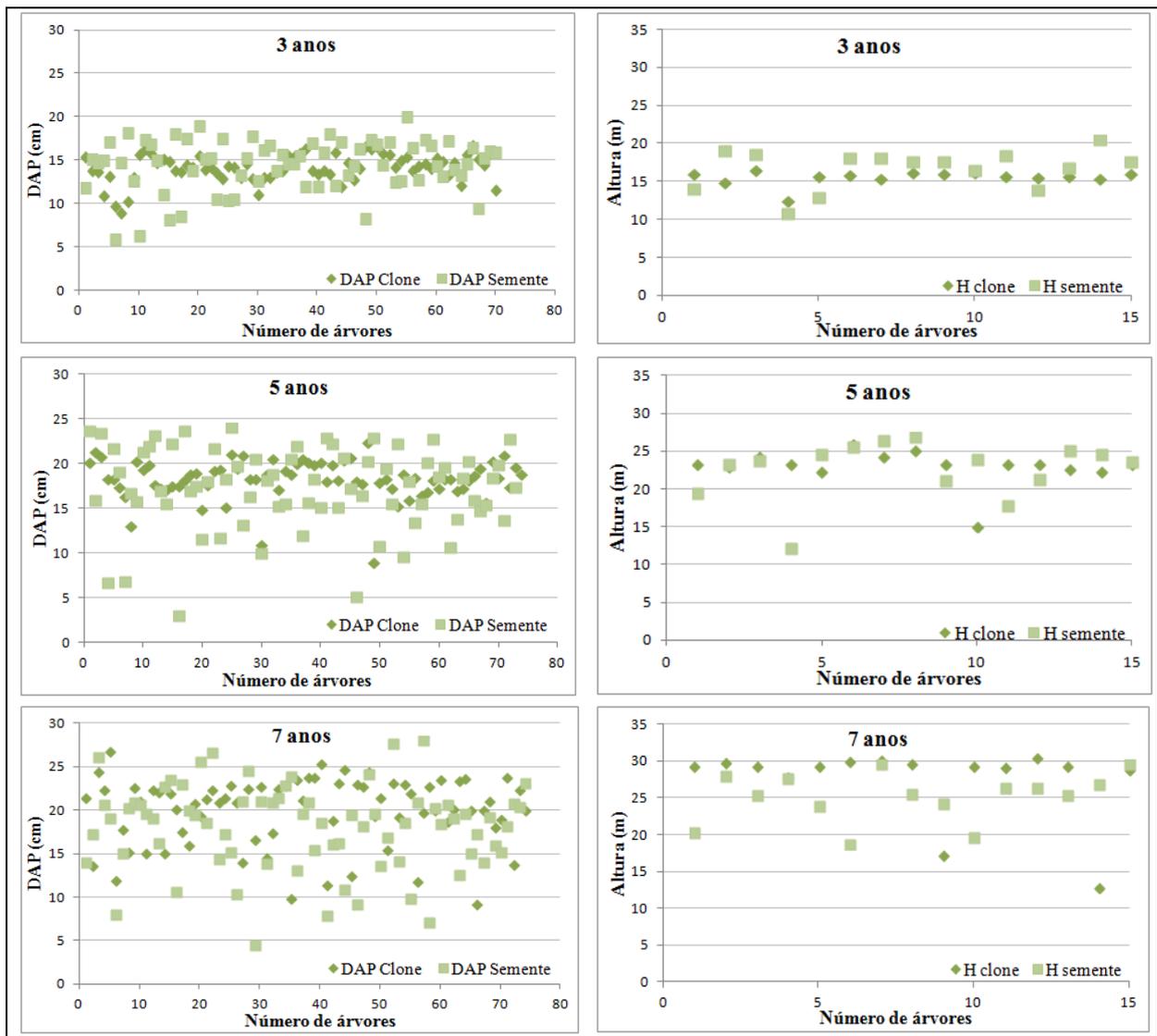


Figura 31 - Dispersão dos dados de DAP (cm) e Altura (m) de acordo com o número de amostras nos talhões de eucalipto (clonais e por semente) com 3, 5 e 7 anos de idade.

O DAP dos plantios clonais de 3 e 5 anos mostrou um padrão bem próximo em todas as amostras, diferente do que ocorre aos 7 anos. Em relação ao DAP dos plantios por semente, os dados apresentaram variabilidade crescente, aumentando a distância entre os valores obtidos conforme o acréscimo da idade, sendo que aos 7 anos não apresenta padrão de

comportamento específico. O comportamento geral da dispersão de DAP foi a característica homogênea aos 3 anos, uma fase de transição aos 5 anos e heterogeneidade aos 7 anos.

Os dados de altura seguem a mesma tendência apresentada pelos dados de DAP, no entanto, apresentam-se pouco heterogêneos e com a presença de valores *outliers*. Da mesma forma que ocorre com o DAP, os valores das amostras de H coletadas em plantios por semente mostraram maior variabilidade se comparado aos valores das amostras em plantios clonais.

O aumento do DAP e da H com a idade mostra um crescimento normal dos plantios de eucalipto. Confirmando esta observação, Protásio et al. (2014) em estudo com eucaliptos clonais também observou aumento do diâmetro a altura do peito e da altura total das árvores com a idade, característica que indica um aumento da produtividade de biomassa com a maturidade das árvores.

A variação dos dados observados na Figura 31 pode ser constatada nos Quadros 10 e 11, que mostram as médias, o desvio padrão e o coeficiente de variação do DAP e H. O DAP (Quadro 10) mostra aumento gradual da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação em ambos os plantios, com o avanço da idade. Observa-se diferença em relação a média de DAP aos 7 anos, que é maior (19,85) para o plantio clonal.

Quadro 10 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação em plantios de eucalipto clonais e por semente para os dados de DAP.

<b>DAP</b>			
<b>Clone</b>	<b>3 anos</b>	<b>5 anos</b>	<b>7 anos</b>
Média (cm)	14,12	18,25	19,85
Desvio padrão	1,62	2,18	3,98
Coeficiente variação (%)	11,50	11,96	20,03
<b>Semente</b>			
Média (cm)	14,52	17,27	18,04
Desvio padrão	3,01	4,65	4,96
Coeficiente variação (%)	20,73	26,91	27,48

Os dados correspondentes a H (Quadro 11) mostraram diferenças mais abruptas em relação ao DAP, possivelmente influenciados pelos *outliers* que foram identificados na dispersão dos dados (Figura 31). A média seguiu o mesmo padrão do DAP, aumentando gradualmente tanto em plantios clonais como para semente. Em relação ao desvio padrão, este se apresentou menor para os plantios clonais aos 3 e 5 anos, enquanto aos 7 anos foi maior (5,17) comparado a semente. Referente ao coeficiente de variação, no plantio clonal ocorreu

aumento da variabilidade de acordo com a idade, enquanto no plantio por semente, há aumento até o quinto ano e decresce aos 7 anos.

Quadro 11 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação em plantios de eucalipto clonais e por semente para os dados de H.

<b>H</b>			
<b>Clone</b>	<b>3 anos</b>	<b>5 anos</b>	<b>7 anos</b>
Média (cm)	15,65	23,04	27,63
Desvio padrão	0,93	2,40	5,17
Coeficiente variação (%)	5,92	10,42	18,70
<b>Semente</b>			
Média (cm)	16,75	22,61	25,31
Desvio padrão	2,65	3,84	3,35
Coeficiente variação (%)	15,80	16,98	13,22

A diferença em relação a média dos valores de diâmetro à altura do peito e altura total (Quadros 10 e 11), nos plantios clonais e por semente, pode ser comparada ao estudo de diferença entre clones demonstrada por Protásio et al. (2014). Este autor comenta que essas duas características das árvores (DAP e H) são fundamentais para a determinação do volume de madeira, conseqüentemente influenciando na produtividade das espécies de eucalipto. Assim, neste trabalho, pode-se considerar que os plantios clonais tendem a apresentar melhor desempenho em produtividade de volume de madeira, considerando estas variáveis.

As relações quadráticas entre DAP e H nos plantios de eucalipto são mostradas na Figura 32. De acordo com os gráficos, as relações evidenciaram uma aproximação linear entre esses dados conforme o avanço da idade, sendo que os plantios clonais são responsáveis pelas maiores correlações aos 5 e 7 anos (0,85 e 0,99, respectivamente), ao contrário do que ocorre aos 3 anos de idade, onde a maior correlação (0,47) encontrada foi no plantio por semente.

Este comportamento demonstra que com o avanço da idade, as árvores de plantios clonais se tornam muito semelhantes, enquanto os plantios por semente ainda mostram variabilidade (Figura 33). Esta afirmação encontra-se de acordo com Xavier et al. (2009), quando comenta que as plantas derivadas de um clone, por apresentar um antecessor comum, são geneticamente idênticas. Essa característica possibilita a uniformidade dos plantios, maior controle da qualidade dos produtos, maximização do ganho em produtividade e qualidade da madeira, controle de doenças e rotações economicamente viáveis.

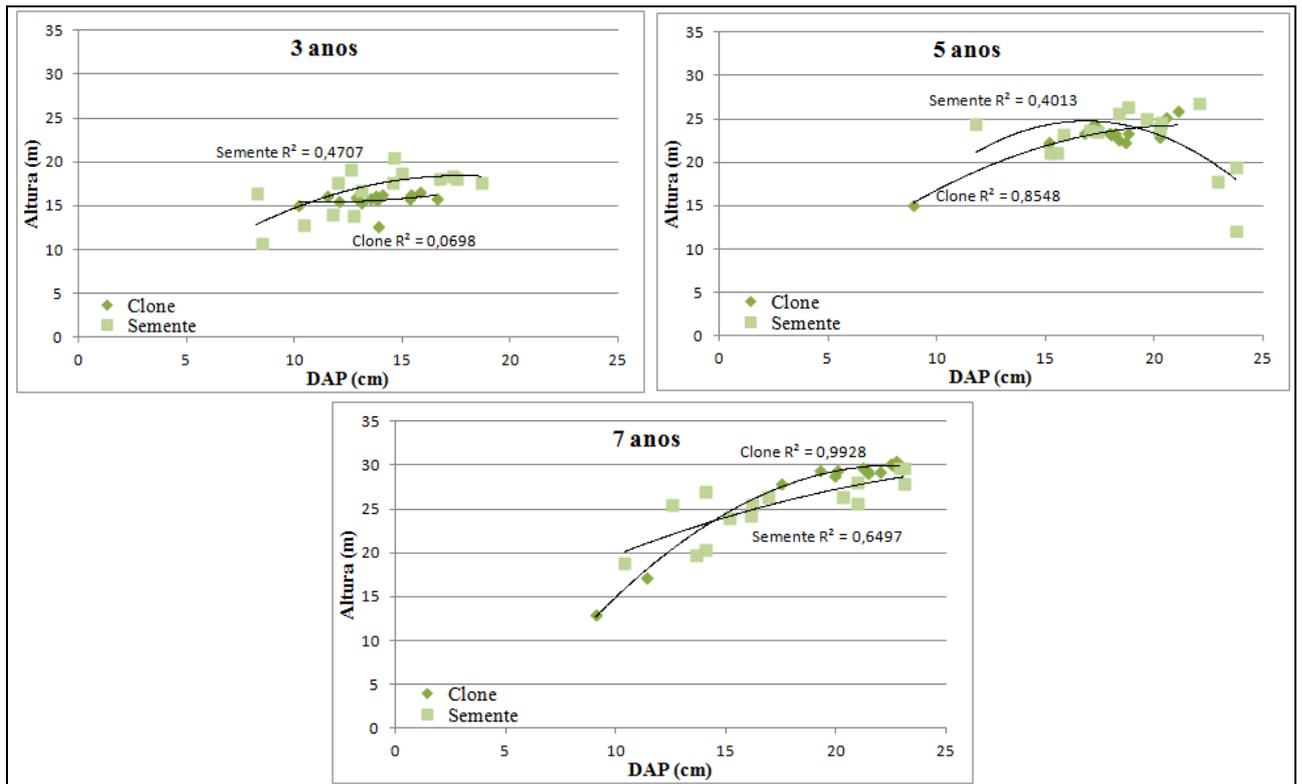


Figura 32 - Relação entre DAP (cm) e Altura (m) correspondente aos plantios de eucalipto (clone e semente) nos três anos estudados.

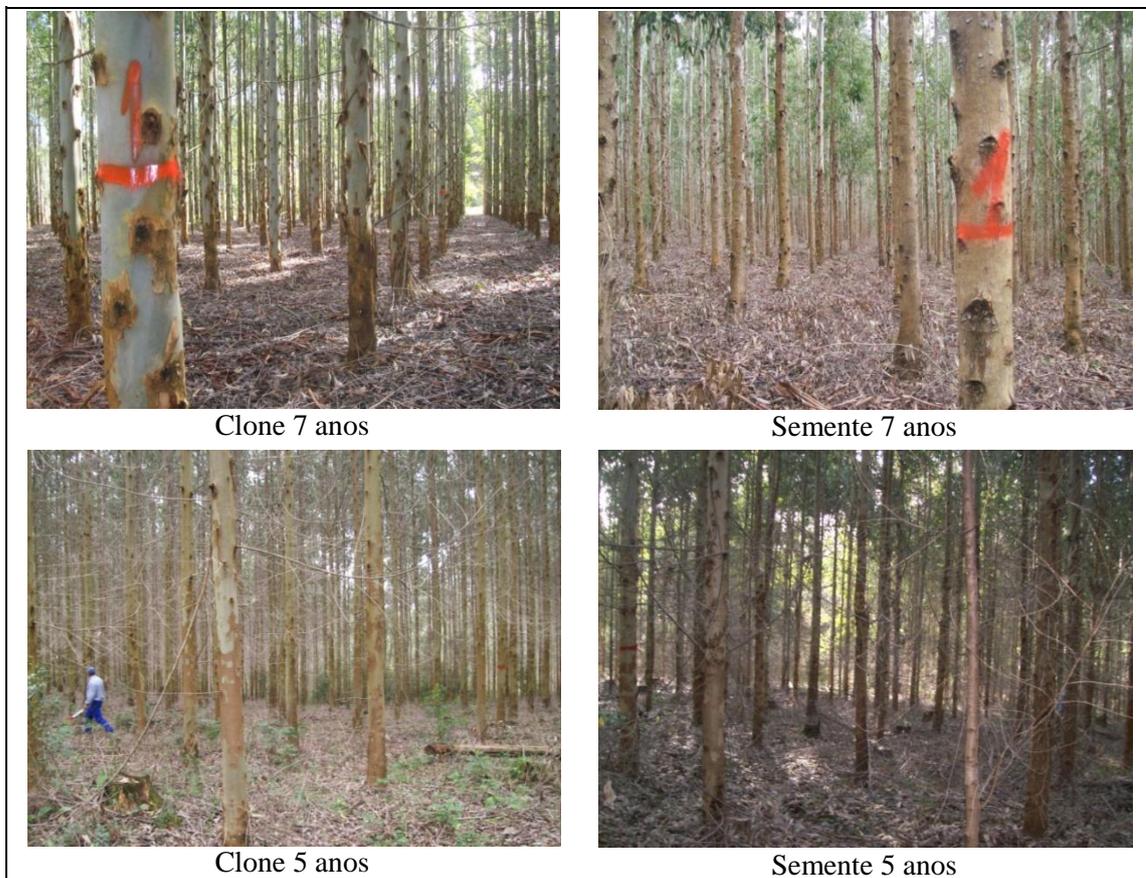




Figura 33 - Povoamentos de eucalipto com diferentes tipos de propagação (clonal e semente) e idade (3, 5 e 7 anos).

### 5.3 Biomassa estimada

A alocação de biomassa em plantios arbóreos é importante para o entendimento dos processos de ciclagem de nutrientes, e essencial para definições das estratégias de manejo, como aplicação de fertilizantes e a intervenção por meio de desbaste (SANTANA et al., 2008). Neste estudo, foram aplicadas equações alométricas baseadas em três trabalhos, um deles considerando a biomassa acima do solo, porém para florestas tropicais (CHAVE et al. (2005)) e outros dois que consideram a biomassa do fuste em eucalipto (SILVA et al. (2004) e MELLO; GONÇALVES (2008)). Os dados apresentados no Quadro 12 mostram a diferença entre as equações.

Quadro 12 - Biomassa estimada através de equações alométricas em plantios clonais e por semente, em diferentes idades.

Biomassa estimada (tonelada/hectare - t/ha)						
Idade	Chave et al. (2005) <sup>1</sup>		Silva et al. (2004) <sup>2</sup>		Mello e Gonçalves (2008) <sup>3</sup>	
	Clone	Semente	Clone	Semente	Clone	Semente
3 anos	136,15	184,95	38,76	53,86	56,56	77,26
5 anos	334,90	352,98	112,23	115,56	145,49	152,11
7 anos	475,14	430,90	169,66	146,27	209,73	187,31

<sup>1</sup>Total de biomassa acima do solo - equação gerada para florestas tropicais;

<sup>2,3</sup>Total de biomassa do fuste - equações geradas para plantios de eucalipto.

Os resultados da equação desenvolvida por Chave et al. (2005) apresentaram os maiores valores (mínimo de 136,15 e máximo de 475,14), bastante superiores aos demais (mínimo de 38,76 e máximo de 209,73). Esta diferença pode estar implícita no tipo florestal

(floresta tropical) para qual foi gerada a equação, além do acréscimo em relação aos demais componentes da biomassa acima do solo, e não somente do fuste.

Em relação às equações que estimaram a biomassa do fuste em eucalipto, os valores encontrados para este estudo considerando a equação alométrica de Silva et al. (2004) foram os mais baixos (Quadro 12), se comparado aos valores gerados pela equação de Mello e Gonçalves (2008). Porém, ambos os valores se assemelham aos dados encontrados por Schumacher e Caldeira (2001), que encontraram 83,2 t/ha de biomassa total acima do solo em povoamento de *Eucalyptus globulus* aos 4 anos de idade, sendo que somente o componente madeira do tronco apresentou 57,5 t/ha, valor bastante próximo do encontrado neste estudo para biomassa do fuste em eucalipto clonal de 3 anos de idade (56,56 t/ha) utilizando a equação proposta por Mello e Gonçalves (2008).

Ainda de acordo com Schumacher e Caldeira (2001), o padrão de crescimento de um plantio arbóreo, na fase juvenil, apresenta tendência a utilizar os nutrientes para a formação da copa, concentrando maior biomassa nesse compartimento. À medida que o plantio se desenvolve, ocorre o aumento da biomassa no tronco e a diminuição nas folhas. Esta constatação pode explicar o aumento na biomassa no fuste aos 5 e 7 anos, em relação aos 3 anos, observado nos valores de biomassa estimada das equações de Silva et al. (2004) e Mello e Gonçalves (2008).

Outros trabalhos também discutem biomassa para eucalipto, como Vieira et al. (2012), que encontraram 18,5 t/ha de biomassa acima do solo para eucalipto com 1,5 anos de idade na Serra do Sudeste/RS. Santana et al. (1999), apresentaram em plantios de eucalipto *grandis* e eucalipto *saligna* aos 6,5 anos de idade, biomassa do tronco com valores entre 93 t/ha (mínimo) e 182 t/ha (máximo), estimadas para diferentes locais no Estado de São Paulo.

Santana et al. (2008) estudaram diversos plantios de eucalipto em diferentes partes do Brasil, conduzido em povoamentos de seis meses a onze anos de idade, encontrando para a Depressão Central do RS, biomassa média observada de 157 t/ha e estimada de 148 t/ha, dados bem próximos aos estimados neste estudo de acordo com as equações de Mello e Gonçalves (2008) aos 5 anos e de Silva et al. (2004) aos 7 anos de idade. Ainda, Santana et al. (2008) reforçam que a biomassa estimada apresentou bastante variação entre as regiões (diferença entre a maior e menor produtividade foi de 146 t/ha), destacando que a menor produtividade estava relacionada aos locais com menor disponibilidade de água.

As diferenças encontradas na biomassa estimada neste estudo, podem estar relacionadas as considerações de Silva et al. (2004), que comentam sobre a dependência da alocação de biomassa em relação a diferença existente entre espécies e seus compartimentos.

Ainda, Caldeira et al. (2001) explicam que a produção de biomassa em um povoamento florestal é função de vários fatores, incluindo a espécie, a idade e as condições edafoclimáticas.

Em síntese, os resultados apresentados pelas três equações utilizadas neste estudo, demonstraram que as melhores estimativas para os povoamentos de eucalipto em geral, considerando a parte comercial da madeira, são os valores de biomassa estimada apresentados pelas equações de Silva et al. (2004) e Mello e Gonçalves (2008), referindo-se a biomassa em eucalipto e retornando valores semelhantes a outros trabalhos encontrados na literatura.

## CAPÍTULO VI

### 6 MODELOS DE PREDIÇÃO DE BIOMASSA

Muitos autores destacam a utilização de modelos alométricos para estimativa de parâmetros ou variáveis referentes à vegetação (HIGUCHI et al., 1998; XAVIER et al., 2002; SILVA et al., 2004). Neste estudo, com o propósito de avaliar modelos preditores de biomassa acima do solo para plantios de eucalipto, foram utilizados dados MODIS e dados de campo coletados em datas próximas, gerando correlações que possam determinar o nível de biomassa.

Das 42 correlações que foram testadas (Apêndice A) com 95% de confiança ( $\alpha = 0,05$ ), apenas uma (Figura 34) apresentou significância estatística:  $IAF_{Jan} \times DAP$  ( $r^2 = 0,71$ ). Entre as correlações que não exibiram significância, algumas apenas mostraram tendência linear entre as variáveis, enquanto outras não apresentaram nenhuma dependência entre x e y.

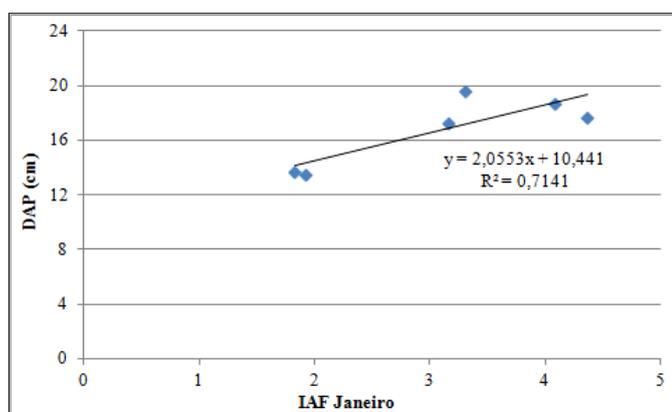


Figura 34 - Correlação entre DAP (cm) e IAF Janeiro, com nível de significância  $\alpha = 0,05$ .

Para Sousa e Ponzoni (1998), os dados dendrométricos caracterizam os plantios florestais quanto ao grau de desenvolvimento, sendo suas inter-relações bastante conhecidas. Neste estudo comprovou-se a significância do DAP em relação ao índice de área foliar, confirmando a importância desses dados nos estudos florestais. Os mesmos autores ainda destacam a correspondência do IAF às variáveis dendrométricas, referente a possibilidade do uso deste dado para a obtenção de dados dendrométricos.

Huemrich et al. (2005), comparando dados NDVI MODIS e medições de IAF em campo, coletadas em área florestal na África, durante o período de composição dos dados de

NDVI (16 dias), mostrou boas correlações ( $r^2 = 0,90$ ), contrariando o resultado observado neste estudo, onde o IAF medido em campo não apresentou associação linear significativa (com 95% de confiança) quando comparado com os dados MODIS.

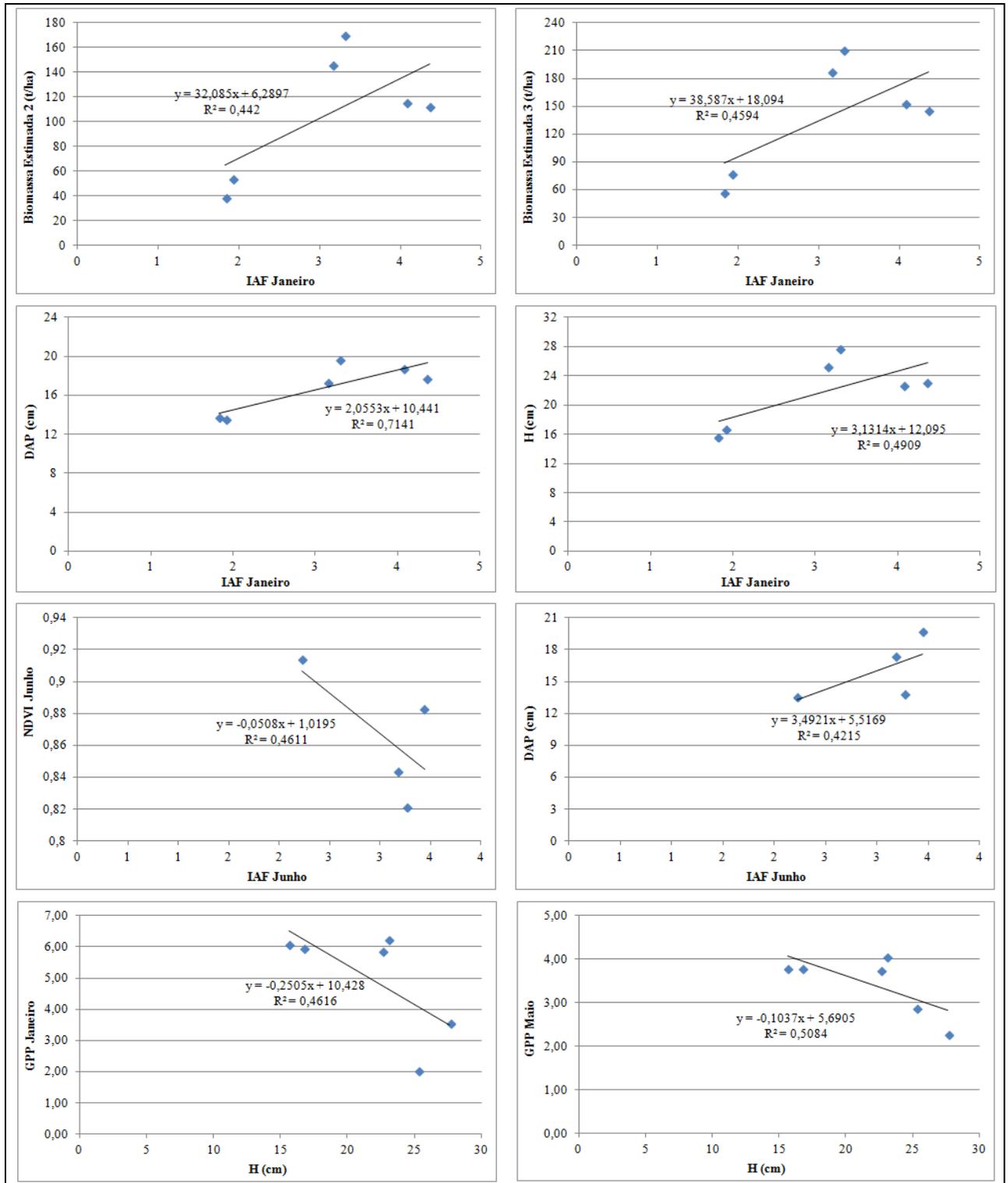
No entanto, a partir da diminuição da confiança estatística para 80% ( $\alpha = 0,20$ ), as correlações com o IAF apresentam melhores tendências lineares entre os dados (Figura 35), como: IAF<sub>Jan</sub> x H ( $r^2 = 0,49$ ), IAF<sub>Jan</sub> x DAP ( $r^2 = 0,71$ ) e IAF<sub>Jan</sub> x biomassa estimada 2 (SILVA et al., 2004) ( $r^2 = 0,44$ ) e 3 (MELLO; GONÇALVES, 2008) ( $r^2 = 0,45$ ), IAF<sub>Jun</sub> x DAP ( $r^2 = 0,42$ ) e IAF<sub>Jun</sub> x NDVI<sub>Jun</sub> ( $r^2 = 0,46$  - tendência negativa). Além do IAF, a H também apresentou tendência (porém negativa) com os dados de GPP<sub>Jan</sub> ( $r^2 = 0,46$ ) e GPP<sub>Mai</sub> ( $r^2 = 0,50$ ).

Avaliando as relações que apresentaram tendências de aproximação entre os dados, destaca-se a correlação entre IAF<sub>Jun</sub> x NDVI<sub>Jun</sub> ( $r^2 = 0,46$  - tendência negativa), com correlação bastante inferior ao dado apresentado por Huemmrich et al. (2005) ( $r^2 = 0,90$ ) em área florestal na África. Gamon et al. (1995), avaliando espécies arbóreas na Califórnia, concluíram que o NDVI é sensível as diferenças de cobertura em dosséis esparsos, diminuindo essa sensibilidade em dosséis moderados e densos em função de saturação. Esta afirmação pode justificar a pouca relação entre os dados de campo, medidos em povoamentos de eucalipto, com o NDVI, devido a saturação que ocorre em dosséis densos.

Em geral, os índices espectrais, com exceção do GPP, apresentaram pouca ou nenhuma correlação com a biomassa estimada por meio de equações alométricas e com os dados de campo. Este resultado pode ter sido influenciado, principalmente, pelo pequeno número de amostras com dados de satélite, além da resolução espacial do sensor MODIS (250 metros para NDVI e EVI), características do solo, baixa sensibilidade dos índices e estágio dos plantios. Com base nesta observação, Cassol (2013) concluiu que não necessariamente o sensor com mais alta resolução espacial retornará o melhor resultado estatístico. Em seu trabalho obteve melhores estimativas de variáveis biofísicas com 30 e não 15 metros de resolução espacial, ressaltando que se deve considerar também a escala de observação do fenômeno.

Tendo em vista os resultados obtidos nas correlações e observando as equações alométricas utilizadas para a obtenção da biomassa estimada, pode-se considerar que os melhores modelos apresentados se referem às equações de regressão entre biomassa estimada 2 e 3 (para eucalipto) correlacionadas com IAF. Destacando a utilização do IAF, Price e Bausch (1995), comentam que este índice é um atributo físico do dossel que pode contribuir na estimativa de variáveis radiométricas, uma vez que a maior parte da cobertura da vegetação

é dominada pelas folhas, que contém clorofila, a qual é a entrada para a produção de energia das plantas.



\* Biomassa estimada 2 - Silva et al. (2004); Biomassa estimada 3 - Mello e Gonçalves (2008).

Figura 35 - Correlações entre os dados MODIS e de campo, com nível de significância  $\alpha = 0,20$ .

Contrastando com este estudo, em relação a baixa eficiência do sensoriamento remoto na estimativa de biomassa, Maire et al. (2011a) mostraram que a utilização de séries temporais NDVI no acompanhamento de um povoamento de eucalipto retornou estimativas adequadas do volume e altura da vegetação e concluíram que o modelo resultante pode ser um método econômico e preciso para o mapeamento e acompanhamento da biomassa de eucalipto em grandes escalas. Estas conclusões mostram que é possível o desenvolvimento de novas hipóteses para trabalhos futuros, considerando povoamentos com idades diferentes das utilizadas neste estudo, o volume da madeira, bem como a utilização de outros produtos de sensoriamento remoto, como bandas espectrais isoladas, com melhor resolução espacial e espectral.

## CONCLUSÕES

---

As conclusões desta tese estão estruturadas de acordo com os objetivos propostos e as considerações acerca de trabalhos futuros ou possíveis investigações em relação ao tema silvicultura e sensoriamento remoto. A proposta inicial de avaliar modelos para estimativa de biomassa, considerando dados de campo e de sensoriamento remoto, vinculou-se a diferentes eixos de estudo.

Primeiramente, a análise da evolução da silvicultura na área de estudo, demonstrou o potencial das imagens Landsat 5 TM para avaliação dos locais que foram e estão sendo alterados em plantios arbóreos no sudeste do RS, considerando o período de 25 anos. A resolução espacial (30 metros) da imagem permitiu a interpretação visual das áreas de silvicultura, porém, não é totalmente apropriada para a diferenciação das espécies vegetais (como eucalipto, acácia-negra e pinus) na área de estudo. Esta dificuldade vincula-se também ao sombreamento do relevo e a resolução espectral.

Na segunda etapa da tese, foi realizada a comparação temporal de índices espectrais MODIS. Esta avaliação permitiu a identificação do comportamento espectral da vegetação de eucalipto a partir da época de plantio, seguido do crescimento da vegetação e o período de corte. O NDVI e o EVI não apresentaram comportamentos sazonais muito destacados, diferentemente do GPP, que mostrou claramente a diferença entre a fase de inverno e verão nos povoamentos de eucalipto. Estes resultados mostraram a capacidade da utilização do MODIS, principalmente para avaliar as fases de plantio. Considerando os dados MODIS comparados aos dados de precipitação, não se podem definir comportamentos específicos, uma vez que não há relação visível entre os dados.

Em relação a estimativa de biomassa acima do solo a partir de equações alométricas definidas com dados de campo, os resultados se mostraram satisfatórios para cumprir este objetivo. Com ênfase nas equações que foram utilizadas, destaca-se a aplicação das equações desenvolvidas por Silva et al. (2004) e por Mello e Gonçalves (2008), que retornaram valores apropriados para os plantios arbóreos de eucalipto. Nesse sentido, demonstra-se a aplicabilidade desta metodologia para estimar biomassa a partir de dados coletados em campo, como o DAP e a H.

As análises de correlação para avaliação de modelos de estimativa de biomassa em povoamentos de eucalipto mostraram que, mesmo com pequenos coeficientes de

determinação, o IAF pode ser considerado um dado importante na análise de biomassa. Em relação aos dados espectrais, não houve influência sobre a biomassa estimada neste estudo, considerando que outros fatores podem ter contribuído para estes resultados, como características do solo, baixa sensibilidade dos índices e estágio dos plantios.

Neste contexto, considera-se que a utilização conjunta de diferentes dados, tanto coletados em campo como dados remotos, podem contribuir significativamente para estudos de plantios arbóreos, podendo ser utilizados também para a diferenciação de povoamentos clonais e por semente. No entanto, sabe-se que muitos questionamentos ainda estão sem respostas, principalmente em relação às especificidades do eucalipto (espécie, espaçamento, estágio dos plantios, fertilização e local de plantio), entre outras, que podem alterar a resposta da vegetação. Contudo, considera-se que o objetivo geral desta tese foi cumprido, alcançando resultados que serão benéficos e importantes para o gerenciamento, planejamento e desenvolvimento de ações no setor florestal.

Assim, sugere-se para estudos futuros, a avaliação e aplicação de outras metodologias, como utilização de sensores com melhor resolução espacial e espectral (relacionando bandas espectrais e não somente índices), coleta de dados de campo e de satélite com uma amostragem maior para a validação dos dados e ainda, a aplicação de outras técnicas estatísticas que podem gerar melhores resultados.

## REFERÊNCIAS

---

- ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF 2012: Ano base 2011**. Brasília: 2012. 150p.
- AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. 4 ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2007. 144 p.
- ALBA, J. M. F., et al. Silvicultura no contexto agrícola e social. In: FLORES, C. A., et al. **Zoneamento agroclimático do eucalipto para o Estado do Rio Grande do Sul e edafoclimático na região do Corede Sul – RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009. 87 p.
- ALVARES, C. A. et. al. Caracterização da dinâmica dos índices de vegetação NDVI e EVI em plantações de Pinus do Brasil. **Anais...** XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, 2013. p. 2866-2873.
- ALVES, D. S. et al. Biomass of primary and secondary vegetation in Rondônia, Western Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, n. 3, 1997. p. 451-461.
- ANDERSON, L. O. et al. **Sensor MODIS: uma abordagem geral**. São José dos Campos: INPE, 2003. 54 p.
- ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Monitoramento da cobertura terrestre: fenologia e alterações antrópicas. In: B. F. T. RUDORFF; Y. E. SHIMABUKURO; J. C. CEBALLOS. (Org.). **Sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2007. p. 185-206.
- ANESI, S. A. O “Nó” do Eucalipto: A sustentabilidade da silvicultura na Metade Sul. In: I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico, Taubaté, 2007. I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba Do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico, **Anais...** 2007. p. 351-358.
- BAJRACHARYA, S. **Community Carbon Forestry: Remote Sensing of Forest Carbon and Forest Degradation in Nepal**. Thesis (Master of Science) International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Netherlands, 2008. 92 p.
- BAKER, E. et al. **Manual de monitoramento do ciclo de carbono da floresta amazônica: Cálculo de biomassa de caules e ramos protocolo RAINFOR**. 2011. Disponível em <[rainfor.org/upload/manualspor/biomass\\_calculations\\_rainfor\\_manual\\_2011\\_port.pdf](http://rainfor.org/upload/manualspor/biomass_calculations_rainfor_manual_2011_port.pdf)>. Acesso em 14 de junho de 2014.
- BARCELOS, M. **Atores, interações e escolhas: a política de silvicultura na área ambiental no Rio Grande do Sul - 2004/2009**. 2010. 179 f. Dissertação (Mestrado em Sociologia). Porto alegre, 2010.
- BARICHELLO, L. R., et al. Quantificação da biomassa de um povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild. na região sul do Brasil. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 2, 2005. p. 129-135.

BEHLING, H. et al. Dinâmica dos campos no sul do Brasil durante o Quaternário Tardio. In: PILLAR, V. P. (Org.). **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. Cap. 1, p. 13-25.

BINKOWSKI, P. **Conflitos ambientais e significados sociais em torno da expansão da silvicultura de eucalipto na "Metade Sul" do Rio Grande do Sul**. 2009. 212 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Rural) - UFRGS, Porto Alegre, 2009.

BOLDRINI, I. I. A flora dos campos do Rio Grande do Sul. In: PILLAR, V. P. (Org.). **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. Cap. 4, p. 63-77.

BOX, E. O., et al. Accuracy of the AVHRR Vegetation Index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO<sub>2</sub> flux. **Vegetatio**, v. 80, 1989. p. 71-89.

BRDE - Banco Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul. **Florestamento na região sul do Brasil: uma análise econômica**. Diretoria de Planejamento, 2003. 51 p.

BRIZUELA, A. B.; MILERA, S. G. Actualización de la superficie forestada en cuatro Departamentos de la Provincia de Entre Ríos. **Revista Científica Agropecuaria**, v. 7, n. 1, Facultad de Ciencias Agropecuarias – UNER, 2003. p. 45-50.

BROWN, S., et al. Biomass Estimation Methods for Tropical Forests with Applications to Forest Inventory Data. **Forest Science**, v. 35, n. 4, 1989. p. 881-902.

CALDEIRA, M. V. W., et al. Acúmulo de biomassa aérea em um povoamento de *Acacia mearnsii*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 42, 2001. p. 95-104.

CAMARA, G., et al. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403. 1996.

CANAVESI, V., et al. Análise espaço-temporal dos plantios de *Eucalyptus spp.* no Estado de São Paulo. **Anais... XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba: INPE, 2011. p.2113-2120.

CANTINHO, R. Z. **Avaliação de propriedades biofísicas de dosséis de *Eucalyptus spp.* mediante aplicação de técnicas de sensoriamento remoto**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos: INPE, 2012. 105 p.

CARVALHO JR. et al. Classificação de padrões de savana usando assinaturas temporais NDVI do sensor MODIS no Parque Nacional Chapada dos Veadeiros. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 4, 2008. p. 505-517.

CASSOL, H. L. G. **Estimativa de biomassa e estoque de carbono em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista com uso de dados ópticos de sensores remotos**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: CEPSSRM, 2013. 142 p.

CASSOL, H. L. G.; SALDANHA, D. L.; KUPLICH, T. M. Sensoriamento remoto aplicado na estimativa de biomassa e estoque de carbono florestal. In: SANQUETTA, C.R.; CORTE, A.P.D; RODRIGUES, A.L.; MOGNON, F. (Org.). **Floresta com Araucária: Pesquisas Ecológicas de Longa Duração**. 1 ed. Curitiba: Multi-Graphic, 2014. 296 p.

CHAVE, J., et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, v. 145, 2005. p. 87–99.

CHAVES, R. A. et al. Dinâmica de cobertura de dossel de povoamentos de clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden submetidos a desrama artificial e desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v.31, n.6, 2007. p.989-998.

CHEN, J. M., et al. Leaf area index measurements of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. D24, 1997. p. 29,429-29,443.

CHEN, J. M.; BLACK, T. A. Measuring leaf area index of plant canopies with branch architecture. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 57, 1991. p. 1-12.

CLARK, D. A., et al. Measuring Net Primary Production in Forests: Concepts and Field Methods. **Ecological Applications**, v. 11, v. 2, 2001. p. 356-370.

CORRÊA, A. O. de F. **Percepções dos principais atores envolvidos no zoneamento ambiental na silvicultura do Rio Grande do Sul: uma perspectiva jurídico-institucional**. 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) - UFRGS, Porto Alegre, 2009.

COUTINHO, L. M. O conceito de bioma. **Acta Botânica Brasileira**. v. 20, n. 1, 2006. p. 13-23.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006. 306 p.

FEARNSIDE, P. M.; GUIMARÃES, W. M. Carbon uptake by secondary forests in Brazilian Amazônia. **Forest Ecology and Management**, n. 80, 1996. p. 35-46.

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental. **Sistema de Silvicultura: arquivos digitais**. 2012. Disponível em: <fepam.rs.gov.br/integrador\_silvicultura/SIS\_Logon.asp>. Acesso em: 02 de dezembro de 2012.

FERREIRA, L. G., et al. Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the Large-Scale Biosphere–Atmosphere Experiment in Amazônia (LBA). **Remote Sensing of Environment**, v. 87, 2003. p. 534–550.

FERREIRA, L. G.; HUETE, A. R. Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 10, 2004. p. 1837-1860.

FERREIRA, J. M. A. **Ganhos de produtividade de plantações clonais de *Eucalyptus Urophylla* e suas correlações com variáveis edafoclimáticas e silviculturais**. 2007. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - ESALQ/USP, Piracicaba, 2007.

FIELD, C. B., et al. Global Net Primary Production: Combining Ecology and Remote Sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, 1995. p. 74–88.

FLORENZANO, T. G. Introdução à Geomorfologia. *In*: FLORENZANO, T. G. (org). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008a. p. 11-30.

FLORENZANO, T. G. Sensoriamento Remoto para a Geomorfologia. *In*: FLORENZANO, T. G. (org). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008b. p. 31-71.

FREITAS, R.M. et. al. Virtual laboratory of remote sensing series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, 2011, v. 2, n.1. p. 57-68.

GAMON, J. A., et al. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. **Ecological Applications**, v. 5, n. 1, 1995. p. 28-41.

GATES, D. M. et al. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v. 4, n. 1, 1965.

GLENN, E. P., et al. Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape. **Sensors**, v. 8, 2008. p. 2136-2160.

GRACIOLI, C. R. **Efeitos da silvicultura do eucalipto na dinâmica da vegetação em área de pecuária no Rio Grande do Sul**. 2010. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - UFSM, Santa Maria, 2010.

GUADAGNIN, D. L., et. al. Árvores e arbustos exóticos invasores no Pampa: questões ecológicas, culturais e socioeconômicas de um desafio crescente. *In*: PILLAR, V. P. (Org.). **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. Cap. 24, p 300-316.

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. (orgs). **Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 340p.

HASENACK, H.; WEBER, E. (org.). **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul** - escala 1:50.000. Porto Alegre, UFRGS - Centro de Ecologia. 2010.

HIGA, R. C. V., et al. Características de algumas espécies de eucaliptos. *In*: FLORES, C. A., et al. **Zoneamento agroclimático do eucalipto para o Estado do Rio Grande do Sul e edafoclimático na região do Corede Sul – RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009. 87 p.

HIGUCHI, N., et al. Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia Brasileira. **Acta Amazonica**, v. 28, n. 2, 1998. p. 153-166.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. *In*: Seminário Emissão x Sequestro de CO<sub>2</sub> – Uma Nova

Oportunidade de Negócios para o Brasil, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 125-145.

HOPPE, J. M., et al. Estimativa de biomassa em povoamento de *Platanus x acerifolia* (Aiton) Willd. estabelecido no município de Dom Feliciano, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 4, 2006. p. 463-471.

HUEMMRICH, K. F., et al. Time-series validation of MODIS land biophysical products in a Kalahari woodland, Africa. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 19, 2005. p. 4381-4398.

HUETE, A. Remote Sensing of Soils and Soil Processes. *In*: USTIN, S. **Remote Sensing for Natural Resources Management and Environmental Monitoring**: Manual of Remote Sensing, 3 ed., v. 4, John Wiley & Sons, 2004. p. 03-52.

HUETE, A., et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, 2002. p. 195-213.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico de Uso da Terra. 2 ed. *In*: **Manuais Técnicos em Geociências**, n. 7. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. 91 p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico de Pedologia. 2 ed. *In*: **Manuais Técnicos em Geociências**, n. 4. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316 p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico de Geomorfologia. 2 ed. *In*: **Manuais Técnicos em Geociências**, n. 5. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182 p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Biomas do Brasil**. IBGE: Rio de Janeiro, 2004. Disponível em <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas\\_tematicos/mapas\\_murais/biomas.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/mapas_murais/biomas.pdf)>. Acesso em 30 de outubro de 2012.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Clima do Brasil**. Escala 1:5.000.000. IBGE: Rio de Janeiro, 2002.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura: 1990-2011**. Rio de Janeiro: IBGE. 2011. Disponível em <<sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pevs/default.asp>>. Acesso em 24/01/2013.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Mapa de solos do Brasil (2001)** - Escala 1:5.000.000. Brasília: Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2001. Disponível em: <<mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>.

IBGE. **Censo Agropecuário 1920/2006**: Séries Históricas e Estatísticas. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.

IPCC – Painel Intergovernamental Sobre Mudanças do Clima. **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. Third Assessment Report, 2001. Disponível em <[grida.no/publications/other/ipcc\\_tar/](grida.no/publications/other/ipcc_tar/)>.

IPCC – Painel Intergovernamental Sobre Mudanças do Clima. **Mudança do Clima 2007: A Base das Ciências Físicas – Sumário Para os Formuladores de Políticas**. 2007.

JACQUIN, A., et al. Vegetation cover degradation assessment in Madagascar savanna based on trend analysis of MODIS NDVI time series. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 12S, 2010. p. S3–S10.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução: EPIPHANIO, J. C. N. et al. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598p.

JUSTICE, C. O., et al. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, 1998. p. 1228-1249.

KORN, H., et al. Opções de mitigação e de adaptação a mudança climática: conexões com a biodiversidade e impactos sobre a biodiversidade. *In: Inter-relações entre biodiversidade e mudanças climáticas*. Tradução: Ana Lúcia Lemos de Sá. Brasília: MMA, 2007. p. 79-137.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, v.2, n.1, 2001. p.171-182.

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

LAMBIN, E. F., et al. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. **Global Environmental Change**, n. 11, 2001. p. 261–269.

LATORRE, M. L., et al. Produtos para ecossistemas terrestres – MOD-LAND. *In: B. F. T. Rudorff; Y. E. Shimabukuro; J. C. Ceballos. (Org.). Sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil*. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2007. p. 185-206.

LATORRE, M. L., et al. Sensor MODIS: características gerais e aplicações. **Espaço & Geografia**, v.6, n. 1, 2003. p. 91-121.

LIANG L.; SCHWARTZ M.D. Landscape phenology: an integrative approach to seasonal vegetation dynamics. **Landscape Ecology**, v. 24, n. 4, 2009. p. 465-472.

LONDERO, E. K. **Calibração do modelo 3-PG para Eucalyptus saligna Smith na região de Guaíba, RS**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, 2011. 68 p.

LU, D. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 7, 2006. p. 1297–1328.

MAIRE, G., et al. Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of Eucalyptus plantations. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, 2011b. p. 586–599.

MAIRE, G., et al. MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, 2011a. p. 2613–2625.

MARCHESAN, J., et al. Evolução da cobertura florestal nas Serras do Sudeste, Rio Grande do Sul, entre 1984 e 2011. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, 2012. p. 1751-1760.

MARCHIORI, J. N. C. **Fitogeografia do Rio Grande do Sul**: Campos Sulinos. Porto Alegre: EST, 2004. 110 p.

MARSDEN, C., et al. Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 259, 2010. p. 1741–1753.

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

MENDONÇA, E. S. **Mudanças no uso da terra e o florestamento: um estudo em três municípios do Rio Grande do Sul**. 2009. 153 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) - UFRGS, Porto Alegre, 2009.

MORAN, E. F. Interações Homem-Ambiente em Ecossistemas Florestais: Uma Introdução. In: MORAN, E. F.; OSTROM, E. (orgs). **Ecossistemas Florestais: Interação homem-ambiente**. São Paulo: Ed. Senac, Edusp, 2009. p. 19-40.

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

MUUKKONEN, P.; HEISKANEN, J. Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data: A possibility to verify carbon inventories. **Remote Sensing of Environment**, v. 107, 2007. p. 617–624.

MYNENI, R. B., et al. The Interpretation of Spectral Vegetation Indexes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 2, 1995. p. 481-486.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. **LDCM - Landsat Data Continuity Mission**. 2013. Disponível em <<http://ldcm.gsfc.nasa.gov/index.html>>. Acesso em 21 de março de 2013.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4 ed. São Paulo: Blucher, 2010. 387p.

PARUELO, J. M., et al. Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. **Applied Vegetation Science**, v. 3, 2000. p. 189-195.

PARUELO, J.M.; JOBBÁGY E.G.; SALA O.E. Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. **Ecosystems**, v. 4, n. 7, 2001. p. 683-698.

PEREIRA, M. D. B.; GONTIJO, A. H. F. Utilização de índice de vegetação calculado com dados do Landsat 5 na separação de unidades fitofisiográficas na Serra do Cipó-MG. **Anais... VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 1993.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

PRICE, J. C.; BAUSCH, W. C. Leaf Area Index Estimation from Visible and Near-Infrared Reflectance Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 52, 1995. p. 55-65.

PROJETO BIODIVERSIDADE RS. **Biomass do RS**. Disponível em <biodiversidade.rs.gov.br>. Acesso em 22 de janeiro de 2013.

PROTÁSIO, T. P., et al. Clones comerciais de *Eucalyptus* de diferentes idades para o uso bioenergético da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, 2014. p. 113-127.

RAMBO, B. **A Fisionomia do Rio Grande do Sul**. Universidade do Rio Grande do Sul, 1954. Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, Caderno nº. 31 - Série Documentos Históricas. 39 p.

RATANA, P.; HUETE, A. R.; FERREIRA, L. Analysis of Cerrado Physiognomies and Conversion in the MODIS Seasonal-Temporal Domain. **Earth Interactions**, v. 9, n. 3, 2005. p. 1-22.

RIBEIRO, C. A. D., et al. Correlações entre variáveis climáticas e séries multitemporais EVI em floresta natural e em cultivo agrícola. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 2, 2009. p. 196-204.

ROSSATO, M. S. **Os Climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologias**. Tese (doutorado) em Geografia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2011.

ROY, P. S.; RAVAN, S. A. Biomass estimation using satellite remote sensing data - An investigation on possible approaches for natural forest. **Journal Bioscience**, v. 21, n. 4, 1996. p. 535-561.

RUNNING, S. W., et al. Global Terrestrial Gross and Net Primary Productivity from the Earth Observing System. *In*: SALA, O. E., et al. (orgs). **Methods in Ecosystem Science**. Springer-Verlag: New York, 2000. p. 44-57.

RUNNING, S. W., et al. A Continuous Satellite-Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production. **BioScience**, v. 54, n. 6, 2004. p. 547-560.

RUNNING, S. W., et al. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, n. 17, 1994. p. 3587-3620.

- SAMPAIO, M. H. A. de; BOECKEL, S. R. O setor florestal no Rio Grande do Sul: uma abordagem preliminar. **Indicadores Econômicos FEE**, v. 28, n. 1, p. 201-229, 2000.
- SANTANA, R. C., et al. Biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do Estado de São Paulo. **Scientia Forestalis**, n. 56, 1999. p. 155-169.
- SANTANA, R. C., et al. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 4, 2008. p. 697-706.
- SAUSEN, T. L. **Estoque e dinâmica de carbono em plantios subtropicais de *Eucalyptus Saligna* e mediterrâneos de *Eucalyptus Globulus***. Tese (doutorado) em Botânica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2011.
- SCHUMACHER, M. V., et al. Biomassa em povoamentos de *Eucalyptus* spp. De pequenas propriedades rurais em Vera Cruz, RS. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 1, 2011. p. 17-22.
- SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (*Labillardière*) sub-espécie *maidenii*. **Ciência Florestal**, v. 11, n. 1, 2001. p. 45-53.
- SEMA - SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Zoneamento Ambiental da Silvicultura**: Estrutura, Metodologia e Resultados. Volume I, 2010. 137 p.
- SEMA - SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Zoneamento Ambiental da Silvicultura**: Diretrizes da Silvicultura por Unidade de Paisagem e Bacia Hidrográfica. Volume II, 2010. 300 p.
- SEMA - SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE; UFSM - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. **Inventário Florestal Contínuo do Rio Grande do Sul**. 2001. Disponível em: <w3.ufsm.br/ifcers/frame.htm>. Acesso em 04 de junho de 2013.
- SILLEOS, N. G., et al. Vegetation Indices: Advances Made in Biomass Estimation and Vegetation Monitoring in the Last 30 Years. **Geocarto International**, v. 21, n. 4, 2006. p. 21-28.
- SILVA, H. D., et al. Alocação de biomassa e ajuste de equações para estimativa de biomassa em compartimentos aéreos de *Eucalyptus benthammi*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 49, 2004. p. 83-95.
- SILVA, R. P. **Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM)**. Tese (Doutorado) em Ciências de Florestas Tropicais - INPA/UFAM, Manaus, 2007. 152 p.
- SILVEIRA, P., et al. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, v. 38, n. 1, 2008. p. 185-206.
- SIMS, D. A., et al. On the use of MODIS EVI to assess gross primary productivity of North American ecosystems. **Journal Geophysical Research**, v. 111, 2006.

SINGH, A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n. 6, 1989. p. 989-1003.

SIRTOLI, A. E., et al. Atributos do relevo derivados de Modelo Digital de Elevação e suas relações com solos. **Scientia Agraria**, v. 9, n. 3, 2008. p. 317-329.

SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; GÖRGENS, E. B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 29, n. 005, 2005. p. 711-718.

SOARES, J. V., et al. Histórico e Descrição. *In*: Rudorff, B. F. T.; Shimabukuro, Y. E.; Ceballos, J. C. (Org.). **Sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2007. p. 3-21.

SOUSA, C. L.; PONZONI, F. J. Relação entre índice de área foliar, estimado através de sensoriamento remoto, e parâmetros dendrométricos em floresta implantada de *pinus spp*. **Anais.. IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Santos: INPE, 1998. p. 1549-1560.

SUERTEGARAY, D. M. A.; SILVA, L. A. P. Tchê Pampa: histórias da natureza gaúcha. *In*: PILLAR, V. P. (Org.). **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. Cap. 3, p. 42-59.

SUN, W., et al. Mapping plant functional types from MODIS data using multisource evidential reasoning. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 3, 2008. p. 1010-1024.

TOPODATA. **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. Disponível em <webmapit.com.br/inpe/topodata>. Acesso em 01/12/2012.

TUCKER, C. J.; SELLERS, P. J. Satellite remote sensing of primary production. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, n. 11, 1986. p. 1395-1416.

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul; EMBRAPA - Empresa Brasileira de Agropecuária. **PROBIO: Cobertura Vegetal do Bioma Pampa - Relatório Técnico**. MMA - Ministério do Meio Ambiente, 2007.

VALERIANO, M. de M. Dados Topográficos. *In*: FLORENZANO, T. G. (org). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008a.

VALERIANO, M. de M. **Topodata: guia para utilização de dados Geomorfológicos locais**. São José dos Campos: INPE, 2008b.

VALERIANO, M. de M; ALBUQUERQUE, P. C. G. de. **Topodata: processamento dos dados SRTM**. São José dos Campos: INPE, 2010.

VALLS, J. F. M., et. al. O patrimônio florístico dos Campos: potencialidades de uso e a conservação de seus recursos genéticos. *In*: PILLAR, V. P. (Org.). **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. Cap. 10, p. 139-154.

VEGA, M. L. B. P. de la. **Fitomonitoração e modelagem de fotossíntese em jatobá (*Hymenaea courbaril L.*) com redes neurais artificiais**. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. 188 p.

VIANA, H., et al. Estimation of crown biomass of *Pinus pinaster* stands and shrubland above-ground biomass using forest inventory data, remotely sensed imagery and spatial prediction models. **Ecological Modelling**, v. 226, 2012. p. 22– 35.

VIEIRA, M., et al. Biomassa e nutrientes em povoamento de *Eucalyptus urograndis* na Serra do Sudeste-RS. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, suplemento 1, 2012. p. 2481-2490.

VIEIRA, S.A., et al. Estimation of biomass and carbon stocks: the case of the Atlantic Forest. **Biota Neotropica**, v. 8, n. 2, 2008. p. 21-29.

VIEIRO, A. C.; SILVA, D. R. A. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2010. 250 p.

WANG, J., et al. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 11, 2003. p. 2345–2364.

WATZLAWICK, L. F., et al. Estimativa de biomassa e carbono em plantios de *Pinus taeda* L. utilizando imagens do satélite IKONOS II. **Ciência e Natura**, UFSM, v. 28, n. 1, 2006. p. 45 - 60.

XAVIER, A. C., et al. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 4, 2002. p. 421-427.

XAVIER, A., et al. **Silvicultura Clonal: Princípios e Técnicas**. Viçosa: Ed. UFV, 2009. 272p.

ZHANG, X., et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, 2003. p. 471–475.

ZHENG, G. et al. Combining remote sensing imagery and forest age inventory for biomass mapping. **Journal of Environmental Management**, v. 85, 2007. p. 616–623.

## APÊNDICE A - Quadro de correlações

Correlações		R	R <sup>2</sup>	T calc	T tabelado	T calc	T tabelado
IAF Jan	EVI Jan	-0,24706	0,06104	-0,5099	2,776	-0,5099	1,533
IAF Jan	NDVI Jan	0,194171	0,037702	0,3959	95%	0,3959	80%
IAF Jan	GPP Jan	-0,06307	0,003977	-0,1264		-0,1264	
IAF Jan	Bioest 1	0,680875	0,463591	1,8593		1,8593	
IAF Jan	BioEst. 2	0,664859	0,442038	1,7802		1,7802	
IAF Jan	BioEst. 3	0,677784	0,459391	1,8437		1,8437	
IAF Jan	DAP	0,845027	0,71407	3,1606		3,1606	
IAF Jan	H	0,700614	0,49086	1,9638		1,9638	
IAF Mai	EVI Mai	-0,15824	0,025038	-0,3205		-0,3205	
IAF Mai	NDVI Mai	-0,08952	0,008013	-0,1798		-0,1798	
IAF Mai	GPP Mai	0,014391	0,000207	0,0288		0,0288	
IAF Mai	Bioest 1	0,302571	0,091549	0,6349		0,6349	
IAF Mai	BioEst. 2	0,298049	0,088833	0,6245		0,6245	
IAF Mai	BioEst. 3	0,301909	0,091149	0,6334		0,6334	
IAF Mai	DAP	0,574172	0,329674	1,4026		1,4026	
IAF Mai	H	0,315935	0,099815	0,6660		0,6660	
IAF Jun	EVI Jun	-0,55881	0,312265	-1,3477		-1,3477	
IAF Jun	NDVI Jun	-0,67908	0,461148	-1,8502		-1,8502	
IAF Jun	GPP Jun	-0,05906	0,003488	-0,1183		-0,1183	
IAF Jun	Bioest 1	0,515128	0,265357	1,2020		1,2020	
IAF Jun	BioEst. 2	0,538863	0,290373	1,2794		1,2794	
IAF Jun	BioEst. 3	0,522582	0,273091	1,2259		1,2259	
IAF Jun	DAP	0,649209	0,421472	1,7071		1,7071	
IAF Jun	H	0,555992	0,309127	1,3378		1,3378	
DAP	EVI Jan	-0,31365	0,098379	-0,6606		-0,6606	
DAP	EVI Mai	-0,16626	0,027641	-0,3372		-0,3372	
DAP	EVI Jun	-0,10524	0,011076	-0,2117		-0,2117	
DAP	NDVI Jan	-0,02408	0,00058	-0,0482		-0,0482	
DAP	NDVI Mai	-0,21405	0,045816	-0,4383		-0,4383	
DAP	NDVI Jun	0,316351	0,100078	0,6670		0,6670	
DAP	GPP Jan	-0,4041	0,163293	-0,8835		-0,8835	
DAP	GPP Mai	-0,51262	0,262778	-1,1941		-1,1941	
DAP	GPP Jun	0,353966	0,125292	0,7569		0,7569	
H	EVI Jan	-0,4777	0,228195	-1,0875		-1,0875	
H	EVI Mai	-0,13447	0,018082	-0,2714		-0,2714	
H	EVI Jun	0,124562	0,015516	0,2511		0,2511	
H	NDVI Jan	-0,251	0,062999	-0,5186		-0,5186	
H	NDVI Mai	-0,34564	0,119469	-0,7367		-0,7367	
H	NDVI Jun	0,160719	0,025831	0,3257		0,3257	
H	GPP Jan	-0,67944	0,461644	-1,8520		-1,8520	
H	GPP Mai	-0,71299	0,508359	-2,0337		-2,0337	
H	GPP Jun	0,210288	0,044221	0,4302		0,4302	

Bioest 1 - Biomassa Estimada 1 (corresponde a equação de CHAVE et al., 2005)

Bioest 2 - Biomassa Estimada 2 (corresponde a equação de Silva et al., 2004)

Bioest 3 - Biomassa Estimada 3 (corresponde a equação de Mello; Gonçalves, 2008)

DAP - Diâmetro à Altura do Peito

EVI - Índice de Vegetação Realçado

GPP - Produtividade Primária Bruta

H - Altura

IAF - Índice de Área Foliar

NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

Jan - Janeiro

Mai - Maio

Jun - Junho

T calc - Teste *t* calculado.