



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-12969-TDI/1017

**DESENVOLVIMENTO DE MODELO DA DISPONIBILIDADE DE
FITOMASSA AÉREA PARA FORMAÇÕES CAMPESTRES NATURAIS A
PARTIR DE DADOS ESPECTRAIS ORBITAIS E
AGROMETEOROLÓGICOS**

Eliana Lima da Fonseca

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Antonio Roberto Formaggio e Flávio Jorge Ponzoni, aprovada em
21 de maio de 2004.

INPE
São José dos Campos
2005

528.711.7

FONSECA, E. L.

Desenvolvimento de modelo da disponibilidade de fitomassa aérea para formações campestres naturais a partir de dados espectrais orbitais e agrometeorológicos / E. L. Fonseca. – São José dos Campos: INPE, 2004.

193p. – (INPE-12969-TDI/1017).

1.Campos naturais. 2.Radiação fotossinteticamente ativa.
3.Crescimento vegetal. Landsat 7. 5.Modelos matemáticos.
I.Título.

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

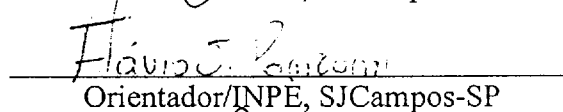
Dr. Yosio Edemir Shimabukuro


Presidente/INPE, SJCampos-SP

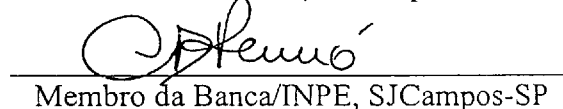
Dr. Antonio Roberto Formaggio


Orientador/INPE, SJCampos-SP

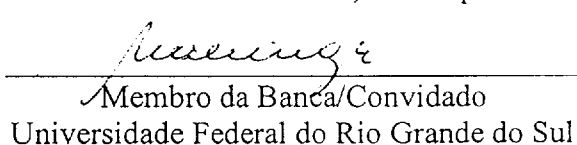
Dr. Flávio Jorge Ponzoni


Orientador/INPE, SJCampos-SP

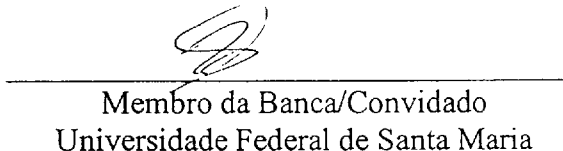
Dr. Camilo Daleles Rennó


Membro da Banca/INPE, SJCampos-SP

Dr. Carlos Nabinger


Membro da Banca/Convidado
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr. Vicente Celestino Pires Silveira


Membro da Banca/Convidado
Universidade Federal de Santa Maria

Aluno(a): Eliana Lima da Fonseca

São José dos Campos, 21 de maio de 2004.

Para
Max Lima da Fonseca,
dedico.

*“Não há absolutamente nada
Que não seja mais fácil com o conhecimento.”*

Shantideva

*“O tempo às vezes é alheio a nossa vontade,
mas só o que é bom dura tempo o bastante pra se tornar inesquecível.”*

Charlie Brown Jr.

AGRADECIMENTOS

Realmente, é impossível agradecer a todas as pessoas que participam das diferentes fases de um trabalho do porte de uma tese de doutorado. Sem o apoio que tive, de diferentes formas e de muitas pessoas, realmente este trabalho não teria sido concluído. A todos, meus sinceros agradecimentos.

Ao meu orientador Flávio Jorge Ponzoni, pelo apoio, pela confiança e pela grande ajuda prestada nos momentos necessários. Ao meu orientador Antônio Roberto Formaggio, pelo apoio e pela confiança depositada.

Ao meu amigo, conterrâneo, colega de profissão, parceiro nestes quatro anos de curso de doutorado, Rodrigo Rizzi, por tudo. Com certeza esta etapa da vida seria bem mais complicada sem a tua valiosa ajuda.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, pelo fornecimento dos subsídios necessários. À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa de pesquisa. À Ford Foundation e ao Fundo Mundial para a Natureza (WWF), pelo apoio na forma de auxílio financeiro. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo financiamento de parte dos trabalhos em campo. Ao professor Carlos Marden, pelo empréstimo da estação meteorológica automática. A chefia geral da Embrapa Tabuleiros Costeiros, pela minha liberação pelo tempo necessário para a conclusão deste trabalho. À Embrapa Pecuária Sul pelo apoio logístico durante os trabalhos em campo. Ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, nas pessoas do Dr. Carlos A. Nobre e Hélio Camargo Júnior, pelo pronto atendimento e pelos dados cedidos.

Aos proprietários das estâncias onde os trabalhos em campo foram conduzidos, Sr. João Luiz Paixão Cortez (Cabanha Chácara), Sr. Nicanor Médice (Estância Redenção), Família Martins da Silva (Estância São José),

bem como à Associação Rural de Bagé, na pessoa do Sr. Joal José Brazzale Leal pela intermediação do contato com os mesmos.

Aos colegas da Embrapa Carlos Reisser Júnior, Eduardo Salomoni, Ana Maria Girardi-Deiro, José Otávio Neto Gonçalves e Valdonir Marinho e ao amigo Vicente Celestino Pires Silveira, professor da Universidade Federal de Santa Maria, pelos dados cedidos e pelo tempo dispendido em viagens e conversas.

Aos professores Luis Mauro Gonçalves Rosa, Carlos Nabinger, Homero Bergamaschi e Denise Cybis Fontana, da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela troca de idéias, fundamental para a composição e para o planejamento deste trabalho. Da mesma forma, aos pesquisadores João Roberto dos Santos, Nelson Jesus Ferreira, Dalton de Morrison Valeriano, Yosio Edemir Shimabukuro e Camilo Daleles Rennó, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Aos amigos nativos do bioma estudado César Henrique Poli, Renata Suñé Martins da Silva, Andréa Mittlelmann, Eduardo Dias Suñé, Cláudia Lima da Fonseca, Alberto Gonçalves da Fonseca, Maria Helena Lima da Fonseca, Cecília da Fonseca Gerzon e Mara Sandra da Fonseca Gerzon por fazerem a diferença em relação aos demais.

Aos verdadeiros amigos que fiz durante estes quatro anos de curso de doutorado Roberto Javier Rivera Lombardi, Fábio Roque da Silva Moreira, Julio César Oliveira, Janaina Santos Maia, Luiz Eduardo de Oliveira e Cruz de Aragão, Enzo D'Arco, Luciana Spinelli e Liana Oighenstein Anderson, não só pela convivência mas principalmente pelas risadas despendidas nos momentos felizes.

Finalmente, à galera de Aracaju (a minha nova cidade) Marcos, Josué, Edinho, Ana, Edna, Miguel, Bosco, Cleusa, Júlinho e Alessander, pela força, pela amizade, pelos ensinamentos, pela paciência e por tudo mais.

RESUMO

Os modelos de produtividade vegetal, relacionando informações espectrais, parâmetros agrometeorológicos e características do dossel, visam inferir sobre as propriedades biofísicas da cobertura vegetal, levando em consideração os fatores que afetam o seu crescimento e desenvolvimento, sem a necessidade de avaliações constantes em campo. Esta integração de dados permite um melhor uso das informações que as imagens de satélite fornecem, em nível espectral, temporal e espacial para o monitoramento quantitativo da vegetação. Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo de estimativa da disponibilidade de fitomassa aérea para formações campestres naturais, integrando dados espectrais orbitais e dados agrometeorológicos em um modelo agrometeorológico-espectral, baseado na hipótese da existência de relações entre a produção de fitomassa e as propriedades espectrais do dossel e nas relações entre o acúmulo de biomassa vegetal e os fatores agrometeorológicos. Com base na análise das relações entre o conjunto de dados espectrais (obtidos a partir das imagens de satélite), a disponibilidade de fitomassa aérea (medida em campo) e as variáveis agrometeorológicas do período de coleta de dados, foi desenvolvido o modelo JONG, um modelo agrometeorológico-espectral para estimativa da produção de fitomassa aérea ou disponibilidade de forragem, que foi parametrizado para uma unidade homogênea do bioma *Campos Sulinos*. A partir do submodelo agrometeorológico foi estimado o crescimento da vegetação utilizando as variáveis agrometeorológicas radiação fotossinteticamente ativa incidente, evapotranspiração potencial e evapotranspiração real. Pelo submodelo espectral foi estimada a condição inicial da vegetação, sendo que as variáveis espectrais que melhor representaram a disponibilidade inicial de forragem foram a reflectância das bandas ETM+7 e ETM+3 e a componente Wetness da transformação Tasseled Cap. As estimativas feitas a partir do modelo desenvolvido foram espacializadas sobre a área de estudos, permitindo visualizar a aplicabilidade e a sensibilidade do modelo JONG em escala local, para diferentes condições climáticas. Foi analisado também a integração dos dados de radiação solar incidente de ondas curtas previstos pelo modelo Eta-CPTec em modelos de estimativa do crescimento vegetal, verificando a possibilidade de utilização destes dados em modelos desta natureza.

DEVELOPMENT RANGE AERIAL BIOMASS AVAILABILITY MODEL USING AGROMETEOROLOGICAL AND SATELLITE SPECTRAL DATA.

ABSTRACT

Models for yield forecast through the integration of spectral information, agrometeorological factors and canopy characteristics are used to infer about biophysical properties of terrestrial vegetation cover, based on knowledge of how ecophysiological factors affect its growth and development, without frequent field measurements. This data integration allows better use of satellite image spectral, temporal and spatial data to monitor quantitative information from vegetation. Based on the hypothesis of existing relationships between canopy spectral properties and aerial biomass variations and also between the vegetative biomass accumulation and agrometeorological factors, the objective of this work was development an agrometeorological-spectral model to estimate aerial biomass of herbaceous vegetation, by integration of agrometeorological data and satellite spectral data. By the analysis of relationships among radiometric data (taken from satellite images), aerial biomass availability (taken by field measurements) and agrometeorological data taken during study period, was developed the JONG model, an agrometeorological-spectral model to estimate aerial biomass production, or forage availability, to *Campos Sulinos* biome. By the agrometeorological submodel was estimated vegetation growth, using incident photosynthetically active radiation, potential evapotranspiration and actual evapotranspiration (agrometeorological variables). By the spectral submodel was estimated initial vegetation conditions, and, ETM+7 and ETM+3 bands reflectance and Wetness component of Tasseled Cap transformation were the best spectral variables for this estimation. Estimates made with development model were calculated for each pixel on study area, in order to verify the applicability and the sensibility of JONG model in a local scale, for different climate conditions. Was analysed also the integration of incident shortwave solar radiation data, estimated by Eta-CPTEC model, on yield forecast models, verifying the possibility of use this type of data on those models.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	27
1.1. Hipótese	29
1.2. Objetivos	29
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1. O Bioma <i>Campos Sulinos</i>	31
2.2. Aspectos Ecofisiológicos do Crescimento e Desenvolvimento da Vegetação	33
2.2.1. Fatores que Afetam a Fotossíntese	34
2.3. Modelos de Produtividade Vegetal	35
2.3.1. Relações entre a Produtividade Vegetal e a Radiação Solar	37
2.3.2. Relações entre a Produtividade Vegetal e a Disponibilidade Hídrica	38
2.4. Sensoriamento Remoto para o Monitoramento da Vegetação	40
2.4.1. Resposta Espectral da Vegetação	42
2.4.1.1. Alterações na Resposta Espectral da Vegetação em Função das Variações Morfo-Fisiológicas de um Dossel	44
2.4.2. Uso dos Índices de Vegetação para Análise das Variações da Biomassa de um Dossel	46
2.4.3. Decomposição dos Valores da Reflectância dos Pixels a partir do Modelo Linear de Mistura Espectral	48
2.5. Processamento de Imagens de Satélite para Estudos .Multitemporais	49
2.5.1. Correção Geométrica	49
2.5.2. Correção Atmosférica	50
2.5.3. Retificação Radiométrica	52
2.6. Modelos Agrometeorológicos-Espectrais	53
CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO DO MODELO AGROMETEOROLÓGICO-ESPECTRAL	57
3.1. Apresentação do Modelo Conceitual: o Modelo JONG	57
CAPÍTULO 4 - ÁREA DE ESTUDO	63

CAPÍTULO 5 - COLETA DE DADOS DA VEGETAÇÃO	67
5.1. Identificação e Mapeamento das Unidades Homogêneas do Bioma <i>Campos Sulinos</i> Presentes na Área de Estudo	67
5.2. Delineamento Experimental e Descrição das Unidades Amostrais	72
5.3. Coleta dos Dados em Campo e Cálculo da Disponibilidade de Forragem	77
CAPÍTULO 6 - CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE DE FITOMASSA AÉREA A PARTIR DO SUB-MODELO AGROMETEOROLÓGICO	81
6.1. Cálculo das Variáveis Agrometeorológicas	81
6.2. Cálculo da Eficiência de Conversão de Radiação Incidente em Biomassa Aérea (ε_{CA})	85
6.3. Estimativa da Disponibilidade de Forragem a partir dos Dados Agrometeorológicos	93
6.4. Dados do Modelo de Previsão Climática Eta	95
CAPÍTULO 7 - CÁLCULO E AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS ESPECTRAIS	103
7.1. Uniformização das Imagens ETM+ Adquiridas em Diferentes Datas	103
7.2. Cálculo das Variáveis Espectrais e Avaliação das Relações com a Disponibilidade de Forragem	109
7.2.1. Bandas Individuais	111
7.2.1.1. Análise de Correlação	112
7.2.1.2. Análise da Variação Temporal do Comportamento Espectral das Unidades Amostrais	116
7.2.1.3. Análise das Relações entre Resposta Espectral das Bandas Individuais e a Disponibilidade de Forragem	119
7.2.2. Índices de Vegetação e Diferença Normalizadas entre as Bandas	123
7.2.3. Transformação Tasseled Cap	127
7.2.4. Cálculo das Imagens Fração a partir do Modelo Linear de Mistura Espectral	131
CAPÍTULO 8 - PARAMETRIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO SUB-MODELO ESPECTRAL	137
8.1. Seleção das Variáveis Espectrais	137
8.2. Integração dos Submodelos Agrometeorológico e Espectral	148
8.3. Avaliação da Espacialização do Modelo JONG	154
CAPÍTULO 9 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	161
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	165

APÊNDICE A - NOME E IDENTIFICAÇÃO (MI) DAS CARTAS TOPOGRÁFICAS DA DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO BRASILEIRO, NA ESCALA 1:50.000 UTILIZADAS PARA A GERAÇÃO DAS CARTAS-IMAGENS	177
APÊNDICE B - PLANILHA PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMÁTICO DA ÁREA DE ESTUDO	179
APÊNDICE C- COMPORTAMENTO ESPECTRAL DAS UNIDADES AMOSTRAIS	181
APÊNDICE D - VALORES DA REFLECTÂNCIA (%) DAS BANDAS INDIVIDUAIS PARA OS MESES DE NOVEMBRO E JANEIRO	187
APÊNDICE E- VALORES DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E DIFERENÇA NORMALIZADAS DAS BANDAS (VALORES ADIMENSIONAIS) PARA OS MESES DE NOVEMBRO E JANEIRO	189
APÊNDICE F- VALORES VARIÁVEIS ORIUNDAS DA TRANSFORMAÇÃO TASSELED CAP (EM NÍVEL DE CINZA), PARA OS MESES DE NOVEMBRO E JANEIRO	191
APÊNDICE G - VALORES VARIÁVEIS OBTIDAS A PARTIR DO MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL (EM PORCENTAGEM) PARA OS MESES DE NOVEMBRO E JANEIRO	193

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
2.1 - Distribuição do bioma <i>Campos Sulinos</i> na Região Sul do Brasil	32
2.2 - Valores médios das frações refletida (reflectância), transmitida (transmitância) e absorvida (absortância) da radiação incidente após interação com uma folha individual em função do comprimento de onda (nm) nos comprimentos de onda do visível e infravermelho próximo	43
2.3 - Variações na reflectância nas porções do visível e infravermelho próximo frente ao aumento da biomassa (IAF) de dosséis de <i>Paspalum notatum</i> , em parcelas experimentais, em campo	45
2.4 - Relação entre matéria seca verde e o NDVI para <i>Paspalum notatum</i> em tratamentos com diferentes doses de nitrogênio	47
3.1 - Representação esquemática do modelo JONG	59
4.1 - Localização geográfica da área de estudo (municípios de Bagé, Aceguá, Candiota e Hulha Negra), em destaque	64
4.2 - Curso anual médio do balanço hídrico climático normal (1961 - 1990) para o Município de Bagé (RS)	65
5.1 - Diferenças na resposta espectral na composição colorida das bandas TM3(B), TM4(R), TM5(G) na imagem adquirida em 2 de setembro de 2000, para as duas diferentes formações campestres (A - Campo Norte, B - Campo Sul) presentes na área de estudo	68
5.2 - Carta temática apresentando as diferentes unidades homogêneas de vegetação e uso existentes na área de estudo	71
5.3 - Curva média de produção de forragem, medida no período entre 1984 a 1988, no município de Bagé (RS). Em destaque o período de maior produção de biomassa aérea da vegetação	73
5.4 - Localização das 15 unidades amostrais e da estação meteorológica automática (*), sobre a imagem ETM+/Landsat, adquirida em outubro de 2002, composição 3B4R5G	75
5.5 - Detalhes da coleta de amostras da disponibilidade de forragem, (A) antes do corte, (B) depois do corte	78
6.1 - Curso diário do balanço hídrico climático para o período de 2 de outubro de 2002 (P1) a 27 de abril de 2003 (P15)	84
6.2 - Variação dos valores da produção média de biomassa do período 1985-88 e dos valores de eficiência de conversão da radiação em biomassa aérea utilizados no modelo JONG	92
6.3 - Dados de radiação fotossinteticamente ativa incidente ($MJ.m^{-2}$) espacializados em 30 metros a partir dos valores pontuais da grade original do modelo Eta-CPTEC (em azul)	98

7.1 - Comportamento espectral da vegetação antes da aplicação da correção atmosférica (reflectância aparente) e após a aplicação do procedimento de correção atmosférica (reflectância de superfície) na imagem adquirida em 6 de janeiro de 2003	104
7.2 - Gráficos de espalhamento das imagens Greenness e Brightness para as quatro datas de coleta de dados. Em vermelho e em verde estão destacados extremos não vegetados da distribuição de pontos	107
7.3 - Posicionamento da unidade amostral 7, na imagem Landsat/ETM+ (composição 3B,4R,5G), mostrando a bordadura uniforme em torno dos limites da unidade amostral.	110
7.4 - Heterogeneidade da resposta espectral da unidade amostral 10, na imagem Landsat/ETM+ (composição 3B,4R,5G), sem contraste (A) e com contraste (B)	111
7.5 - Distribuição dos valores de disponibilidade medidos em campo nas diferentes datas de coleta de dados	114
7.6 - Exemplo das variações na arquitetura e composição florística dos dosséis analisados	116
7.7 - Reflectância espectral da unidade amostral 1, nas diferentes datas de coleta de dados	117
7.8 - Segmentos das imagens das bandas 3, 4, 5 e 7 nas diferentes datas de coleta de dados, ilustrando a variação de brilho dos pixels da unidade amostral 1	118
7.9 - Diagrama de dispersão de pontos da disponibilidade de forragem versus a resposta espectral das bandas 3, 4, 5 e 7	120
7.10 - Histograma de freqüência da distribuição dos valores amostrais da disponibilidade de forragem para os dados coletados nos meses de novembro e janeiro	123
7.11 - Diagrama de dispersão de pontos da disponibilidade de forragem versus o NDVI e versus a diferença normalizada das bandas	126
7.12 - Diagrama de dispersão da disponibilidade de forragem versus os índices de vegetação ajustados para o solo (SAVI)	127
7.13 - Diagrama de dispersão de pontos da disponibilidade de forragem versus a resposta das variáveis espectrais oriundas da transformação Tasseled Cap	130
7.14. Curvas espectrais das feições vegetação solo e sombra utilizadas para o cálculo das imagens fração dos meses de outubro, novembro e janeiro	132
7.15 - Diagrama de dispersão de pontos da disponibilidade de forragem versus as frações vegetação, solo e sombra, calculadas a partir do modelo linear de mistura espectral	133
8.1 - Valores observados de disponibilidade de forragem versus valores estimados a partir das equações ajustadas pelo método <i>Stepwise</i> ...	141
8.2 - Gráficos da distribuição dos resíduos calculados a partir da estimativa obtida pela Equação A ($DF_{10} = 1988,45 - 173,75B7 +$	

91,56B3)	145
8.3 - Gráficos da distribuição dos resíduos calculados a partir da estimativa obtida pela Equação B ($DF_{t0} = 8568,53 - 346,21B7 - 75,85 \text{ Wetness}$)	146
8.4 - Espacialização da estimativa da disponibilidade de forragem feita a partir do modelo agrometeorológico-espectral A, para os períodos P6 e P9	155
8.5 - Espacialização da estimativa da disponibilidade de forragem feita a partir do modelo agrometeorológico-espectral B, para os períodos P6 e P9	156
8.6 - Espacialização do resíduo da estimativa da disponibilidade de forragem feita a partir do modelo agrometeorológico-espectral A, para os períodos P6 e P9	159
8.7 - Espacialização do resíduo da estimativa da disponibilidade de forragem feita a partir do modelo agrometeorológico-espectral B, para os períodos P6 e P9	160

LISTA DE TABELAS

	Pág.
2.1 - Posicionamento e resolução espacial das bandas espectrais dos sensores TM e ETM+	41
5.1 - Sensor e data de aquisição do conjunto de imagens Landsat utilizadas nas diferentes etapas do trabalho	69
5.2 - Localização, área e unidade de mapeamento das unidades amostrais	74
5.3 - Tipo de solo das unidades de mapeamento	76
5.4 - Composição florística de acordo com a unidade de mapeamento das unidades amostrais	77
5.5 - Disponibilidade de forragem ($\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$) medida em campo nas diferentes datas de coleta de dados	79
6.1 - Valores das variáveis agrometeorológicas e período em dias utilizado para cálculo das variáveis	85
6.2 - Valores mensais da eficiência de conversão da PAR incidente em biomassa aérea ($\text{gMS}\cdot\text{MJ}^{-1}$) para o período de janeiro de 1985 a dezembro de 1988	89
6.3 - Valores da eficiência da conversão da PAR incidente em biomassa aérea utilizados para a parametrização	91
6.4 - Valores da estimativa da disponibilidade de forragem real ($\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$) para as 15 unidades amostrais para períodos de 16 dias obtidos a partir do submodelo agrometeorológico	94
6.5 - Valores do total da PAR incidente ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) em 16 dias obtida a partir da grade de 30 metros com os resultados do modelo Eta-CPTEC para o período de 6 a 21 de janeiro de 2003	99
6.6 - Estimativas da disponibilidade real de forragem para as unidades amostrais ($\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$), utilizando os dados de PAR incidente medidos pela estação meteorológica e estimados a partir do modelo Eta-CPTEC, para o período entre 6 a 21 de janeiro de 2003	100
7.1 - Valores dos coeficientes utilizados na geração das imagens Brightness e Greenness, para o sensor Landsat/ETM+	105
7.2 - Reflectância média dos pontos de controle radiométricos, em nível de cinza, nas diferentes bandas nas diferentes datas antes dos procedimentos de retificação	108
7.3 - Reflectância média dos pontos de controle radiométricos, em nível de cinza, nas diferentes bandas nas diferentes datas depois dos procedimentos de retificação	109
7.4 - Valores de correlação entre os valores de reflectância e a biomassa para as bandas 3, 4, 5 e 7 nas diferentes datas de coleta de dados .	113
7.5 - Sumário das estatísticas descritivas para as variáveis espectrais reflectância das bandas individuais e para a disponibilidade de forragem dos dados coletados nos meses de novembro e janeiro	122

7.6 - Equações utilizadas para o cálculo das variáveis espectrais a partir dos índices de vegetação NDVI e SAVI	124
7.7 - Sumário das estatísticas descritivas para os índices de vegetação e diferença normalizada entre bandas (valores adimensionais) para os dados coletados nos meses de novembro e janeiro	125
7.8 - Valores dos coeficientes utilizados na transformação Tasseled Cap, para o sensor Landsat/ETM+	128
7.9 - Sumário das estatísticas descritivas para as variáveis oriundas da transformação Tasseled Cap (em nível de cinza) para os dados dos meses de novembro e janeiro	129
7.10 - Sumário das estatísticas descritivas para as variáveis fração vegetação, solo e sombra (em valores relativos), calculadas a partir do modelo linear de mistura espectral	133
7.11 - Média das variáveis fração e disponibilidade de forragem para as diferentes datas de coleta de dados e o resultado do teste de Tukey para comparação das médias	134
8.1 - Equações para a estimativa da disponibilidade inicial de forragem obtidas através do método <i>Stepwise</i> e o valor do coeficiente de correlação múltiplo (<i>R</i>)	139
8.2 - Resultados dos testes de significância da Equação A ($DF_{t0} = 1988,45 - 173,75B7 + 191,56B3$)	142
8.3 - Resultados dos testes de significância da Equação B ($DF_{t0} = 8568,53 - 346,21B7 - 75,85 \text{ Wetness}$)	142
8.4 - Resultados dos testes de significância da Equação C ($DF_{t0} = 1275,96 - 182,45B7 + 29,96\text{Solo} + 32,45B4$)	143
8.5 - Resultado do teste de Tukey para a comparação das médias coletadas sobre diferentes tipos de solos	147
8.6 - Valores da estimativa da disponibilidade de forragem real ($\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$) para as 14 unidades amostrais nos períodos de 16 dias (P6, P9), obtidos a partir da Equação 8.5 (Modelo A)	150
8.7 - Valores da estimativa da disponibilidade de forragem real ($\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$) para as 14 unidades amostrais nos períodos P6 e P9, obtidos a partir da Equação 8.6 (Modelo B)	151
8.8 - Coeficientes de regressão parcial (b^*) e seus valores relativos para as variáveis do modelo agrometeorológico-espectral A	152
8.9 - Coeficientes de regressão parcial (b^*) e seus valores relativos para as variáveis do modelo agrometeorológico-espectral B	153

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{MSA}	Acúmulo de matéria seca aérea diário
b^*	Coefficientes de regressão padronizados
b_i	Coefficiente linear para banda i
b_k	Coefficientes do modelo de regressão linear múltipla
CO_2	Gás carbônico
D	Distância entre a Terra e o Sol
\bar{D}	Distância média entre a Terra e o Sol
\hat{DF}	Estimativa da disponibilidade de forragem
DF_0	Disponibilidade de forragem inicial
e	Tensão média diária de vapor d'água
E_a	Poder evaporante diário do ar
e_j	Resíduo da estimativa j
e_s	Tensão de saturação de vapor d'água para temperatura média do ar
H	Ângulo horário (rad)
ha	Hectare
Im_{TC}	Imagem da transformação Tasseled Cap
K	Fator de rugosidade da superfície
$kgMS.ha^{-1}$	Quilogramas de matéria seca por hectare
km	Quilometro
L_i	Radiância espectral detectada pelo sensor na banda i
$MJ.m^{-2}$	Megajoule por metro quadrado
μm	Micrômetro
mm	Milímetros
$MSAm$	Matéria seca acumulada no mês m
N	Duração máxima do fotoperíodo (horas)
ND_i	Níveis digitais da imagem na banda i
O_2	Oxigênio
$^{\circ}C$	Graus Celcius
r	Coefficiente de correlação linear de Pearson
R	Coefficiente de correlação linear múltiplo
R_o	Radiação solar incidente no topo da atmosfera
S	Constante solar
SQX_k	Soma dos quadrados dos desvios da variável independente X_k
SQY	Soma dos quadrados dos desvios da variável dependente Y
t	Tempo em dias
T	Temperatura média do ar
V_2	Total de vento percorrido diário a 2 metros de altura
VE	Variável espectral genérica
VE_k	Variáveis espectrais independentes
X_i	Valor original dos pixels da banda i
X_i^*	Valor dos pixels da banda i após a retificação

Y	Rendimento real
Y_m	Rendimento máximo
Δ	Coeficiente angular da curva que relaciona a pressão de saturação de vapor e a temperatura média do ar
δ	Declinação solar
ϕ	Latitude local (graus)
θ_s	Ângulo zenital do fluxo de radiação incidente
β_k	Parâmetros do modelo de regressão linear múltipla
ϵ_c	Eficiência com que a energia solar é convertida em matéria seca
ϵ_{CA}	Eficiência de conversão da radiação solar incidente em biomassa aérea
ϵ_i	Fração da radiação incidente interceptada pelo dossel
ϵ_j	Erro aleatório ou resíduo
ϵ_s	Fração da radiação solar incidente fotossinteticamente ativa
γ	Constante psicrométrica
ρ	Reflectância
ρ^*	Reflectância aparente
ρ_{max}	Reflectância máxima do conjunto de pixels
ρ_{med}	Reflectância média do conjunto de pixels
ρ_{min}	Reflectância mínima do conjunto de pixels

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANPP	Produtividade primária líquida acima do solo
BG	Bagé
CAD	Capacidade de armazenamento de água no solo
CC	Cabanha Chácara
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CV	Coeficiente de variação
DF	Disponibilidade de forragem
DNMET	Departamento Nacional de Meteorologia
ER	Estância Redenção
ESJ	Estância São José
ETP	Evapotranspiração potencial
ETR	Evapotranspiração real
FARSUL	Federação da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul
FPIs	Feições pseudo-invariantes
GPP	Produtividade primária bruta
GPS	Sistema de posicionamento global
HN	Hulha Negra
IAF	Índice de área foliar
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LEGAL	Linguagem Espacial para Álgebra de Mapas
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MS	Matéria seca
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NPP	Produtividade primária líquida
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa
PCDs	Plataformas de Coleta de Dados
PL	Planossolo
REM	Radiação eletromagnética

Rg	Radiação global
ROC	Radiação de ondas curtas
RS	Rio Grande do Sul
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado para o Solo
Spring	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Ym	Rendimento máximo

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

É antiga a preocupação do homem em modelar os processos biofísicos da vegetação, utilizando como base o potencial genético das espécies vegetais e as informações de clima e de solo. Com a recente evolução e popularização da computação, tendo como conseqüências o avanço nas tecnologias de sensoriamento remoto e dos sistemas de informações geográficas, é uma questão de tempo para que sejam desenvolvidos modelos que integrem operacionalmente as variáveis espectrais da vegetação aos modelos de produtividade vegetal. Esta integração permitirá, de um modo geral, um melhor uso das informações que as imagens orbitais fornecem, nos âmbitos espectral, temporal e espacial, visando o monitoramento da vegetação. Atualmente existe uma carência metodológica para este tipo de estudo integrado sobre formações campestres naturais. Tueller (2001), ao revisar os trabalhos que integram os parâmetros agrometeorológicos e espectrais para o monitoramento destas formações vegetais, concluiu que os estudos existentes foram realizados em escalas que pouco auxiliam o manejo local da vegetação.

Para o desenvolvimento do presente trabalho, que procura suprir a carência de estudos nesta linha de pesquisas, selecionou-se uma região sobre o bioma *Campos Sulinos* no Estado do Rio Grande do Sul. Segundo o último Censo Agropecuário Brasileiro (IBGE, 2002), a vegetação natural deste bioma perfaz 44% da cobertura vegetal do Estado do Rio Grande do Sul, correspondendo a 70% da área total dos remanescentes do bioma, atualmente exploradas economicamente com pecuária extensiva na Região Sul do Brasil. Esta vegetação é utilizada como suporte alimentar para a produção pecuária, devido à riqueza e à diversidade de plantas de valor forrageiro, conseqüência de uma grande diversidade natural de espécies existentes neste bioma (Nabinger et al., 2000), sendo que a exploração econômica, baseada na criação extensiva de

bovinos e ovinos, iniciou-se com a chegada dos padres jesuítas ao sul do Brasil, no século XVII (Memorial, 2002).

A exploração econômica da vegetação natural ainda fundamenta-se na criação extensiva de animais de forma sustentável, mas devido às mudanças na economia mundial, que determinam a necessidade constante de intensificação das atividades agropecuárias, os danos à vegetação têm se tornado mais freqüentes em função do manejo inadequado das *pastagens naturais*. A alta lotação de animais em pastejo (denominada superpastoreio) ocasiona uma diminuição na ocorrência das espécies de maior valor forrageiro (preferidas pelos animais) devido à eliminação das gemas vegetativas, responsáveis pelo crescimento. Esta diminuição da variabilidade da vegetação desestrutura não só a comunidade vegetal, mas também o bioma como um todo (Rodrigues e Rodrigues, 1987). Uma forma de evitar o superpastoreio é a adequação da carga animal em pastejo a partir da determinação da real produtividade da vegetação utilizada como suporte forrageiro, nas diferentes épocas do ano, possibilitando estabelecer cargas animal diferenciadas de forma a manter o equilíbrio da comunidade vegetal, sem que ocorra a supressão de espécies.

O presente trabalho, que visa a estimativa real produção da vegetação do bioma *Campos Sulinos*, no Estado do Rio Grande do Sul, permite a extrapolação da metodologia utilizada e dos resultados obtidos para estudos em outras formações deste bioma onde a vegetação é utilizada como suporte forrageiro para a criação de animais, que também ocorre nos estados de Santa Catarina e do Paraná em território brasileiro e em grande parte do Uruguai e da Argentina (Walter, 1986; Arruda, 2001). Os resultados do presente trabalho também podem ser utilizados para a realização de estudos semelhantes em outros ecossistemas e biomas que ocorrem na América do Sul que são explorados economicamente com pecuária extensiva utilizando como base da cadeia alimentar a produção primária do estrato herbáceo, como por exemplo nos *Cerrados*, da Região Centro-Oeste e do Estado de Roraima, em território

brasileiro e os “*Llanos*” que ocorrem na Bolívia, Colômbia e Venezuela (Huber, 1987).

1.1. Hipótese

Este trabalho fundamenta-se na hipótese de que as variações da biomassa de uma comunidade vegetal provocam alterações nas propriedades espectrais da mesma, que permitem caracterizar a vegetação e quantificar seus parâmetros biofísicos a partir de modelos agrometeorológicos-espectrais, os quais integram a resposta espectral da vegetação e as variáveis agrometeorológicas que atuam no sistema solo-planta-atmosfera.

1.2. Objetivos

Objetivo geral:

Integração de dados radiométricos, obtidos a partir de sensoriamento remoto orbital, com as variáveis agrometeorológicas, que atuam no sistema solo-planta-atmosfera, para o desenvolvimento de um modelo conceitual para a estimativa da disponibilidade de forragem da vegetação campestre natural.

Objetivos específicos:

- 1) Parametrizar o modelo conceitual para a estimativa da disponibilidade de forragem da vegetação campestre natural sobre o bioma *Campos Sulinos* no Estado de Rio Grande do Sul.
- 2) Determinar a variável espectral que melhor representa a dinâmica temporal da biomassa da vegetação estudada.
- 3) Avaliar o desempenho do modelo desenvolvido e parametrizado através da sua espacialização em mapas síntese de produção de biomassa para diferentes épocas do ano.

- 4) Avaliar a integração das variáveis meteorológicas obtidas a partir do modelo de previsão climática regional do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), o modelo Eta, em modelos de previsão do crescimento vegetal.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. O Bioma *Campos Sulinos*

Os campos naturais que ocorrem ao sul do Brasil, os *Campos Sulinos*, são um dos sete biomas brasileiros classificados pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) (Arruda, 2001), ocorrendo desde o Paraná até o Rio Grande do Sul (Figura 2.1). A vegetação desta região foi classificada por Veloso et al. (1991) como *estepe*, apresentando diferentes fisionomias: *arborizada*, *parque* e *gramíneo-lenhosa*. Muito comum na região é a utilização desta vegetação como suporte alimentar para a produção pecuária, devido à diversidade de plantas com alto valor forrageiro existente neste bioma (Nabinger et al., 2000). Segundo o último Censo Agropecuário Brasileiro (IBGE, 2002), as pastagens naturais perfazem 44% da cobertura vegetal do Estado do Rio Grande do Sul, correspondendo a 70% do total da área destinada à pecuária na Região Sul do Brasil.

Existe neste bioma uma grande sazonalidade na produção de biomassa vegetal, determinada pelas variações climáticas interanuais e pela coexistência de espécies C_3 e C_4 adaptadas ao clima subtropical. Entre as plantas de crescimento estival predominam as espécies do grupo fotossintético C_4 , enquanto que entre as plantas com crescimento hibernal há um predomínio das espécies do grupo C_3 (Berretta et al., 2000; Deregibus, 2000; Nabinger et al., 2000). A frequência de espécies C_3 , de maneira geral, é de 17% em relação ao total de espécies que compõem a pastagem, mas, em função do superpastoreio, são observadas apenas no início da estação fria (Gomes, 1996). O predomínio de espécies C_4 explica a maior produção de biomassa nas estações quentes do ano (Primavesi, 1984; Escosteguy, 1990; Girardi-Deiro et al., 1992; Corrêa, 1993; Setelich, 1994; Gomes, 1996; Gonçalves,

1999; Machado, 1999). As espécies C_4 interrompem seu crescimento no início do inverno, logo após a ocorrência das primeiras geadas, quando o congelamento necrosa as lâminas foliares, impedindo a atividade fotossintética destas plantas (Nabinger et al., 2000).

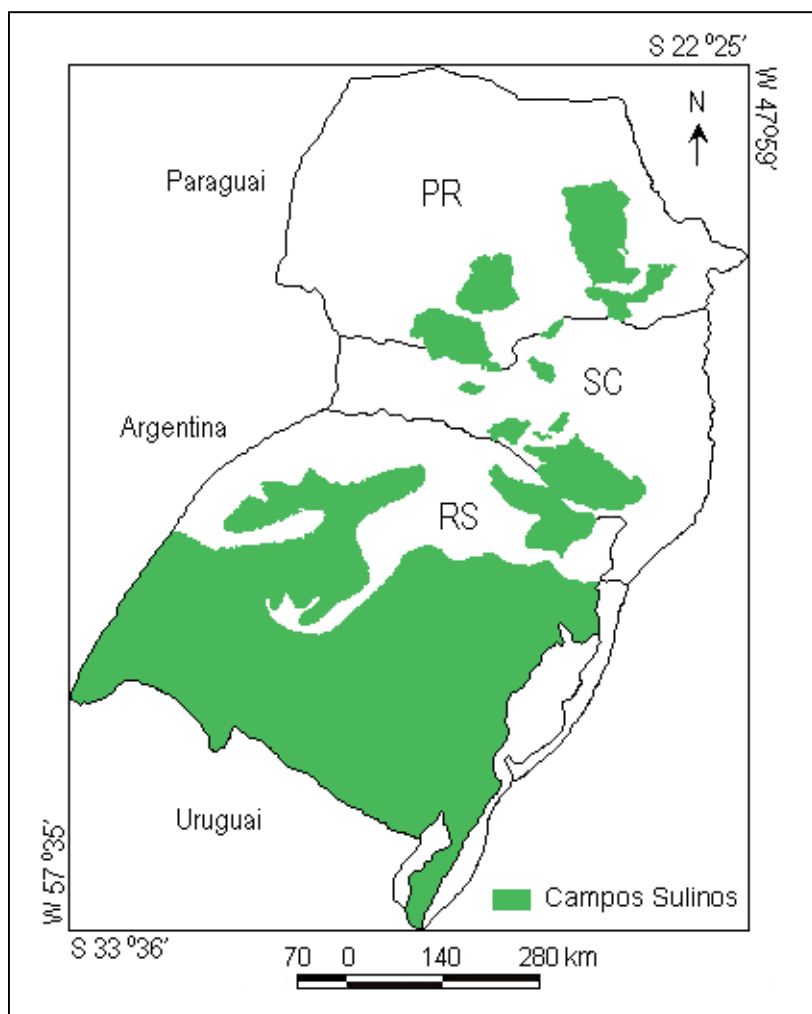


FIGURA 2.1 - Distribuição do bioma *Campos Sulinos* na Região Sul do Brasil.

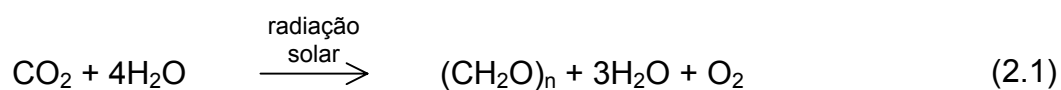
FONTE: Adaptada de Nabinger et al. (2000).

A prática do pastoreio determinou as características e a composição florística atual da vegetação (Rambo, 1956), sendo predominantes as espécies gramíneas de porte baixo (Macedo, 1984; Girardi-Deiro et al., 1992; Gonçalves, 1998). A capacidade de suporte da vegetação, definida como a lotação ótima

de animais em pastejo, na qual se maximizam os rendimentos econômicos com a manutenção do recurso natural (Gonçalves, 1999), apresenta variações que acompanham as sazonalidades de produção de biomassa, obrigando os pecuaristas da região a ajustar a carga animal em pastejo durante as diferentes estações do ano (FARSUL, 1997). O superpastoreio (excesso de animais por área) é prática comum na região principalmente no inverno, devido à baixa oferta de forragem, ocasionando uma diminuição na ocorrência das espécies de maior valor forrageiro (preferidas pelos animais), em decorrência da eliminação das gemas vegetativas, responsáveis pelo crescimento e pela ausência de ressemeadura natural. Esta diminuição da variabilidade da vegetação desestrutura não só a comunidade vegetal, mas também o bioma como um todo (Rodrigues e Rodrigues, 1987).

2.2. Aspectos Ecofisiológicos do Crescimento e Desenvolvimento da Vegetação

A produção de biomassa vegetal ou a Produtividade Primária Líquida (NPP) é definida como sendo a quantidade de carbono assimilado pelo processo de fotossíntese (Produtividade Primária Bruta, GPP), descontada a quantidade de carbono perdido durante os processos de respiração. A biomassa vegetal é produzida a partir da fixação do CO₂ atmosférico, utilizando como fonte de energia a radiação solar, cujas reações bioquímicas deste processo podem ser resumidas pela Equação 2.1 (Hall e Rao, 1994):



O processo de fotossíntese, que ocorre em meio aquoso, se inicia com oxidação da água (H₂O), ocorrendo a liberação de prótons (H⁺) que irão promover a redução do gás carbônico (CO₂) para formar os compostos orgânicos ((CH₂O)_n), que são utilizados na formação da biomassa vegetal, havendo neste processo a liberação de oxigênio (O₂), como produto secundário (Taiz e Zeiger, 1991; Salisbury e Ross, 1992).

2.2.1. Fatores que Afetam a Fotossíntese

A água tem papel fundamental na fotossíntese por ser a doadora de elétrons para a reação química que inicia o processo de fixação do carbono (Equação 2.1). A disponibilidade de água para a vegetação condiciona as taxas de fotossíntese do dossel, sendo regulada pela precipitação pluvial, pela capacidade de armazenamento de água do solo e pela demanda evaporativa da atmosfera (Gillet, 1984). A água também atua na regulação térmica das plantas através dos processos de transpiração; o vento, a temperatura e a umidade do ar influenciam diretamente a demanda evaporativa da atmosfera, alterando o transporte de água no sistema solo-planta-atmosfera, alterando as taxas de transpiração do dossel (Jones, 1983; Tubelis e Nascimento, 1984). O déficit hídrico nas plantas provoca mudanças no grau de abertura dos estômatos, uma vez que, quando as plantas estão sob estresse hídrico, são forçadas a trabalhar com uma menor abertura estomática, diminuindo o transporte de água no sistema solo-planta-atmosfera. Como os estômatos são o caminho da entrada de CO₂ nas plantas e da saída de água, uma abertura estomática parcial decresce as taxas de fotossíntese total, tanto pelo déficit hídrico, quanto pelo menor suprimento de CO₂ (Chapin III et al., 1987).

Outro fator determinante para as taxas fotossintéticas é a quantidade de radiação solar incidente sobre um dossel. Aproximadamente 28% do total da radiação solar incidente na superfície da Terra está compreendida entre os comprimentos de onda 400 e 700 nm, sendo esta radiação denominada radiação fotossinteticamente ativa (PAR) (Nobel, 1999). A quantidade de PAR interceptada por um dossel é uma função da estrutura do dossel e dos estados fitossanitário e nutricional da vegetação. A eficiência do uso da radiação pelas plantas depende da interação entre a vegetação e o ambiente, que define como os processos de fotossíntese e transpiração são afetados pelos elementos climáticos ou como a estrutura do dossel afeta a quantidade de radiação incidente que atinge as diferentes camadas do mesmo (Kiniry et al., 1989; Russell et al., 1989). Os ecossistemas que apresentam predominância

de espécies vegetais da rota fotossintética C_4 têm uma produtividade primária potencial maior que aqueles onde as espécies predominantes pertencem ao grupo C_3 , isto porque as plantas do grupo C_4 apresentam um incremento linear nas taxas de fotossíntese, face ao aumento da disponibilidade de radiação, enquanto que as plantas C_3 saturam a capacidade fotossintética a partir do ponto de compensação luminosa (Jones, 1983; Salisbury e Ross, 1992).

A capacidade fotossintética é altamente correlacionada com o conteúdo de nitrogênio orgânico das folhas, por isso, o nitrogênio é o nutriente que as plantas necessitam em maior quantidade e, com freqüência, limita o crescimento das plantas (Marschner, 1990). Esta relação entre nitrogênio e fotossíntese indica que os compostos nitrogenados da folha limitam diretamente a fotossíntese, sendo mais evidente a limitação causada pela enzima RUBISCO, responsável pela fixação de CO_2 nas plantas C_3 e C_4 . Nas folhas, o nível desta enzima é controlado pela disponibilidade de nitrogênio durante o crescimento, bem como pelos níveis de CO_2 , luz e água (Marschner, 1990; Salisbury e Ross, 1992).

2.3. Modelos de Produtividade Vegetal

A existência de relações conhecidas entre as variáveis meteorológicas e os componentes que definem a produtividade vegetal possibilita a construção de modelos com o objetivo de estimar esta produtividade e de efetuar diagnósticos em relação às condições de crescimento (Nabinger, 1996; Thornley, 1998). Alguns autores (Thornley, 1976; Baier, 1979; Norman, 1979) classificaram os diferentes tipos de modelos que relacionam a fisiologia das plantas e os elementos meteorológicos, por vezes adotando nomenclatura própria, mas com conceituação similar.

Os modelos mais complexos são conhecidos como modelos de simulação, modelos mecanísticos ou modelos determinísticos. Para o desenvolvimento destes modelos são necessários conhecimentos sobre todos os processos fisiológicos da vegetação e sobre como cada variável meteorológica influencia

estes processos. Com base neste conhecimento são feitas simulações nas quais, a partir das alterações ambientais, é estimada a produtividade da vegetação (Thornley, 1976; Baier, 1979; Norman, 1979). Contudo, a aplicação destes modelos em grandes escalas é dificultada pela falta de conhecimento dos processos fisiológicos que ocorrem no dossel e pela dificuldade de desenvolvimento de modelos que integrem todos os processos fisiológicos (Berlato, 1987; Boote et al., 1996; Passioura, 1996). Outra dificuldade para quem trabalha com modelos desta natureza, é que poucos pesquisadores descrevem por inteiro as suas pesquisas em um único documento (Thornley, 1998), o que dificulta o acesso aos dados e à compreensão do sistema modelado como um todo.

Os modelos semi-determinísticos também consideram os processos fisiológicos da vegetação e, não só explicam o fenômeno estudado, mas também permitem extrapolações para condições ambientais diferentes daquelas vigentes sobre os dados utilizados para a geração dos modelos (King, 1989). Nos modelos semi-determinísticos a decisão sobre quais variáveis irão integrar um modelo está baseada em robustas relações empíricas (Passioura, 1996), obtidas através do conhecimento experimental e são utilizados modelos de regressão para a determinação e avaliação dos coeficientes que vinculam a resposta da vegetação às variáveis meteorológicas (Thornley, 1976; Baier, 1979; Norman, 1979).

Os modelos estatísticos empíricos, que relacionam os dados de produtividade e climáticos através de modelos de regressão, explicam o fenômeno estudado de forma aceitável (Pessoa et al., 1997), mas são válidos somente para o conjunto de dados sobre o qual foi gerado, não permitindo extrapolações para condições diferentes daquelas em que os dados originais foram obtidos. A principal diferença entre os modelos estatísticos empíricos e os semi-determinísticos é que estes últimos são mais robustos, devido às várias suposições teóricas necessárias para o seu desenvolvimento, baseadas na

resposta da vegetação frente aos fatores meteorológicos (King, 1989; Passioura, 1996; Pessoa et al., 1997).

Os modelos agrometeorológicos são descritos como modelos estatísticos semi-determinísticos, uma vez que visam representar de forma simplificada as relações existentes entre a resposta da planta e as variáveis ambientais durante os diferentes estádios fenológicos de uma cultura (King, 1989). Estes modelos requerem um conhecimento detalhado sobre as interações que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera, as quais são transferidas para sistemas de equações que analisam as contribuições das variáveis agrometeorológicas na expressão da produtividade final das culturas agrícolas (Berlato, 1987; King, 1989).

2.3.1. Relações entre a Produtividade Vegetal e a Radiação Solar

Modelos que têm como variável de entrada a energia solar interceptada para calcular a biomassa acumulada em um determinado período são utilizados em pesquisas com gramíneas forrageiras em regiões temperadas para estimar a produtividade potencial da vegetação em condições não limitantes (Nabinger, 1996). Estes modelos são baseados nas relações apresentadas por Monteith (1977), que demonstrou existir linearidade entre a quantidade de PAR interceptada e a matéria seca total produzida por um dossel vegetal, sendo o mecanismo pelo qual a radiação solar incidente é transformada em matéria seca descrito pela Equação 2.2, onde: MS = produção de matéria seca (g.m^{-2}); t = período de tempo considerado; ϵ_s = fração da radiação solar incidente fotossinteticamente ativa; ϵ_i = fração da radiação incidente interceptada pelo dossel; ϵ_c = eficiência com que a energia solar é convertida em matéria seca (g.MJ^{-1}); S = radiação global incidente ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$).

$$MS_t = \int \epsilon_s \epsilon_i \epsilon_c S dt \quad (2.2)$$

Para estimar a produtividade primária líquida da vegetação, pode-se reescrever a Equação 2.2 como função da quantidade de PAR absorvida pelo dossel em um intervalo de tempo considerado (PAR_a ; MJ.m^{-2}) e a eficiência de conversão desta radiação em biomassa (ϵ_c ; g.MJ^{-1}):

$$\text{NPP} = \epsilon_c \Sigma \text{PAR}_a \quad (2.3)$$

Para estimar a produtividade primária líquida acima do solo (ANPP), a Equação 2.3 passa a ser escrita:

$$\text{ANPP} = \epsilon_{CA} \Sigma \text{PAR}_a \quad (2.4)$$

onde: ϵ_{CA} representa a eficiência de utilização da PAR para a formação da parte aérea do dossel.

2.3.2. Relações entre a Produtividade Vegetal e a Disponibilidade Hídrica

A água está presente em todas as fases do sistema solo-planta-atmosfera, em diferentes estados físicos, influenciando os vários processos fisiológicos da vegetação (Item 2.2.1). A demanda evaporativa da atmosfera tem grande influência no status hídrico da vegetação, por condicionar as taxas de transferência d'água no sistema solo-planta-atmosfera (Bergamaschi, 1992), Por esta razão, estabelecer a relação entre a produtividade vegetal e a real disponibilidade hídrica para a vegetação torna-se uma tarefa mais complicada que relacionar a produtividade com a real disponibilidade de radiação.

Para avaliar as relações entre a disponibilidade hídrica e a produtividade vegetal são necessários conhecimentos sobre as características que determinam o consumo de água de um determinado dossel (King, 1989). O consumo de água das plantas é dado pela taxa de transpiração, que é definida como a perda de água para atmosfera na forma de vapor através dos estômatos e cutícula das plantas (Berlato e Molion, 1981). Na prática esta é

uma variável difícil de ser obtida, assim alguns modelos de previsão de rendimentos consideram a evapotranspiração como variável que explica o consumo de água pelas plantas (Hanks e Hill, 1980). A evapotranspiração mede a perda de água pela transpiração mais a água evaporada do solo (Berlato e Molion, 1981).

Vários modelos de produtividade vegetal consideram a Evapotranspiração Real (ETR) e a Evapotranspiração Potencial (ETP) como variáveis de entrada para estimar o consumo de água do dossel (Jensen, 1968; Hanks, 1974, Kanemasu et al., 1976; Hanks e Hill, 1980) os quais têm como base a relação entre a evapotranspiração real e potencial (ou máxima) e o rendimento real (Y) e rendimento máximo (Y_m), como demonstrado na Equação 2.5 (Hanks e Hill, 1980):

$$Y/Y_m = ETR/ETP \quad (2.5)$$

Quando a disponibilidade de água para a vegetação for igual a demanda a relação ETR/ETP será igual a unidade e assim o rendimento real não será prejudicado pelo déficit hídrico. Já quando houver déficit hídrico, a ETR será menor que ETP, o que irá acarretar uma diminuição no rendimento real da vegetação (Barni et al., 1996).

A composição de um índice que represente tanto a disponibilidade de água para o dossel quanto o seu consumo de água em um modelo agrometeorológico-espectral deve considerar, principalmente, a facilidade de obtenção e de medição dos dados de forma remota. Através da medição do potencial hídrico do solo, das plantas e da atmosfera tem-se um conhecimento preciso do transporte de água no sistema solo-planta-atmosfera, que se dá a partir da diferença de potencial gerada pela demanda evaporativa da atmosfera. Thonrley (1998) em seu modelo para estimativa de rendimento de pastagens cultivadas utilizou os conceitos de potencial hídrico para estimativa da disponibilidade hídrica e do consumo de água do dossel, com ótimos

resultados quando aplicados na prática, como os obtidos por Silveira (1999), mas a necessidade de medições *in situ* inviabilizam a utilização deste tipo de conceitos como base para o desenvolvimento de um modelo agrometeorológico-espectral. Para o cálculo da ETP e da ETR são necessárias medições das variáveis meteorológicas, que podem ser obtidas de forma remota, como por exemplo, a partir das Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) ou a partir de estações meteorológicas automáticas. Assim, devido a facilidade de medição, neste trabalho optou-se por trabalhar com as variáveis derivadas do conceito de evapotranspiração ao invés de se utilizar as variáveis de potencial hídrico.

2.4. Sensoriamento Remoto para o Monitoramento da Vegetação

Estudos de observação da Terra feitos a partir do sensoriamento remoto consistem na interpretação e na compreensão das medições da energia eletromagnética, refletida ou emitida pelos alvos da superfície, feitas a partir de sensores a bordo de satélites ou de aeronaves (Mather, 1999). Para o monitoramento da vegetação é bastante comum a utilização de sensores eletro-ópticos, que geram imagens multiespectrais a partir da detecção da energia refletida pelos alvos localizados na superfície em específicas faixas do espectro eletromagnético, principalmente na região do vermelho e do infravermelho próximo, onde a vegetação interage mais intensamente com a radiação solar incidente (Nobel, 1999).

Os satélites da série Landsat são os mais utilizados para este tipo de monitoramento, em escalas local e regional, devido à sua cobertura periódica da superfície da Terra, adquirindo imagens de um mesmo ponto da superfície a cada 16 dias, proporcionando a existência de uma longa série histórica de imagens com resoluções bastante semelhantes, desde o lançamento do satélite Landsat 5, em 1984. Os sensores TM (Landsat 5) e ETM+ (Landsat 7), possuem bandas posicionadas no espectro óptico e termal, com diferentes resoluções espaciais, apresentadas na Tabela 2.1.

TABELA 2.1 - Posicionamento e resolução espacial das bandas espectrais dos sensores TM e ETM+.

Bandas	TM		ETM+	
	Posicionamento das bandas (μm)	Resolução espacial (m)	Posicionamento das bandas (μm)	Resolução espacial (m)
Banda 1	0,45 - 0,52	30	0,45 - 0,52	30
Banda 2	0,52 - 0,60	30	0,53 - 0,61	30
Banda 3	0,63 - 0,69	30	0,63 - 0,69	30
Banda 4	0,76 - 0,90	30	0,78 - 0,90	30
Banda 5	1,55 - 1,75	30	1,55 - 1,75	30
Banda 6	10,4 - 12,5	120	10,4 - 12,5	60
Banda 7	2,08 - 2,35	30	2,09 - 2,35	30
Pancromática	-	-	0,5 - 0,9	15

FONTE: NASA (2003).

As imagens de satélite são comumente utilizadas para gerar informações qualitativas da superfície da Terra, tais como mapas com a distribuição da vegetação ou com classes de uso e cobertura. Estas informações são obtidas a partir de procedimentos de classificação de imagens, onde feições homogêneas existentes nas imagens são agrupadas em uma mesma classe temática (Mather, 1999), que identificam, por exemplo, os tipos de vegetação de uma determinada região, ou através de interpretação visual das imagens sendo este o procedimento mais comum e mais confiável para obtenção de mapas temáticos de uso e cobertura da superfície da Terra.

As imagens de satélite também podem ser utilizadas com o fim de monitorar e quantificar a vegetação de um determinado local. Nestes casos, as imagens são utilizadas como fontes de dados quantitativos, já que a radiância detectada é convertida em valores numéricos, em uma escala definida pela resolução radiométrica do sensor, sendo função do número de bits que irão quantizar

uma determinada imagem. Esta resolução é característica de cada sensor e fornece o intervalo numérico no qual os valores da imagem serão distribuídos.

Com base no conhecimento da resposta espectral da vegetação, dos fatores ecológicos que alteram esta resposta, bem como da distribuição dos valores numéricos da imagem, tornam-se possíveis estudos quantitativos que visam inferir sobre uma determinada cobertura vegetal, com relação à sua produtividade, ao seu estado fitossanitário e/ou nutricional. Com este fim, neste trabalho serão utilizadas imagens do satélite Landsat para o monitoramento da vegetação campestre natural.

2.4.1. Resposta Espectral da Vegetação

A interação da radiação solar com a vegetação se dá principalmente nas folhas, órgãos vegetais altamente especializados na absorção da Radiação Eletromagnética (REM), onde ocorre o processo da fotossíntese (Salisbury e Ross, 1992; Nobel et al., 1993). A Figura 2.2 ilustra as variações nas porções absorvida, transmitida e refletida da radiação solar incidente em diferentes comprimentos de onda do espectro óptico, após a interação da radiação com uma folha individual.

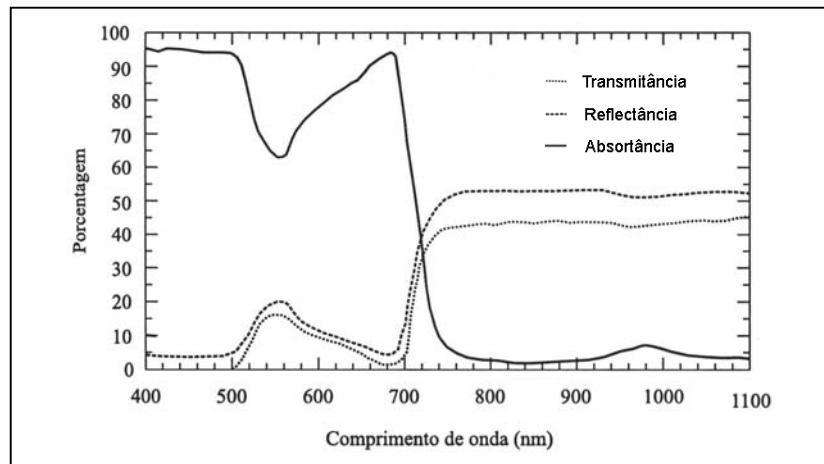


FIGURA 2.2 - Valores médios das frações refletida (reflectância), transmitida (transmitância) e absorvida (absortância) da radiação incidente após interação com uma folha individual em função do comprimento de onda (nm) nos comprimentos de onda do visível e infravermelho próximo.

FONTE: Adaptada de Ponzoni (2001).

A região do espectro eletromagnético entre 0,4 e 0,7 μm , correspondente à Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR), é utilizada pelas plantas nos processos fisiológicos de acúmulo de biomassa (Equações 2.2, 2.3 e 2.4), justificando a grande absorção apresentada pelas folhas nesta faixa de comprimento de onda (Salisbury e Ross, 1992; Hall e Rao, 1994). O aumento da energia refletida em torno de 0,55 μm é ocasionado pela reflexão da REM pelas clorofilas, que são os pigmentos fotossintéticos mais abundantes na vegetação verde sadia. As clorofilas *a* e *b* apresentam, respectivamente, dois picos de absorção, o maior nos comprimentos de onda de 0,649 e 0,665 μm e o menor nos comprimentos de onda de 0,420 e 0,435 μm (Hall e Rao, 1994).

Entre 0,7 e 1,3 μm (região do infravermelho próximo), há um predomínio dos processos de reflexão e transmissão da radiação incidente, devido à não utilização desta radiação nos processos de crescimento das plantas

(Kasperbauer, 1994). O espalhamento da radiação nesta porção do espectro eletromagnético é utilizado como um processo de resfriamento da folha, evitando o acúmulo de energia no interior da mesma (Nobel, 1999). A partir de $1,3 \mu\text{m}$ os valores das diferentes partições da radiação incidente são função das bandas de absorção da água existente no mesófilo, localizadas nos comprimentos de onda de $1,4$; $1,9$; $2,7 \mu\text{m}$ (Kasperbauer, 1994).

2.4.1.1. Alterações na Resposta Espectral da Vegetação em Função das Variações Morfo-Fisiológicas de um Dossel

À medida que ocorram alterações morfo-fisiológicas no dossel, as frações absorvida, transmitida e refletida da radiação eletromagnética também serão alteradas (Russel et al., 1989; Nobel et al., 1993). A análise e a quantificação destas variações é o que possibilita o monitoramento da vegetação, bem como a integração dos dados obtidos a partir dos sensores remotos com modelos matemáticos para inferir sobre as propriedades biofísicas de um dossel.

Estudos que consideram todas as frações da radiação incidente são realizados somente em laboratório, a partir de medições em folhas individuais. Estudos com dosséis, realizados em campo, geralmente utilizam sensores orbitais ou aerotransportados, que medem a energia refletida pelos alvos da superfície terrestre, limitando as análises da resposta espectral da vegetação somente à porção refletida da radiação eletromagnética (Monteith e Unsworth, 1990). A arquitetura do dossel (ângulo de inserção, distribuição, orientação e espaçamento das folhas), o teor de pigmentos, o conteúdo de água, o grau de senescência e os estresses ambientais ou nutricionais aos quais as plantas estão submetidas, são os principais fatores que definem a reflectância de um dossel (Goel, 1988).

Na Figura 2.3 observa-se uma relação inversamente proporcional entre o aumento da biomassa vegetal e a energia refletida na porção do espectro eletromagnético correspondente ao vermelho ($0,6 - 0,7 \mu\text{m}$), em concordância

com o exposto por Curran e Milton (1983) e Goel (1988). O aumento da absorção da energia nesta faixa do espectro eletromagnético é consequência direta do aumento da quantidade de pigmentos fotossintetizantes (Knippling, 1970; Woolley, 1971; Tucker, 1973; Thomas e Gausman, 1977). Variações na adubação das plantas fazem com que ocorram aumentos não só no Índice de Área Foliar (IAF) como também no teor de pigmentos fotossintéticos, aumentando a área para interceptar a radiação solar e também a capacidade de absorver a radiação interceptada (Marschner, 1990). Entre 0,7 e 1,3 μm a quantidade de energia refletida aumenta frente ao aumento do IAF, em função do aumento na quantidade de espaços intercelulares por área. Isto promove o aumento nas reflexões e refrações sucessivas da radiação eletromagnética no interior do mesófilo das várias camadas de folhas (Woolley, 1971; Thomas e Gausman, 1977).

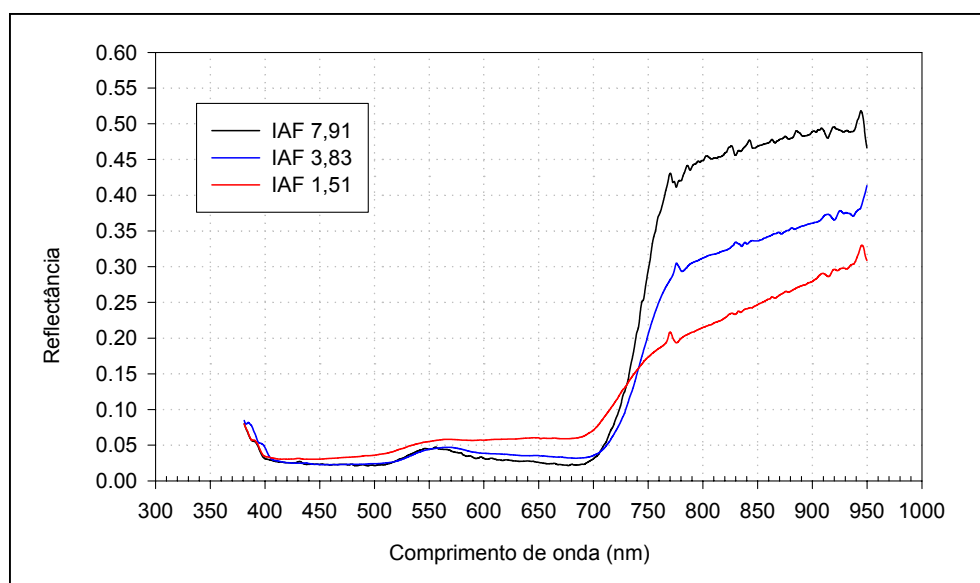


FIGURA 2.3 - Variações na reflectância nas porções do visível e infravermelho próximo frente ao aumento da biomassa (IAF) de dosséis de *Paspalum notatum*, em parcelas experimentais, em campo.

FONTE: Adaptada de Fonseca et al. (2002).

A ocorrência de déficit hídrico nas plantas também promove mudanças na resposta espectral de um dossel. A reflectância do visível aumenta, sendo o pico deslocado para a região do vermelho, função do predomínio dos carotenóides e da degradação das clorofilas. No infravermelho próximo a reflectância diminui, devido à degeneração das membranas celulares do mesófilo. A partir do comprimento de onda 1,3 μm , à medida que a vegetação seca, em função do déficit hídrico ou da senescência natural, a energia refletida aumenta, já que nesta porção do espectro eletromagnético a reflectância da vegetação é modulada pelas bandas de absorção da água.

2.4.2. Uso dos Índices de Vegetação para Análise das Variações da Biomassa de um Dossel

Os índices de vegetação são combinações matemáticas da resposta espectral de diferentes bandas do espectro eletromagnético, sendo que os principais índices citados na literatura utilizam os valores da reflectância em duas faixas de comprimento de onda, o vermelho e o infravermelho próximo. O contraste da resposta da vegetação nestes comprimentos de onda faz com que a vegetação seja realçada em relação aos demais alvos, facilitando a sua identificação e o seu monitoramento a partir de dados de sensoriamento remoto (Asrar et al., 1984; Baret e Guyot, 1991). Além disso, os índices de vegetação têm como vantagens condensar o volume de dados a ser analisado (Van Dijk et al., 1989) e permitir a quantificação e a avaliação de diferenças nas condições de crescimento, com base nas relações existentes entre estes índices e as variáveis biofísicas da vegetação, bem como, com as características estruturais e fisiológicas da mesma (Steinmetz et al., 1990; Baret e Guyot, 1991).

O *Índice de Vegetação por Diferença Normalizada* (NDVI) é um dos índices de vegetação mais citados em trabalhos científicos, provavelmente devido à sua variação finita (-1 a 1) que facilita a interpretação dos resultados. Estudos empíricos mostram que este índice apresenta correlações significativas com as

variáveis biofísicas da vegetação, principalmente com aquelas que descrevem a fração responsável pela fotossíntese, tais como biomassa verde (Figura 2.4) e índice de área foliar (Gamon et al., 1995; Fonseca, 2000). O NDVI também apresenta correlação significativa com a radiação fotossinteticamente ativa absorvida ou interceptada pelo dossel (Asrar et al., 1984; Sellers, 1985; Steinmetz et al., 1990).

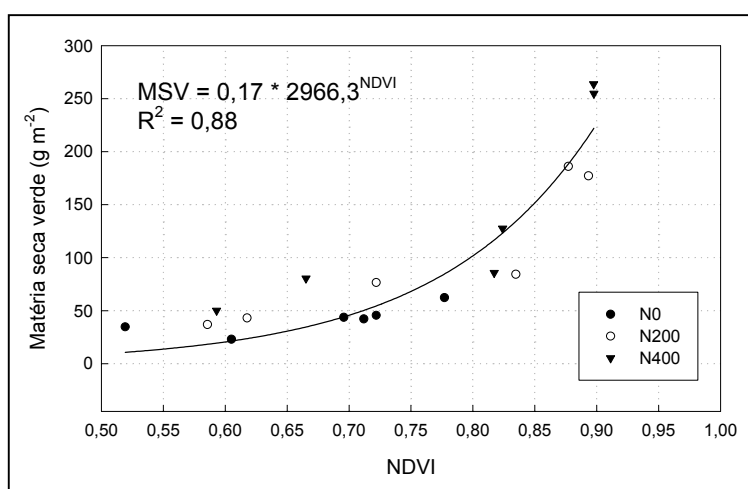


FIGURA 2.4 - Relação entre matéria seca verde e o NDVI para *Paspalum notatum* em tratamentos com diferentes doses de nitrogênio.

FONTE: Fonseca (2000).

Para diminuir a influência da resposta espectral do solo no valor calculado dos índices de vegetação, Huete (1988) propôs o *Índice de Vegetação Ajustado para o Solo* (SAVI) que inclui um fator de ajuste (L) em diferentes índices de vegetação, variável com o grau de fechamento do dossel, que permitiu uma melhora na interpretação das variáveis da vegetação. A partir de estudos empíricos o autor determinou que os valores de L entre 0,25 e 1,0 são adequados para estudos utilizando o SAVI associado ao NDVI, para diferentes dosséis analisados.

Alguns índices de vegetação utilizam todas as bandas multiespectrais para extração de informações da vegetação, a partir da geração de novas bandas que ressaltam a informação de interesse. Kauth e Thomas (1976) propuseram a utilização de todas as quatro bandas do sensor Landsat/MSS, para a geração de novas bandas, com base na técnica de análise estatística por componentes principais, denominando esta nova técnica de transformação Tasseled Cap, adaptada para o sensor Landsat/TM por Crist e Cicone (1984a,1984b) e com os coeficientes revistos para o sensor Landsat/ETM+ por Huang et al.(2002) e Gleriani et al. (2003). A diferença fundamental entre a análise por componentes principais e a transformação Tasseled Cap é que esta última gera componentes (imagens) com significado físico conhecido para o estudo de áreas agrícolas (Chuvieco, 1996), ressaltando as características da vegetação e do solo em bandas distintas a partir do uso de coeficientes pré-definidos através de sucessiva rotações de eixos (Crist e Cicone, 1984b).

2.4.3. Decomposição dos Valores da Reflectância dos Pixels a partir do Modelo Linear de Mistura Espectral

A técnica de decomposição da resposta das bandas multiespectrais a partir de um modelo linear de mistura espectral separa em imagens individuais os diferentes componentes que contribuem para a formação do sinal detectado pelo sensor orbital para a formação de um determinado pixel (Mather, 1999). Assim podem ser estabelecidas as diferentes categorias de alvos existentes dentro de um mesmo pixel e quantificar os diferentes alvos que compõem a resposta espectral do mesmo, a partir da geração de imagens-fração que expressam as quantidades relativas das categorias previamente definidas como formadoras do sinal detectado (Chuvieco, 1996).

As imagens-fração são obtidas a partir da resposta espectral dos alvos presentes na cena, coletadas a partir da leitura feita sobre os pixels puros destes alvos. Para dosséis vegetais podem ser extraídas informações sobre a quantidade de solo e vegetação dentro de cada pixel, bem como a fração

sombreada destes alvos, que também contribuem para a formação da resposta espectral do dossel (Jackson et al., 1979; Shimabukuro e Smith, 1991). Os valores da resposta espectral de cada feição, em cada banda, são utilizados para a formação de um sistema de equações lineares, que é resolvido pelo método dos mínimos quadrados visando estimar a quantidade relativa de cada alvo previamente definido no interior dos pixels da imagem (Shimabukuro e Smith, 1991),

2.5. Processamento de Imagens de Satélite para Estudos Multitemporais

Entre os objetivos da análise multitemporal de imagens estão a detecção das variações anuais da vegetação devidas à fenologia (fator intrínseco à vegetação) e ao clima (fator externo à vegetação), bem como a detecção de variações interanuais, como as mudanças no uso da terra e da cobertura vegetal ou aquelas provocadas pelos grandes fenômenos climáticos. A realização de estudos multitemporais com imagens obtidas por um mesmo sensor permite a aquisição dos dados em condições similares (bandas espectrais, horário, altitude e ângulo de aquisição), que facilitam o acompanhamento dos processos dinâmicos do ambiente (Chuvieco, 1996). Para o uso de imagens multitemporais adquiridas por um mesmo sensor são necessárias as correções na geometria (também conhecida por registro de imagens) e na radiometria das imagens (correções atmosféricas e retificação radiométrica) (Hall et al., 1991; Yuan e Elvidge, 1996).

2.5.1. Correção Geométrica

A correção geométrica tem por objetivo eliminar as distorções sistemáticas introduzidas durante o processo de aquisição da imagem e posicionar a imagem no espaço geográfico, dando, para cada pixel, uma coordenada geodésica (latitude e longitude) em um sistema de projeção da superfície terrestre (Richards e Jia, 1999). Este processo pode ser dividido em três grandes etapas: a) o mapeamento direto que estabelece uma relação entre coordenadas de imagem (linha e coluna) e coordenadas geodésicas (latitude e

longitude), através de pontos de controle, sendo conhecida por registro da imagem; b) o mapeamento inverso que inverte a transformação geométrica usada no mapeamento direto, permitindo que se retorne à imagem original para que sejam definidos os níveis de cinza da imagem corrigida; c) a reamostragem que consiste em uma interpolação sobre os níveis de cinza da imagem original para definir os níveis de cinza resultantes (Mather, 1999).

O desempenho do processo de correção geométrica depende de uma boa distribuição de pontos de controle e da precisão das coordenadas destes pontos e na etapa da reamostragem é importante a escolha da função polinomial adequada ao tipo de estudo que se pretende realizar. Nos estudos multitemporais feitos com base na radiometria da imagem, o interpolador a ser utilizado deverá alterar o mínimo possível o valor digital do pixel (Chuvieco, 1996), para que não ocorra perda de informação espectral.

2.5.2. Correção Atmosférica

A radiância detectada por um sensor orbital sofre influência dos processos de absorção e de espalhamento que ocorrem na atmosfera, sendo a correção atmosférica necessária sempre que se trabalha com a radiometria de imagens em séries multitemporais, tanto para comparação em termos absolutos ou quando se quer correlacionar a resposta espectral com modelos físicos que inferem sobre as propriedades dos alvos da superfície e também quando se deseja trabalhar com razão entre diferentes bandas, como por exemplo para o cálculo do NDVI (Mather, 1999; Song et al., 2001). Para conhecer a reflectância dos alvos da superfície da Terra é necessário minimizar os efeitos atmosféricos presentes nas imagens, sendo este processo realizado em 3 etapas: a) conversão dos níveis digitais em radiância; b) estimativa dos valores da reflectância aparente; c) a estimativa dos valores de reflectância de superfície (Chuvieco, 1996).

As bandas dos sensores TM e ETM+ foram posicionadas de forma a reduzir os efeitos multiplicativos da absorção da radiação pelos constituintes

atmosféricos, no sinal detectado pelo sensor. Nas imagens obtidas por estes sensores o principal efeito atmosférico é o espalhamento causado pelas partículas em suspensão na atmosfera, que provoca um efeito aditivo no sinal detectado (Song et al., 2001). Para converter os níveis digitais medidos pelos sensores TM e ETM+ em radiância espectral, são utilizados coeficientes de calibração, específicos para cada sensor e para cada banda espectral através de uma equação de transformação linear (Equação 2.6) (NASA, 2003):

$$L_i = a_{0i} + a_{1i} * ND_i \quad (W \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}) \quad (2.6)$$

onde: L_i é radiância espectral detectada pelo sensor na banda i ; a_{0i} , a_{1i} são os coeficientes de calibração do sensor para banda i ; e ND_i são os níveis digitais da imagem na banda i .

Para o cálculo da reflectância aparente (ρ^*), utiliza-se a Equação 2.7, que considera a irradiância solar no topo da atmosfera, nos comprimentos de onda da banda i (E_i), o ângulo zenital do fluxo de radiação incidente (θ_s) e a distância relativa entre a Terra e o Sol (d) (NASA, 2003).

$$\rho^* = \frac{\pi L_i d^2}{E_i \cos \theta_s} \quad (2.7)$$

Para a transformação da reflectância aparente em reflectância de superfície são necessárias informações sobre as condições atmosféricas do momento da aquisição da imagem, que podem ser obtidas a partir da própria imagem, como no método do objeto escuro, proposto por Chavez (1988), ou através de modelos de transferência radiativa atmosférica, como o modelo 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*), proposto por Vermote et al. (1997).

O modelo 6S (Vermote et al., 1997) transforma a reflectância aparente em reflectância de superfície, retirando os valores referentes aos efeitos atmosféricos e homogeneizando a reflectância para altitude do nível do mar.

Os efeitos atmosféricos retirados são o espalhamento causado principalmente pelos aerossóis e a absorção causada pelo vapor d'água e, posteriormente, o fator de distribuição de reflectância bidirecional é calculado de forma a simular a altitude de todos os alvos ao nível do mar. Este tipo de modelo de correção atmosférica considera as variações na intensidade da influência dos efeitos atmosféricos nas diferentes porções do espectro eletromagnético os quais provocam efeitos diferenciados nas diferentes bandas espectrais, conforme demonstrado por Song et al. (2001) para as bandas do sensor TM.

2.5.3. Retificação Radiométrica

As variações nas condições de iluminação (variações na posição aparente do sol) ou na calibração dos sensores, modificam a resposta espectral dos alvos detectada, ainda que não tenham ocorrido variações nos mesmos. Por este motivo, a retificação radiométrica é uma etapa imprescindível quando se deseja comparar imagens obtidas em distintas datas (Chuvieco, 1996; Mather, 1999). A partir de uma transformação linear, as diferentes bandas das imagens retificadas passam a se comportar espectralmente como se tivessem sido adquiridas pelo mesmo sensor, nas mesmas condições atmosféricas e de iluminação da imagem utilizada como referência (Yuan e Elvidge, 1996).

Hall et al. (1991) propuseram um algoritmo para a retificação radiométrica, onde são identificadas, nas diferentes datas, feições que possuam pixels com pouca ou nenhuma variação temporal na sua resposta espectral média, chamadas de Feições Pseudo-Invariantes (FPIs). A partir das FPIs são estabelecidos os pontos de controle radiométricos, que correspondem às feições localizadas nos extremos não vegetados da distribuição Greenness-Brightness da transformação Tasseled Cap. Os pontos de controle radiométricos são obtidos através do cruzamento das imagens Brightness e Greenness, onde previamente foram individualizados os pixels correspondentes as FPIs, os quais são utilizados no algoritmo para o cálculo dos coeficientes angular e linear da equação de transformação para as

diferentes bandas (i) das diferentes datas (Equação 2.8): obtendo-se os conjuntos de pixels claros e escuros (B e D) para a imagem utilizada como referência (R) e para as imagens que serão retificadas (S).

$$X_i^* = m_i X_i + b_i \quad (2.8)$$

onde: X_i corresponde ao valor original dos pixels da banda i ; X_i^* é o valor dos pixels da banda i após a retificação; m_i e b_i são, respectivamente, os coeficientes angular e linear da equação para banda i, calculados através das Equações 2.9 e 2.10.

$$m_i = (B_{Ri} - D_{Ri}) / (B_{Si} - D_{Si}) \quad (2.9)$$

$$b_i = (D_{Ri} * B_{Si} - D_{Si} * B_{Ri}) / B_{Si} - D_{Si} \quad (2.10)$$

nas quais são utilizados obtendo-se os conjuntos de pixels claros (B) e escuros (D) para a imagem utilizada como referência (R) e para as imagens que serão retificadas (S) para cada banda i. Após a retificação, a reflectância aparente média das FPIs nas imagens retificadas devem apresentar uma variação menor que 1% em relação à reflectância média das FPIs da imagem utilizada como referência (Hall et al., 1991).

2.6. Modelos Agrometeorológicos-Espectrais

Os modelos agrometeorológicos-espectrais visam integrar os modelos agrometeorológicos de produtividade vegetal com as informações espectrais da vegetação obtidas a partir de sensores remotos orbitais, com vistas a aumentar a exatidão das informações geradas (King, 1989). Com base nas informações geradas por estes modelos é possível, além da previsão da produtividade, monitorar a vegetação nos diferentes estádios do ciclo fenológico, informando a ocorrência de possíveis problemas durante o crescimento e desenvolvimento que possam influenciar na sua produtividade (Fontana et al., 2000), sem a necessidade de avaliações constantes em campo.

Para o monitoramento de pastagens naturais existem estudos que utilizam a classificação de imagens de satélite para fornecer informações sobre a composição botânica da vegetação, integrando estas informações de distribuição espacial com os modelos de previsão de rendimentos (Kerdiles e Grondona, 1995; Bork et al., 1999; Hill et al., 1999; Clark et al., 2001; Tueller, 2001). Nestes estudos as imagens de satélite são utilizadas somente com o objetivo de se obter um mapeamento atualizado da vegetação, não podendo, portanto, considerar tais modelos como agrometeorológicos-espectrais.

Plummer (2000), avaliando a integração e a utilização dos dados de sensoriamento remoto em modelos que simulam os processos fisiológicos da vegetação, indicou a possibilidade de utilização destes dados para estimar variáveis de entrada dos modelos fisiológicos, tanto para se obter informações sobre o clima quanto sobre a vegetação. Este autor também ressalta que os dados de sensoriamento remoto permitem uma maior compreensão dos resultados obtidos a partir modelos de produtividade já existentes e sugere diferentes aplicações para os dados radiométricos em integração com os modelos de produtividade vegetal, como por exemplo, fornecer estimativas das variáveis biofísicas de entrada dos modelos a partir das relações entre estas variáveis e a resposta espectral da vegetação.

Reeves et al. (2001) avaliaram a Produtividade Primária Líquida (NPP) da vegetação dos campos naturais dos Estados Unidos, estimada a partir dos algoritmos construídos com os dados do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Estes algoritmos consideram, apenas, a transformação da PAR em biomassa vegetal com base na Equação 2.2, proposta por Monteith (1977), numa resolução espacial de 1 km², e não consideram a partição dos fotoassimilados em biomassa aérea e biomassa de raízes. Talvez, por este motivo, estes autores concluíram que os dados de NPP obtidos através destes algoritmos podem ser utilizados como um indicativo das condições da sanidade da vegetação, permitindo estimar a real produtividade vegetal somente quando integrados a dados agrometeorológicos.

Frente à carência de estudos nesta linha de pesquisa para formações campestres naturais, Nouvellon et al. (2001) transformaram um modelo agrometeorológico-espectral estatístico empírico, desenvolvido com dados obtidos a partir de um espectrorradiômetro portátil, de forma a ser utilizado a partir de imagens orbitais para estimar a produtividade da vegetação campestre em escala regional. O modelo agrometeorológico que serviu de base para o estudo realizado por estes autores, segundo os próprios, “simula o crescimento da planta e o balanço de água em um mesmo passo” a partir das variáveis meteorológicas, as quais não estão totalmente descritas no trabalho, impossibilitando o entendimento e aplicação do mesmo por outros pesquisadores.

Boegh et al. (2002) utilizando o sensor CASI (hiperespectral, aerotransportado), integraram a resposta espectral da vegetação a um modelo mecanístico previamente desenvolvido, com o objetivo de quantificar e avaliar as variações dos estádios fisiológicos da vegetação. A partir da resposta espectral da vegetação foram obtidas informações sobre as variáveis concentração de clorofilas e índice de área foliar dos dosséis analisados (aveia, trigo, pastagens, milho, ervilha e beterraba). A resposta espectral dos dosséis foram utilizadas como variáveis de entrada no modelo de produtividade vegetal, apresentando resultados significativos, identificando a possibilidade de aplicação prática desta metodologia para estudos em escalas locais.

CAPÍTULO 3

DESENVOLVIMENTO DO MODELO AGROMETEOROLÓGICO-ESPECTRAL

Modelo matemático é a denominação para um conjunto de equações que descrevem um sistema físico, ou biofísico, com o objetivo de organizar o conhecimento dos diferentes fatores que interagem dentro desse sistema (Mass, 1993). Neste sentido, no presente trabalho foi desenvolvido um modelo agrometeorológico-espectral utilizando como bases teóricas os conhecimentos de agrometeorologia, fisiologia vegetal e comportamento espectral da vegetação para a construção de um modelo conceitual que expressa a produção de fitomassa aérea da vegetação campestre natural. O modelo agrometeorológico-espectral desenvolvido neste trabalho foi denominado JONG em homenagem ao pesquisador José Otavio Neto Gonçalves, pesquisador da vegetação nativa do bioma *Campos Sulinos* como suporte forrageiro para a criação extensiva de animais.

3.1. Apresentação do Modelo Conceitual: o Modelo JONG

A maioria dos sistemas biofísicos modelados são parcialmente conhecidos, sendo necessárias várias simplificações da realidade para o desenvolvimento de um modelo que possa ter aplicações práticas (Mass, 1993). Para o desenvolvimento do modelo agrometeorológico-espectral para a estimativa da disponibilidade de forragem do bioma *Campos Sulinos*, que possa ser aplicado com um mínimo de parâmetros, foram feitas algumas simplificações teóricas, a saber:

- Para o cálculo da produção potencial de forragem do dossel, foi considerada somente a Produção Primária Líquida Acima do Solo, ANPP, (Equação 2.4), uma vez que a forragem disponível para os animais é composta somente pela biomassa aérea da vegetação.

- Considerou-se que a variável eficiência de conversão da radiação solar incidente em biomassa aérea representa a variação temporal das condições ambientais vigentes, uma vez que o valor desta variável é regulado pelo suprimento e pela demanda sazonal por água e nutrientes da vegetação (Reynolds e D'Antonio, 1996).
- Para o cálculo da produção de forragem real do dossel, o consumo de água foi representado por um índice hídrico, composto à semelhança da Equação 2.5.
- A disponibilidade de forragem inicial do dossel foi representada por uma variável espectral, considerando os aspectos teóricos descritos nos Itens 2.4.1 e 2.4.2.

A Figura 3.1 mostra o fluxograma geral do modelo JONG, considerando as variáveis agrometeorológicas e os principais processos fisiológicos envolvidos no acúmulo de biomassa aérea e, em consequência, na resposta espectral da vegetação.

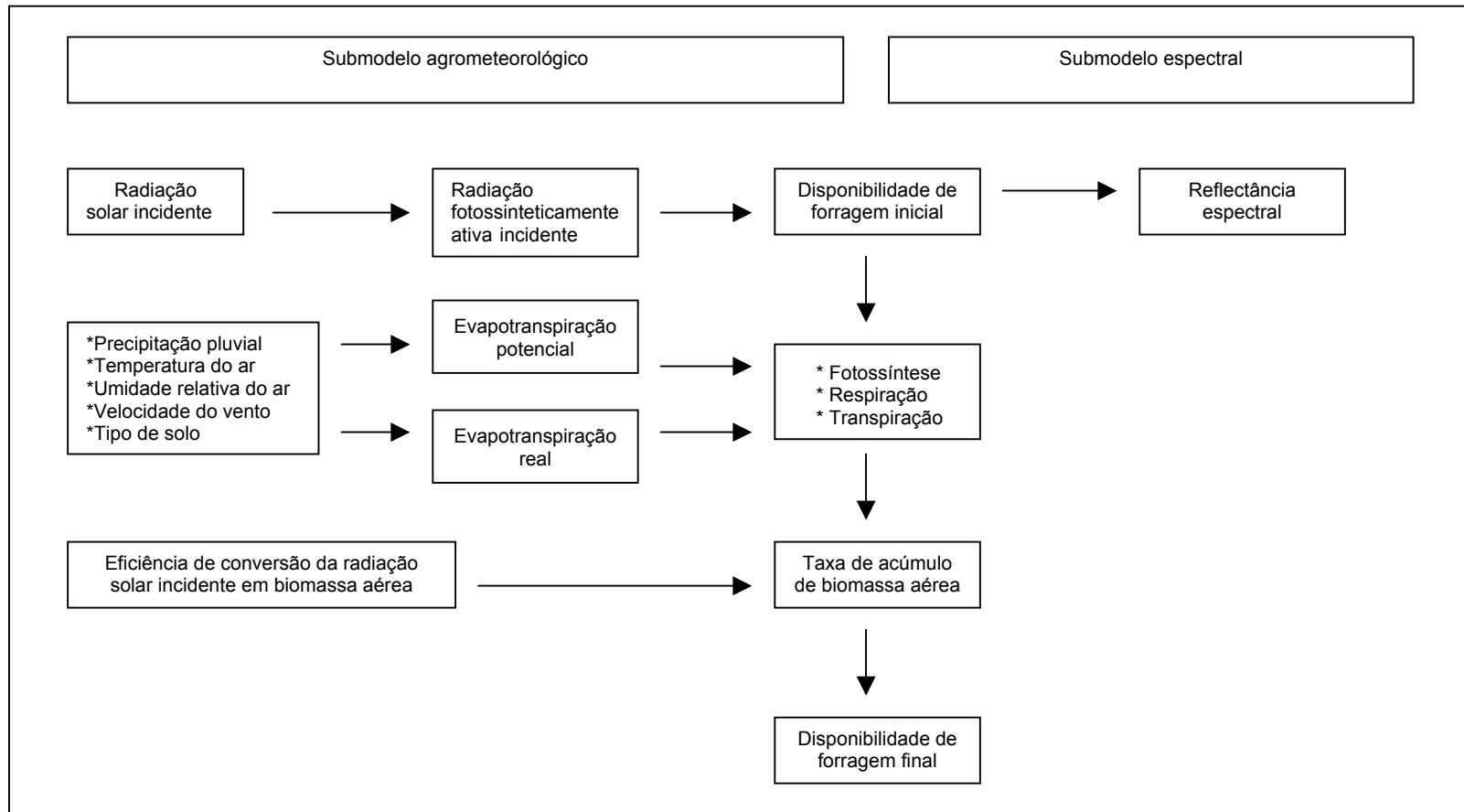


FIGURA 3.1 - Representação esquemática do modelo JONG.

Para equacionar matematicamente o sistema modelado, iniciou-se pelo desenvolvimento de um modelo de produção potencial de forragem, onde estima-se o acúmulo máximo (ou potencial) de forragem pela vegetação campestre, em um determinado período de tempo (t), a partir do conhecimento da quantidade de radiação solar incidente, na forma de radiação fotossinteticamente ativa (PAR_i) e considerando a disponibilidade de forragem existente (DF_0) ou inicial, como mostra a Equação 3.1:

$$\frac{dDF}{dt} = f(DF_0, PAR_i) \quad (3.1)$$

Com isso, a disponibilidade de forragem final (DF_n) é função da disponibilidade de forragem inicial (DF_0) no tempo $t = 0$ e do crescimento da vegetação no intervalo de tempo compreendido entre 0 e n dias, obtido a partir da integração do acúmulo de matéria seca aérea diário (A_{MSA}):

$$DF_n = DF_0 + \int_0^n A_{MSA} dt \quad (3.2)$$

O acúmulo de matéria seca aérea diário (A_{MSA}), é função do total da PAR incidente sobre o dossel, no intervalo de tempo compreendido entre 0 e n dias, e da eficiência da conversão da radiação incidente em biomassa aérea:

$$\int_0^n A_{MSA} dt = \varepsilon_{CA} \sum_{t=0}^n PAR_i \quad (3.3)$$

Substituindo a integração do acúmulo de biomassa aérea no tempo (Equação 3.3) na Equação 3.2, tem-se a estimativa da disponibilidade de forragem final (DF_n) no tempo t considerado, obtida a partir da Equação 3.4:

$$DF_n = DF_0 + \varepsilon_{CA} \sum_{t=0}^n PAR_i \quad (3.4)$$

Para o desenvolvimento de um modelo de produção real de forragem, onde estima-se a quantidade real de forragem que a vegetação pode produzir em um determinado período de tempo (t), é necessário conhecer a limitação no acúmulo de biomassa que possa haver em decorrência de um déficit hídrico. Para tanto utilizou-se a razão ETP/ETR compondo um índice hídrico com a finalidade de representar a disponibilidade de água no sistema solo-planta-atmosfera, já que a produtividade real da vegetação é altamente relacionada com o status hídrico das plantas.

A razão ETR/ETP apresenta variação finita, entre 0 e 1 e tende a zero à medida que a evapotranspiração real for menor que a evapotranspiração potencial. Assim, quando o índice hídrico for multiplicado a equação do cálculo da produção potencial, irá simular a diminuição na produção de forragem causada pelo déficit hídrico, obtendo-se a estimativa da real produção de fitomassa aérea do dossel.

$$DF_n = \left(DF_0 + \varepsilon_{CA} \sum_{i=0}^n PAR_i \right) * \frac{ETR}{ETP} \quad (3.5)$$

A integração da porção espectral é feita a partir da substituição da disponibilidade de forragem inicial (DF_0) por uma componente espectral, através da relação existente entre os dados espectrais e a quantidade de vegetação existente na superfície. Para fins de demonstração matemática, inicialmente considera-se que uma variável espectral genérica, VE , apresenta uma relação linear com a disponibilidade de forragem inicial (DF_0):

$$DF_0 = a + b * VE_0 \quad (3.6)$$

onde a e b representam os coeficientes linear e angular empíricos da regressão linear.

Utilizando as relações apresentadas nas Equações 3.5 e 3.6, tem-se que a real produção de forragem do dossel passa a ser estimada a partir das

características espectrais da vegetação no tempo $t = 0$, da PAR incidente no intervalo de tempo compreendido entre $0 < t \leq n$, da eficiência de conversão da radiação solar incidente em fitomassa aérea e de um índice hídrico que representa a disponibilidade de água para o dossel, compondo, assim, o modelo JONG:

$$DF_n = \left((a + b * VE_0) + \varepsilon_{CA} \sum_{i=0}^n PAR_i \right) * \frac{ETR}{ETP} \quad (3.7)$$

Um modelo agrometeorológico-espectral semelhante, composto a partir da adição de um termo espectral a um modelo de produtividade foi proposto por Melo et al. (2003), para a cultura da soja, a partir de um modelo semi-determinístico parametrizado para a estimativa da produção final de grãos em condições do Rio Grande do Sul. De forma semelhante ao modelo JONG, no modelo proposto por Melo et al. (2003) a componente espectral é utilizada para estimar a condição da vegetação durante o ciclo fenológico, conforme exposto por Rudorff e Batista (1990), tais como os fatores hídricos e nutricionais aos quais a vegetação foi exposta, que irão determinar o crescimento e a produção final das plantas (Chapin III et al., 1987).

O modelo JONG é válido para estimar a produção de forragem em qualquer formação campestre natural que esteja sob pastejo, sendo necessário para tanto, a parametrização da porção espectral e da eficiência de conversão da radiação solar incidente em fitomassa aérea. Para a aplicação do modelo JONG em pastagens cultivadas torna-se necessário adicionar uma componente que represente o incremento na produção em função do aporte de nutrientes para as plantas, semelhante ao apresentado por Silveira (1999). Também pode ser empregado para qualquer intervalo de tempo considerado, já que para as plantas forrageiras a produção final não pode ser medida somente ao final do ciclo fenológico, mas sim durante o período de crescimento, no qual a vegetação pastejada alterna ciclos sucessivos de desfolhe (em função do pastejo) e rebrote (devido ao crescimento das plantas).

CAPÍTULO 4

ÁREA DE ESTUDO

Para a aplicação do modelo JONG foi selecionada uma área de estudo que apresenta ocorrência de grandes áreas do bioma *Campos Sulinos*, exploradas economicamente como pastagens para a criação de animais, e também, devido à existência de informações prévias como composição florística, mapa de solos, dados climáticos e dados de produção de forragem, necessárias para execução deste estudo.

A área de estudo compreende uma área de aproximadamente 610.000 hectares coberta pela imagem de órbita/ponto 222/82 do satélite Landsat, sobre os municípios de Aceguá, Hulha Negra, Candiota e Bagé, na região da Campanha do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 4.1). As principais atividades de uso da terra são as “pastagens naturais” para a criação extensiva de ovinos e bovinos, as lavouras de arroz e sorgo (IBGE, 2002) e os assentamentos da reforma agrária. Segundo o levantamento da Produção Pecuária Municipal (IBGE, 2004), no ano de 2002 os municípios de Aceguá, Bagé, Candiota e Hulha Negra tinham um efetivo bovino de 549.055 animais, correspondendo, aproximadamente 4% do efetivo total de bovinos do Estado do Rio Grande do Sul neste ano.



FIGURA 4.1 - Localização geográfica da área de estudo (municípios de Bagé, Aceguá, Candiota e Hulha Negra), em destaque.

FONTE: Adaptada de SCP (2004).

O relevo da região varia entre plano a suave ondulado (Macedo, 1984). O clima é subtropical (Cfa), a temperatura do ar média anual para o município de Bagé é de 17,9°C, a temperatura do ar média do mês mais frio (junho) é de 12,3°C e do mês mais quente (janeiro) de 24°C (DNMET, 1992). A precipitação pluvial anual é de 1.460mm (DNMET, 1992), freqüentemente com déficit hídrico climatológico no período do verão (Mota et al., 1970). A Figura 3.3. mostra o curso anual do balanço hídrico do último período normal climatológico (calculado com dados coletados na estação meteorológica do município de Bagé (DNMET, 1992)) ilustrando a sazonalidade da precipitação pluvial e da disponibilidade hídrica para a vegetação nas diferentes épocas do ano.

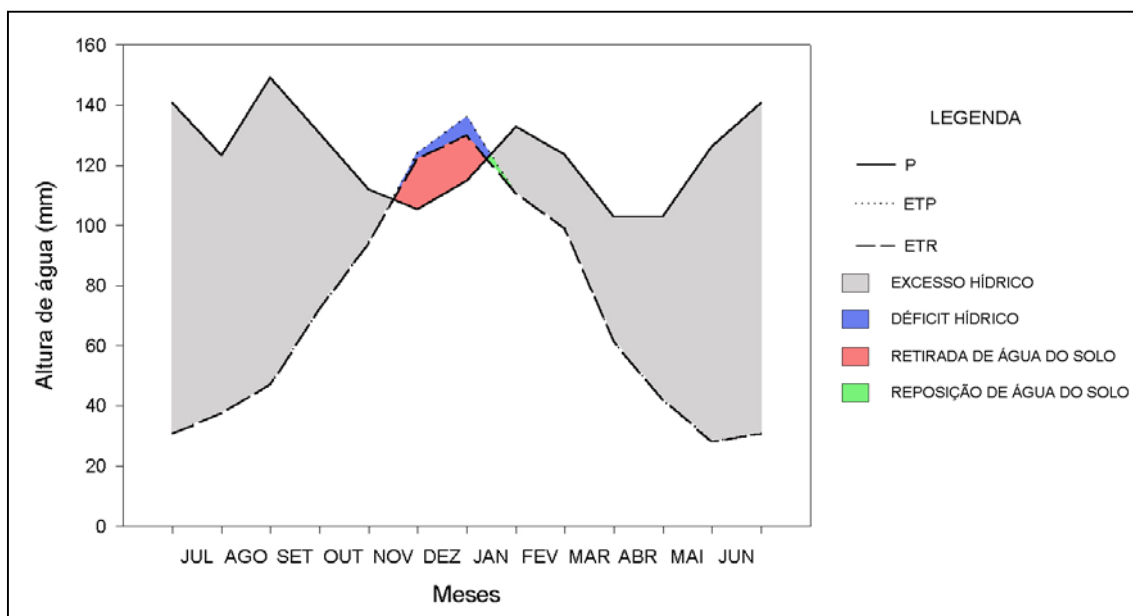


FIGURA 4.2 - Curso anual médio do balanço hídrico climático normal (1961 - 1990) para o Município de Bagé (RS).

Nos próximos quatro capítulos estão as análises da utilização das variáveis agrometeorológicas e espectrais que compõem o modelo JONG, para estimativas da disponibilidade de forragem. No Capítulo 5 é descrita a metodologia de amostragem dos dados da vegetação coletados sobre a área de estudo no período entre outubro de 2002 a março de 2003. No Capítulo 6 estão os cálculos do crescimento da vegetação feitos a partir do submodelo agrometeorológico e a parametrização da eficiência de conversão da radiação incidente em biomassa aérea. No Capítulo 7 são analisadas as relações entre a resposta espectral da vegetação e os dados coletados em campo sendo parametrizado o sub-modelo espectral no Capítulo 8. A parametrização de um modelo é uma técnica que calcula os coeficientes empíricos (parâmetros) que serão utilizados para estimar a resposta do sistema biofísico modelado. A partir desta técnica não é possível produzir resultados precisos para todas as possíveis e complexas condições que possam atuar sobre o sistema, mas pode-se obter resultados precisos para aquelas condições práticas onde o

modelo mais se adequar, a depender da exatidão das relações existentes entre as diferentes variáveis de entrada do modelo proposto (Maas, 1993).

CAPÍTULO 5

COLETA DE DADOS DA VEGETAÇÃO

5.1. Identificação e Mapeamento das Unidades Homogêneas do Bioma *Campos Sulinos* Presentes na Área de Estudo

Em setembro de 2001 foi realizado um trabalho em campo tendo como base a imagem da área de estudos coletada na mesma época no ano anterior (setembro de 2000). Nesta oportunidade foram identificadas duas unidades homogêneas do bioma, sendo uma localizada ao sul da cidade de Bagé (denominada neste trabalho de unidade Campo Sul) e outra ao norte (denominada unidade Campo Norte). Esta divisão é semelhante à apresentada nos levantamentos da vegetação realizados por Girardi-Deiro et al. (1992) e Gonçalves (1998) que fazem a caracterização botânica da área e a descrição da vegetação, sempre associadas ao tipo de solo, tendo como base o levantamento de solos da região, feito por Macedo (1984), uma vez que a vegetação nativa apresenta variações associadas principalmente ao tipo de solo e ao relevo.

Na unidade homogênea Campo Norte, em áreas de relevo mais acidentado a vegetação é formada por mata subtropical arbustiva associada às formações campestres com presença de espécies cespitosas e semi-arbustivas, de baixo valor forrageiro, sendo os gêneros de maior ocorrência: *Aristida*, *Eragrostis*, *Paspalum* e *Andropogon*. Na unidade homogênea Campo Sul nas áreas planas predominam as espécies de alto valor forrageiro, principalmente dos gêneros *Paspalum*, *Axonopus*, *Stipa*, *Briza*, *Desmodium*, *Adesmia*, *Rhynchosia* e *Medicago*, não sendo observada nestas áreas a associação com espécies arbóreas nativas (Girardi-Deiro et al., 1992).

Verificou-se a existência de padrões espectrais distintos para estas diferentes formações campestres, através da análise visual de uma composição colorida

das imagem das bandas 3, 4 e 5 do sensor TM/Landast, adquirida em setembro de 2000 (utilizada como base para os trabalhos em campo de setembro de 2001), na qual foi possível diferenciar além destas formações campestres, as pastagens cultivadas de inverno que ainda vegetavam nesta data, e outras formações vegetais que não são utilizadas como suporte alimentar para a criação de animais, tais como matas ciliares e florestas cultivadas. A Figura 5.1 mostra as variações na resposta espectral apresentadas pelas duas diferentes formações campestres existentes na área de estudo em uma mesma imagem, o que permitiu, através da interpretação visual das imagens de satélite, a identificação e o mapeamento das unidades homogêneas do Bioma.

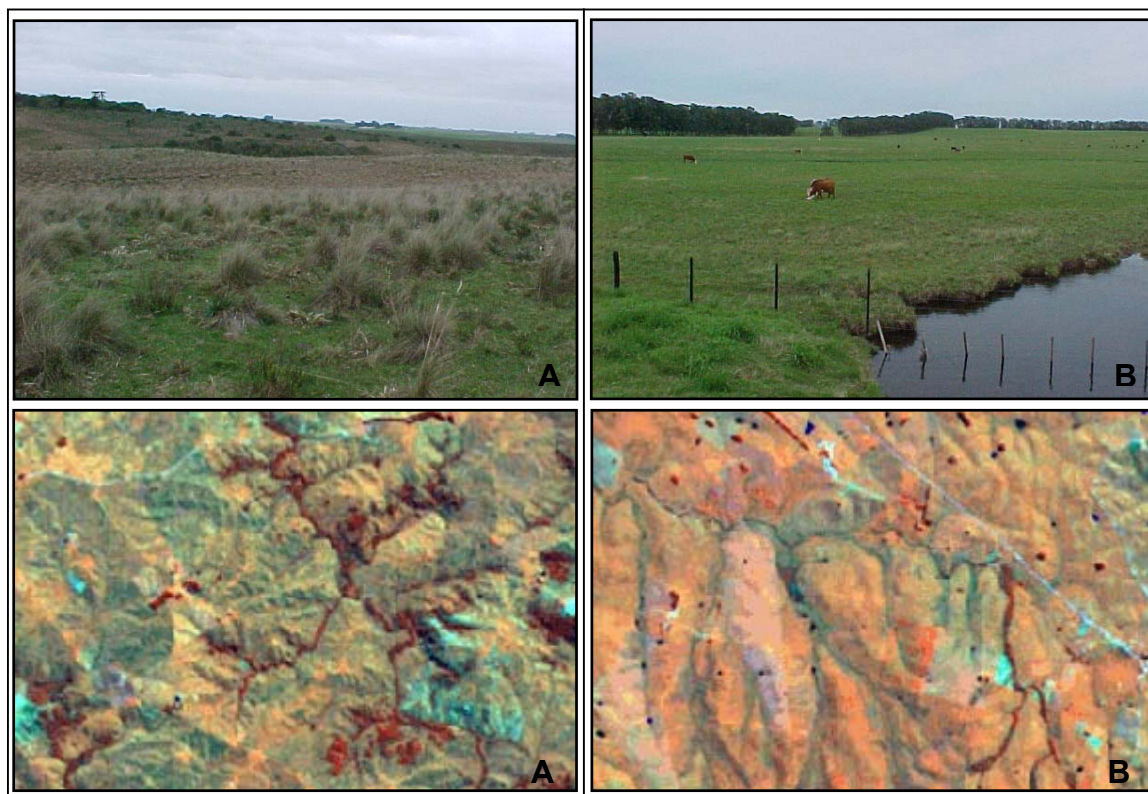


FIGURA 5.1 - Diferenças na resposta espectral na composição colorida das bandas TM3(B),TM4(R),TM5(G) na imagem adquirida em 2 de setembro de 2000, para as duas diferentes formações campestres (A - Campo Norte, B - Campo Sul) presentes na área de estudo.

Para a delimitação das unidades homogêneas do Bioma *Campos Sulinos* existentes na área de estudo a partir das imagens de satélite, foi montado um banco de dados geográficos utilizando o aplicativo Spring, Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (Câmara et al. 1996), com as imagens Landsat referentes à órbita/ponto 222/82 dos anos agrícolas 2000/2001 e 2001/2002 (Tabela 5.1).

TABELA 5.1 - Sensor e data de aquisição do conjunto de imagens Landsat utilizadas nas diferentes etapas do trabalho.

Sensor TM	Sensor ETM+
2/9/2000	31/12/2000
05/11/2000	22/4/2001
09/02/2001	12/8/2001
23/10/2001	19/1/2002
26/12/2001	4/2/2002
	9/4/2002
	11/5/2002
	2/10/2002
	19/11/2002
	6/1/2003
	27/3/2003

As imagens utilizadas neste trabalho foram georreferenciadas utilizando as cartas topográficas da Diretoria do Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (relacionadas no Apêndice A), na escala 1:50.000, como base cartográfica para extração das coordenadas geodésicas dos pontos de controle. As cartas topográficas foram digitalizadas gerando cartas-imagem, as quais foram georreferenciadas, utilizando como pontos de controle os cruzamentos de

paralelos e meridianos que estivessem individualizados na carta-imagem e registradas através de uma função de transformação polinomial do segundo grau, apresentando um erro médio quadrático dos pontos de controle menor que 25 metros. Para a importação das cartas-imagem para o banco de dados utilizou-se o interpolador “bilinear”, que manteve as feições das cartas-imagem homólogas às feições das cartas impressas em papel.

A imagem Landsat do dia 2 de setembro de 2000 foi registrada tendo como base cartográfica as cartas-imagens previamente registradas. As feições homólogas foram selecionadas como pontos de controle, sendo principalmente cruzamentos de estradas secundárias e pontes. Para o cálculo das coordenadas das imagens utilizou-se um polinômio de transformação de segundo grau, observando-se um erro médio quadrático dos pontos de controle menor que 30 metros. A transferência dos valores digitais dos pixels originais para a nova posição corrigida foi realizada utilizando o interpolador “vizinho mais próximo”, visando preservar ao máximo os valores radiométricos da imagem original (Chuvieco, 1996). As demais imagens correspondentes à órbita/ponto 222/82 foram registradas tendo como base a imagem do dia 2 de setembro de 2000, utilizando como pontos de controle os cruzamentos de pixels que eram facilmente identificados em ambas imagens e os mesmos procedimentos já descritos para o cálculo das coordenadas da imagem e para a transferência dos valores digitais.

A carta temática com as diferentes formações vegetais existentes na área de estudo que representam as unidades homogêneas do bioma (Figura 5.2) foi composta a partir da interpretação visual da série multitemporal de imagens do conjunto 2000/2002, considerando principalmente a resposta espectral da vegetação. Também foram utilizadas as informações coletadas no trabalho em campo realizado em setembro de 2001, os limites das unidades de solo obtidos a partir do mapa de solos da região, na escala 1:50.000 (Macedo, 1984) e as variações do relevo, obtidas a partir das cartas topográficas.

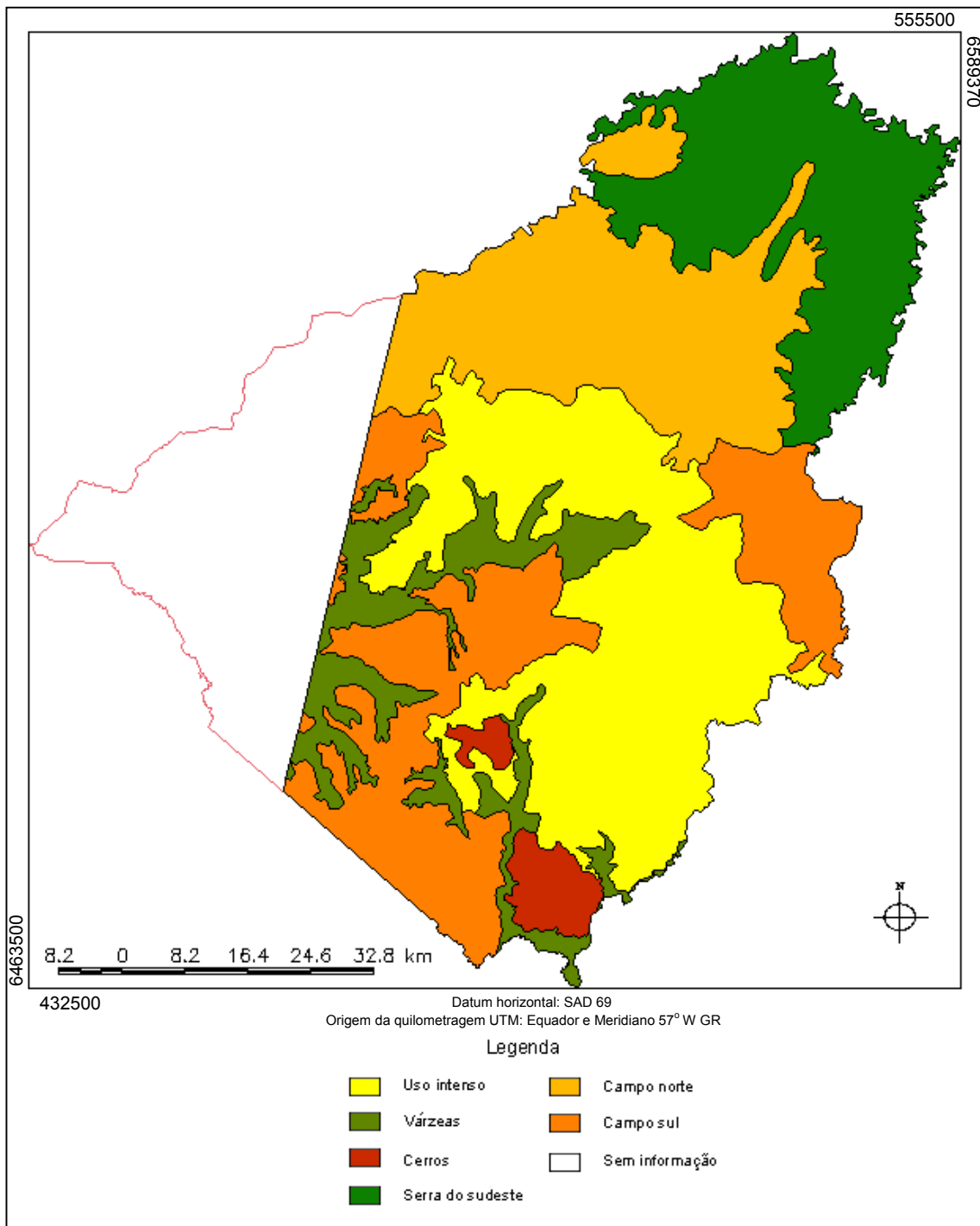


FIGURA 5.2 - Carta temática apresentando as diferentes unidades homogêneas de vegetação e uso existentes na área de estudo.

A partir da análise das imagens de satélite foi identificada uma área de uso intenso com culturas anuais, estendendo-se principalmente sobre a unidade Campo Sul, tornando esta unidade a mais fragilizada, pela ação antrópica (Boldrini, 1997). Foi verificado nos trabalhos em campo o estabelecimento de assentamentos de reforma agrária sobre a unidade campo norte, mas não foi verificada a substituição da vegetação nativa por culturas anuais, provavelmente devido aos assentamentos terem sido recém implantados.

5.2. Delineamento Experimental e Descrição das Unidades Amostrais

Objetivando as análises das relações entre a biomassa medida em campo e a resposta espectral da vegetação, os trabalhos em campo foram programados para datas simultâneas as datas de passagem do satélite Landsat 7 sobre a área de estudo. O período de coleta de dados correspondeu ao período de maior crescimento da vegetação que ocorre durante as estações da primavera e verão, totalizando aproximadamente 6 meses (Figura 5.3). Devido à alta incidência de nuvens e de dias chuvosos na região, que impossibilitam a aquisição de imagens pelo satélite, foram realizados apenas quatro trabalhos em campo para coleta de dados da vegetação referentes as imagens dos dias 2 de outubro de 2002, 19 de novembro de 2002, 6 de janeiro de 2003 e 27 de março de 2003.

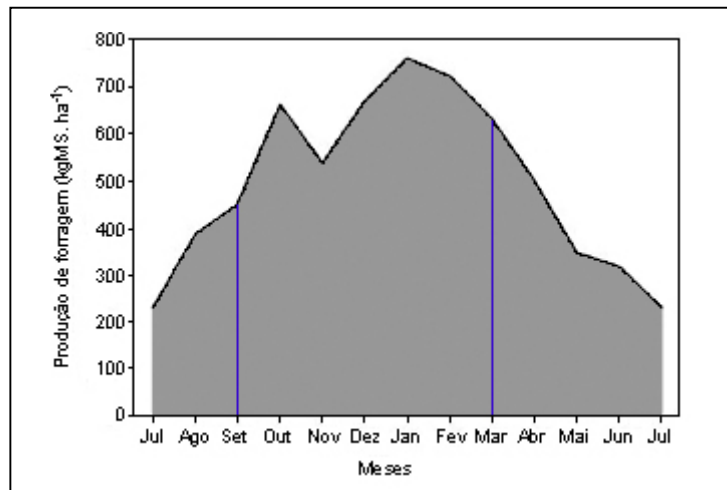


FIGURA 5.3 - Curva média de produção de forragem, medida no período entre 1984 a 1988, no município de Bagé (RS). Em destaque o período de maior produção de biomassa aérea da vegetação.

FONTE: Machado, (1999).

Foram delimitadas 15 unidades amostrais, posicionadas no interior de poteiros (ou piquetes) que na época da coleta de dados estavam sob pastejo. Estes poteiros possuíam área entre 50 e 600 hectares, estando localizados em propriedades particulares presentes no interior da unidade homogênea Campo Sul, sendo as unidades amostrais posicionadas com o consentimento dos proprietários. As unidades amostrais foram delimitadas durante o trabalho em campo de outubro de 2002, as quais foram posicionadas considerando a uniformidade da área com relação ao relevo e à composição florística, tendo em média uma área de 1,6 hectares. As coordenadas geodésicas referentes aos limites das unidades amostrais foram obtidas com o auxílio de um receptor de GPS portátil e a posição inserida no banco de dados geográficos. As medições de biomassa foram realizadas nestas unidades amostrais nos quatro trabalhos em campo de coleta de dados, totalizando assim 60 pontos amostrais (15 unidades amostrais x 4 datas de coleta de dados). A Tabela 5.2 descreve as unidades amostrais quanto à área e unidade de mapeamento de solos (Macedo, 1984) e a localização das unidades amostrais e da estação

meteorológica automática que foi utilizada neste trabalho, estão apresentadas na Figura 5.4.

TABELA 5.2 - Localização, área e unidade de mapeamento das unidades amostrais.

Unidade amostral	Localização*	Área (ha)	Unidade de mapeamento
1	ESJ	1,7	Bagé (BG)
2	ESJ	1,6	Planossolo (PL)
3	ESJ	1,5	Planossolo (PL)
4	ESJ	3,2	Bagé (BG)
5	ESJ	1,6	Bagé (BG)
6	ESJ	2,1	Bagé (BG)
7	ER	1,4	Hulha Negra (HN)
8	ER	2,3	Hulha Negra (HN)
9	ER	2,6	Hulha Negra (HN)
10	ER	1,4	Planossolo (PL)
11	ER	1,3	Hulha Negra (HN)
12	CC	1,2	Planossolo (PL)
13	CC	0,9	Planossolo (PL)
14	CC	1,1	Planossolo (PL)
15	CC	1,0	Planossolo (PL)

* ESJ – Estância São José, ER – Estância Redenção, CC – Cabanha Chácara

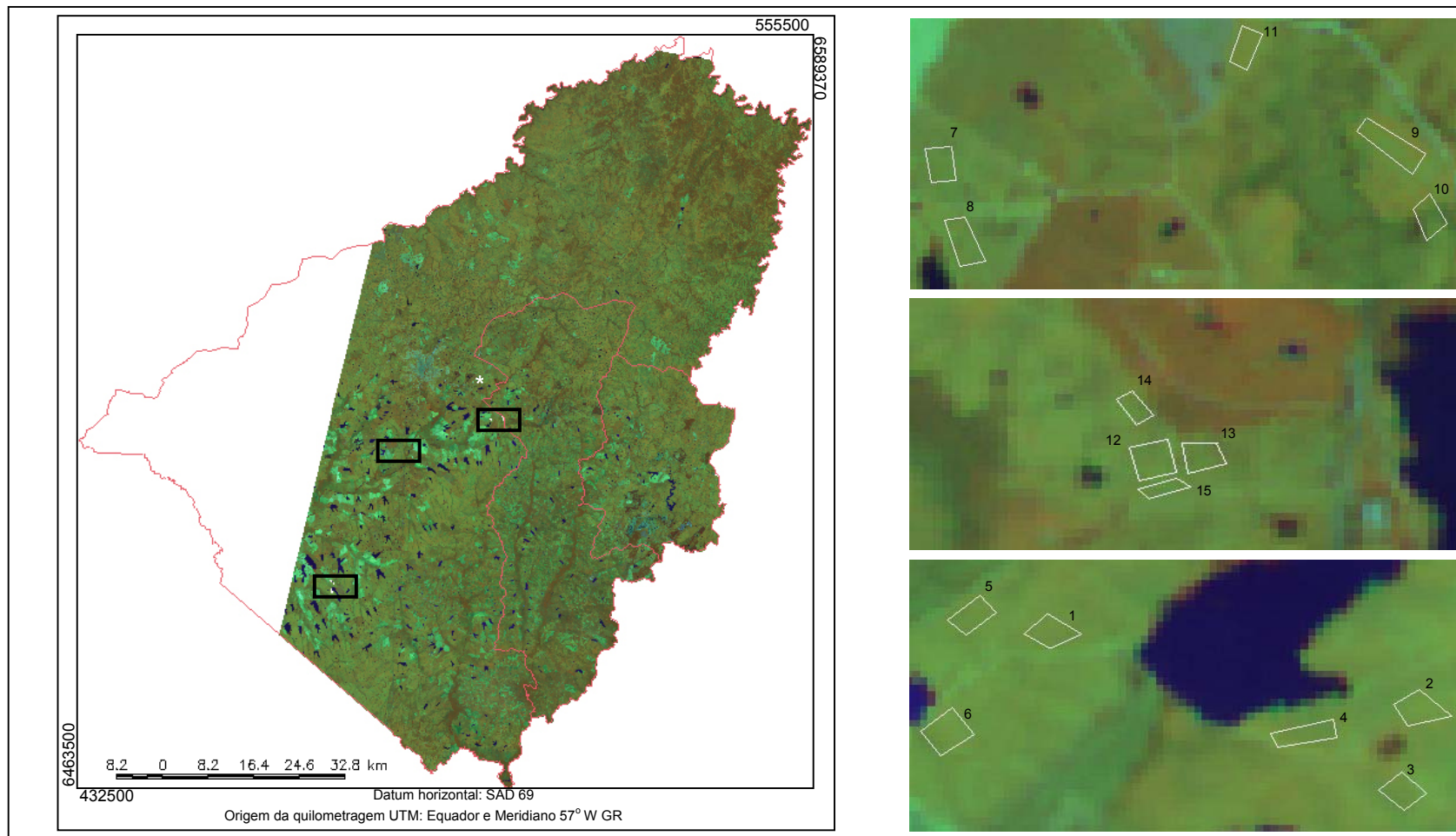


FIGURA 5.4 - Localização das 15 unidades amostrais e da estação meteorológica automática (*), sobre a imagem ETM+/Landsat, adquirida em outubro de 2002, composição 3B4R5G.

A correspondência entre as unidades de mapeamento e o tipo de solo é apresentada na Tabela 5.3, utilizando a nomenclatura de solos do atual sistema brasileiro de classificação de solos (Embrapa, 1999), mas mantendo as adjetivações da classificação original para não haver perda de informação. A Tabela 5.4 descreve a composição florística do período estival das unidades amostrais, considerando somente as espécies de alto valor forrageiro, segundo levantamento apresentado por Gonçalves (1998). A abundância das espécies foi descrita pelo autor utilizando a seguinte escala: 1 - muito rara; 2 - rara; 3 - pouco freqüente; 4 - abundante; 5 - muito abundante e estão associadas ao tipo de solo das unidades amostrais.

TABELA 5.3 - Tipo de solo das unidades de mapeamento.

Unidade de mapeamento	Tipo de solo
Bagé (BG)	Planossolo Háplico, textura argilosa
Hulha Negra (HN)	Chernossolo Ebânico, substrato silfítico
Planossolo (PL)	Planossolo Hidromórfico eutrófico

TABELA 5.4 - Composição florística de acordo com a unidade de mapeamento das unidades amostrais.

Espécie	Família	PL	BG	HN
<i>Axonopus affinis</i>	Gramineae	5	5	5
<i>Axonopus compressus</i>	Gramineae	5	-	-
<i>Axonopus fissifolius</i>	Gramineae	-	3	-
<i>Chloris bahiensis</i>	Gramineae	2	3	-
<i>Chloris cantherae</i>	Gramineae	2	2	-
<i>Coelorachis selloana</i>	Gramineae	2	4	-
<i>Paspalum notatum</i>	Gramineae	5	5	5
<i>Paspalum dilatatum</i>	Gramineae	4	5	5
<i>Paspalum plicatulum</i>	Gramineae	1	4	-
<i>Panicum demissum</i>	Gramineae	-	3	3
<i>Stenotaphrum secundatum</i>	Gramineae	1	-	1
<i>Desmodium incanum</i>	Leguminosae	4	2	4
<i>Galactia marginalis</i>	Leguminosae	2	5	4
<i>Rhynchosia diversifolia</i>	Leguminosae	-	4	3

FONTE: Adaptada de Gonçalves (1998).

5.3. Coleta dos Dados em Campo e Cálculo da Disponibilidade de Forragem

Em cada unidade amostral foram coletadas 5 amostras de disponibilidade de forragem, em cada um dos trabalhos em campo. O número de amostras foi definido em função do tempo de execução dos trabalhos em campo, os quais tinham duração de dois dias, a partir da data de passagem do satélite, com o objetivo de amostrar a disponibilidade de forragem do momento da passagem do satélite sobre a área de estudos. Observou-se durante a realização dos

trabalhos que devido a alta variabilidade natural da vegetação o número de amostras deveria ter sido maior, sendo que o número de amostras coletadas não inviabilizou as análises posteriores.

Para a coleta das amostras foi utilizado um quadrado de ferro de 0,50 metros de lado, que delimitava uma área no terreno (Figura 5.5A), onde toda a vegetação era cortada com o auxílio de uma tesoura, rente ao solo, ficando após o corte um resíduo (Figura 5.5B), a semelhança do resíduo deixado pelos animais em pastejo (Machado, 1999). Para a casualização das amostras no interior das unidades amostrais o quadrado era posicionado de acordo com o caminhar aleatório feito na área das unidades amostrais. Foram coletadas somente amostras de disponibilidade de forragem já que estas são as espécies vegetais mais abundantes no dossel (Tabela 5.4). Na ocorrência de uma espécie não pastejada pelos animais (como por exemplo o gravatá, *Eryngium ssp.* ou a carqueja, *Baccharis ssp.*) no interior da amostra, esta era descartada e uma amostra diferente era coletada, não sendo esta uma situação freqüente nos trabalhos em campo.

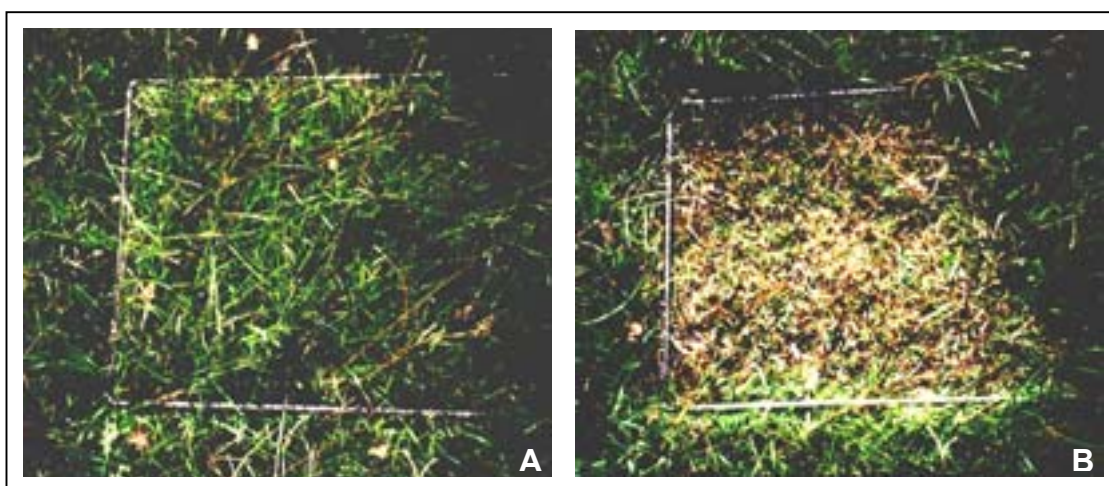


FIGURA 5.5 - Detalhes da coleta de amostras da disponibilidade de forragem, (A) antes do corte, (B) depois do corte.

As amostras de vegetação coletadas foram secas em estufas com ar forçado, a uma temperatura de 70°C por três dias, com o objetivo de retirar a água dos

tecidos, sendo em seguida pesadas em uma balança de precisão, obtendo-se a quantidade de matéria seca, em gramas por metro quadrado (gMS.m²). A partir destas amostras foi calculada a média da biomassa por unidade amostral (em gramas de matéria seca por hectare, gMS.ha⁻¹) e convertidas para disponibilidade de forragem média da unidade amostral, em quilogramas de matéria seca por hectare (kgMS.ha⁻¹), cujos valores estão apresentados na Tabela 5.5.

TABELA 5.5 - Disponibilidade de forragem (kgMS.ha⁻¹) medida em campo nas diferentes datas de coleta de dados.

Unidade amostral	02/out	19/nov	06/jan	27/mar
1	835,2	706,4	511,2	1203,2
2	453,6	801,6	805,6	1776,0
3	655,2	512,8	640,8	1621,6
4	544,0	691,2	579,2	1764,0
5	547,2	522,4	474,4	1087,2
6	458,4	1078,4	591,2	1707,2
7	1024,0	652,8	857,6	2990,4
8	651,2	558,4	667,2	2919,2
9	612,0	640,8	770,4	2999,2
10	324,8	383,2	1150,4	3349,6
11	769,6	1225,6	1188,8	3632,8
12	668,0	937,6	885,6	1920,8
13	660,0	613,6	695,2	1753,6
14	503,2	1016,0	547,2	1632,0
15	675,2	932,8	413,6	2060,0
Média	625,4	751,56	718,6	2161,1

CAPÍTULO 6

CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE DE FITOMASSA AÉREA A PARTIR DO SUB-MODELO AGROMETEOROLÓGICO

6.1. Cálculo das Variáveis Agrometeorológicas

Os dados climáticos foram coletados por uma estação meteorológica automática instalada na sede da Embrapa Pecuária Sul, no município de Bagé (s31°20'50"; w54°00'45"), também localizada no interior da unidade homogênea Campo Sul (indicada na Figura 5.4). Foram coletados os dados de precipitação pluvial, temperatura média do ar, radiação solar incidente, velocidade do vento e umidade relativa do ar, que eram armazenados no acumulador de dados a cada 2 horas.

A partir dos dados coletados foram calculadas as variáveis climáticas: total diário de precipitação pluvial (mm) e de radiação global (MJ.m^{-2}), através do somatório dos valores horários, e a média diária da umidade relativa do ar (%), da velocidade do vento (km.h^{-1}) e da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), através da média aritmética dos valores horários.

Os valores diários da Radiação Fotossinteticamente Ativa Incidente (PAR_i) foi calculada a partir da relação estabelecida por França et al. (1997) entre esta fração da radiação e a radiação global (R_g):

$$\text{PAR}_i = 0,42 R_g \quad (6.1)$$

Os valores diários de Evapotranspiração Potencial (ETP) foram estimados utilizando o método combinado, proposto por Penman (1956), a partir dos dados diários de radiação global, da temperatura do ar, vento e umidade relativa do ar.

$$ETP = \frac{1}{59} * \frac{\frac{\Delta}{\gamma} + Rg + Ea}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad (6.2)$$

onde:

$\frac{1}{59}$ = transformação da energia na altura equivalente de água evaporada

Δ = coeficiente angular da curva que relaciona a pressão de saturação de vapor e a temperatura média do ar

γ = constante psicrométrica = $8,0 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (psicrômetro aspirado)

Rg = radiação global ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)

Ea = poder evaporante diário do ar ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), dado por:

$$Ea = 20,65 \left(K + \frac{V_2}{160} \right) (e_s - e) \quad (6.3)$$

onde:

K = fator de rugosidade da superfície (0,5 para água)

V_2 = total de vento percorrido diário a 2 metros de altura (km.dia^{-1})

e_s = tensão de saturação de vapor d'água para temperatura média do ar (mmHg)

e = tensão média diária de vapor d'água (mmHg)

Os valores de tensão de vapor d'água são função da temperatura do ar e da umidade relativa do ar e são calculados a partir das seguintes relações:

$$UR = \frac{e}{e_s} * 100 \quad (6.4)$$

$$e_s = 4,58 * 10^{[(7,5 T)/(235,5+T)]} \quad (6.5)$$

onde:

T = temperatura média do ar (°C)

A Evapotranspiração Real (*ETR*) foi calculada a partir da técnica do balanço hídrico climático (Thornthwaite e Mather, 1957). Para o cálculo do balanço hídrico os dados climáticos de entrada (precipitação e evapotranspiração potencial) necessitam estarem agrupados em períodos de tempo superiores a cinco dias (Cunha, 1992). Assim, os dados climáticos diários foram agrupados em períodos de dezesseis dias (definido a partir da resolução temporal do satélite Landsat), com a data de início correspondente à data do primeiro trabalho em campo para coleta de dados da vegetação (2 de outubro de 2002).

O balanço hídrico começou a ser calculado a partir do dia 1 de setembro de 2002, correspondendo a dois períodos, de dezesseis dias, de antecedência da primeira data de coleta de dados da vegetação, para estabilizar a resposta das variáveis calculadas. Foi utilizado 75 mm como valor inicial da Capacidade de Armazenamento de Água no Solo (CAD). A data final do cálculo do balanço hídrico 27 de abril de 2003 refere-se a dois períodos após a data do último trabalho em campo para coleta de dados. Os resultados do cálculo do balanço hídrico climático estão apresentados na Figura 6.1, considerando os quinze períodos de dezesseis dias existentes no período de coleta de dados em campo. A planilha de cálculos do balanço hídrico é apresentada no Apêndice B.

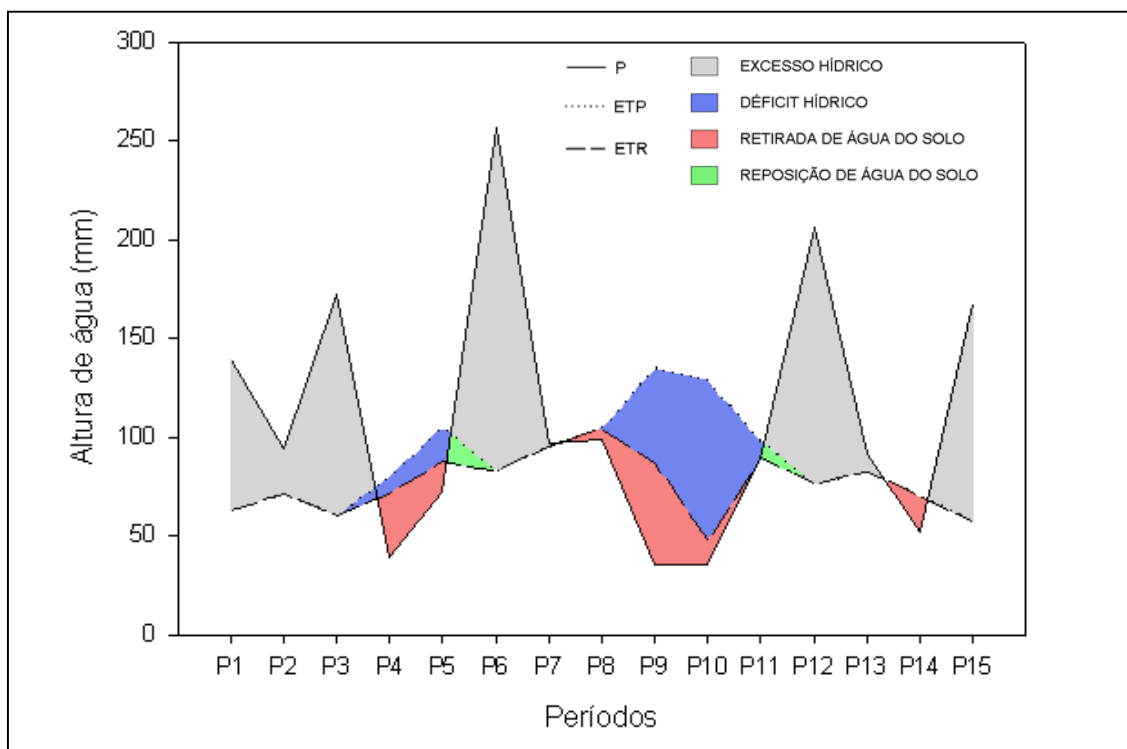


FIGURA 6.1 - Curso diário do balanço hídrico climático para o período de 2 de outubro de 2002 (P1) a 27 de abril de 2003 (P15).

A necessidade de agrupar os dados climáticos para o cálculo do balanço hídrico climático definiu a escala de tempo na qual o crescimento da vegetação será avaliado como sendo de dezesseis dias. Com isso, todas as variáveis climáticas foram re-agrupadas para períodos de dezesseis dias e estão apresentadas na Tabela 6.1, que apresenta também a data inicial e final referente a cada período de tempo considerado.

TABELA 6.1 - Valores das variáveis agrometeorológicas e período em dias utilizado para cálculo das variáveis.

Datas	Período	Chuva Total (mm)	ETP Total (mm)	ETR Total (mm)	R_Solar Total (MJ.m ⁻²)	V_Vento Média (km.dia ⁻¹)	Um_Rel Média (%)	TempAr Média °C
01/set - 15/set	P1	139,3	62,7	62,7	240,4	185,1	77,1	11,3
16/set - 01/out	P2	94,2	71,1	71,1	249,3	132,0	73,6	14,9
02/out - 17/out	P3	172,1	60,4	60,4	200,0	112,4	85,5	19,4
18/out - 02/nov	P4	39,1	80,0	71,1	274,9	137,2	78,6	17,4
03/nov - 18/nov	P5	71,7	104,9	87,7	331,3	188,4	70,7	18,7
19/nov - 04/dez	P6	256,8	82,6	82,6	266,7	167,7	80,6	20,0
05/dez - 20/dez	P7	97	95,4	95,4	311,0	136,0	78,0	20,2
21/dez - 05/jan	P8	98,3	104,3	104,3	339,3	137,0	73,0	20,0
06/jan - 21/jan	P9	34,9	135,0	86,9	427,7	113,8	68,0	22,4
22/jan - 06/fev	P10	35,5	128,6	47,5	392,5	131,2	67,6	23,9
07/fev - 22/fev	P11	88,4	97,8	89,4	301,9	155,8	72,1	20,8
23/fev - 10/mar	P12	206,4	76,2	76,2	240,0	98,7	82,8	22,8
11/mar - 26/mar	P13	91,6	82,1	82,1	273,8	123,8	76,8	18,7
27/mar - 11/abr	P14	52,2	71,4	70,2	241,8	133,7	78,7	17,1
12/abr - 27/abr	P15	167,3	56,9	56,9	192,4	114,7	78,5	17,1

6.2. Cálculo da Eficiência de Conversão de Radiação Incidente em Biomassa Aérea (ϵ_{CA})

Para o cálculo da ϵ_{CA} da vegetação (apresentada na Equação 2.4) da unidade homogênea Campo Sul, foram utilizados os dados de produção de biomassa coletados pelo pesquisador Eduardo Salomoni na área física da Embrapa

Pecuária Sul, no período de janeiro de 1985 a dezembro de 1988. Estes dados foram coletados sempre no primeiro dia útil do mês, com auxílio de gaiolas de exclusão ao pastejo, sendo esta metodologia de coleta dos dados descrita por Machado (1999). A ε_{CA} foi calculada a partir da relação demonstrada nas Equações 2.2 e 2.4, a partir dos valores mensais da *PAR* incidente e da biomassa aérea.

$$\varepsilon_{CA} = \frac{MSAm}{PAR_{im}} \quad (6.6)$$

onde:

MSAm é a matéria seca acumulada no mês *m*

PAR_{im} = *PAR* incidente na superfície, no mês *m*

Os dados climáticos diários da temperatura média do ar (°C), precipitação pluvial (mm), insolação (horas), umidade relativa do ar (%) e velocidade do vento (km.h⁻¹), referentes ao período da coleta destes dados (janeiro de 1985 a dezembro de 1988), obtidos a partir da Estação Meteorológica de Bagé também foram cedidos pelo pesquisador. A partir dos dados diários de insolação e da latitude da sede da Embrapa Pecuária Sul foi calculada a radiação global, a qual foi convertida em radiação fotossinteticamente ativa incidente utilizando a relação apresentada na Equação 6.1.

Para o cálculo da estimativa da radiação global, foi estimada inicialmente a Radiação Incidente no Topo da Atmosfera (*R_o*), a partir da latitude e do dia Juliano, utilizando as equações apresentadas por Vianello e Alves (1991).

$$R_o = \frac{0,0864}{\pi} S \left(\frac{\bar{D}}{D} \right)^2 (H \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin H) \quad (6.7)$$

onde:

$S = \text{constante solar} = 1.367 \text{ W.m}^{-2}$

$\bar{D} = \text{Distância média entre a Terra e o Sol} = 1 \text{ UA}$

$D = \text{Distância entre a Terra e o Sol (UA) no dia Juliano considerado}$

$\phi = \text{latitude local (graus)}$

$H = \text{ângulo horário (rad), dado por:}$

$$\cos H = -\text{tg}\phi \text{ tg}\delta \quad (6.8)$$

$\delta = \text{declinação solar, dada por:}$

$$\delta = 23,45 \text{ sen} \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (6.9)$$

onde:

$n = \text{dia Juliano}$

Para estimar a radiação solar incidente na superfície da Terra (radiação global) utilizou-se a Equação 6.10, apresentada por Tubelis e Nascimento (1984) e os coeficientes $a = 0,25$ e $b = 0,38$ calculados por Moacir Berlato (professor do Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia da UFRGS) e não publicados (Fontana, 1998).

$$R_g = R_o \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (6.10)$$

onde:

$R_g = \text{radiação global (cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1})$

$R_o = \text{radiação solar incidente no topo da atmosfera (cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1})$

n = insolação diária (horas)

N = duração máxima do fotoperíodo (horas), calculado por:

$$N = \frac{2H}{15} \quad (6.11)$$

onde:

H = ângulo horário (Equação 6.8)

A partir dos valores mensais de radiação fotossinteticamente ativa incidente (MJ.m^{-2}) e de produção de biomassa aérea (gMS.m^{-2}), foi calculada a ϵ_{CA} , utilizando a Equação 6.6 para cada mês do período compreendido entre janeiro de 1985 a dezembro de 1988, cujos resultados são apresentados na Tabela 6.2.

TABELA 6.2 - Valores mensais da eficiência de conversão da PAR incidente em biomassa aérea (gMS.MJ⁻¹) para o período de janeiro de 1985 a dezembro de 1988.

Mês	1985	1986	1987	1988
Janeiro	0,09	0,28	0,25	0,50
Fevereiro	0,27	0,40	0,50	0,18
Março	0,10	0,37	0,50	0,29
Abril	0,23	0,37	0,53	0,36
Maio	0,12	0,36	0,27	0,43
Junho	0,22	0,51	0,39	0,25
Julho	0,15	0,24	0,22	0,23
Agosto	0,60	0,40	0,23	0,18
Setembro	0,32	0,30	0,32	0,24
Outubro	0,27	0,51	0,24	0,21
Novembro	0,12	0,27	0,38	0,13
Dezembro	0,23	0,30	0,26	0,14

O grande intervalo de variação dos valores calculados (0,09 - 0,60) é devido aos valores de produção de biomassa e de partição da biomassa variarem conforme as condições ambientais vigentes, já que o padrão de partição de biomassa é integrado aos demais processos que ocorrem nas plantas, apresentando variação temporal regulada pelos suprimento e demanda por água e nutrientes das plantas (Reynolds e D'Antonio, 1996). A eficiência de conversão da radiação incidente em biomassa aérea tem implícito no seu cálculo os conceitos de partição de biomassa da vegetação (razão de alocação de fotoassimilados entre as raízes e a parte aérea do dossel), por considerar

somente a quantidade de biomassa aérea produzida e não a biomassa total (composta pela biomassa de raízes e biomassa aérea).

O uso de um valor fixo para a eficiência de conversão de radiação em biomassa aérea em modelos agrometeorológicos-espectrais só é válido para estimativas anuais da produtividade, não sendo indicado no caso de estimativas para intervalos de tempo menores que um ano (Nouvellon et al., 2000), devido existir uma variação na conversão da radiação solar incidente em biomassa aérea conforme os diferentes estádios do ciclo fenológico da vegetação (Le Roux et al., 1997), também verificada neste trabalho (como demonstram os valores apresentados na Tabela 6.2). Por esta razão, para a estimativa da disponibilidade de forragem da principal estação de crescimento da vegetação campestre a partir do sub-modelo agrometeorológico foi selecionado o máximo valor mensal da ε_{CA} calculado (apresentados na Tabela 6.2), o que garante que a influência dos fatores limitantes ao crescimento foram mínimas. Os valores selecionados para os diferentes períodos analisados estão apresentados na Tabela 6.3.

TABELA 6.3 - Valores da eficiência da conversão da PAR incidente em biomassa aérea utilizados para a parametrização.

Período	ID Período	ϵ_{CA} (gMS.MJ ⁻¹)	ϵ_{CA} (kgMS.MJ ⁻¹)
01/set - 15/set	P1	0,32	320
16/set - 01/out	P2	0,32	320
02/out - 17/out	P3	0,51	510
18/out - 02/nov	P4	0,51	510
03/nov - 18/nov	P5	0,38	380
19/nov - 04/dez	P6	0,38	380
05/dez - 20/dez	P7	0,30	300
21/dez - 05/jan	P8	0,30	300
06/jan - 21/jan	P9	0,50	500
22/jan - 06/fev	P10	0,50	500
07/fev - 22/fev	P11	0,50	500
23/fev - 10/mar	P12	0,50	500
11/mar - 26/mar	P13	0,50	500
27/mar - 11/abr	P14	0,53	530
12/abr - 27/abr	P15	0,53	530

A partir da análise da Figura 6.2 observa-se que os valores de eficiência selecionados têm o mesmo padrão temporal de variação que a produção média das pastagens entre o período de 1985 a 1988. Isto mostra que a definição do máximo valor mensal da variável ϵ_{CA} nas diferentes épocas da estação de crescimento da vegetação tornou esta variável menos sensível às variações climáticas interanuais. Com isso tem-se que os valores de ϵ_{CA} , selecionados

representam adequadamente a eficiência de conversão da radiação solar incidente em biomassa aérea média para cada período de coletada de dados.

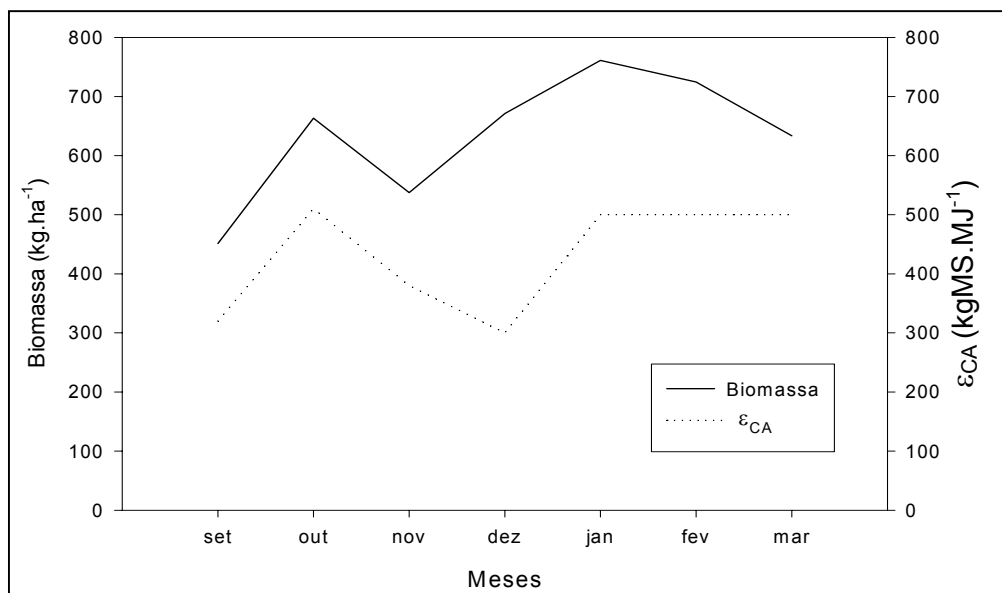


FIGURA 6.2 - Variação dos valores da produção média de biomassa do período 1985-88 e dos valores de eficiência de conversão da radiação em biomassa aérea utilizados no modelo JONG.

Os valores da eficiência de conversão da radiação em biomassa aérea foram calculados com os dados de biomassa coletados sobre o solo da unidade de mapeamento Bagé e foram utilizados para os cálculos do crescimento da vegetação em toda a unidade homogênea Campo Sul, que conforme apresentado na Tabela 5.3 apresenta três tipos de solos distintos. Como o cálculo da eficiência de conversão da radiação em biomassa aérea tem implícito conceitos de nutrição da vegetação e de partição de biomassa, os quais são dependentes não só do tipo de vegetação, mas também do tipo de solo (que irá interferir diretamente na disponibilidade de nutrientes e água para as plantas), torna-se necessário calcular um valor de eficiência para cada tipo de solo da área de estudo, para os diferentes meses do ano.

6.3. Estimativa da Disponibilidade de Forragem a partir dos Dados Agrometeorológicos

A partir da disponibilidade inicial de forragem coletada em campo (apresentada na Tabela 4.5), das variáveis agrometeorológicas calculadas com os dados coletados na estação meteorológica automática (Tabela 5.1) e dos valores de eficiência de conversão da PAR incidente em biomassa aérea apresentados na Tabela 5.3 foram calculados os valores da estimativa da real disponibilidade de forragem para as 15 unidades amostrais, a partir da Equação 4.5 (submodelo agrometeorológico), para um período de tempo de 16 dias, considerando como data inicial do período a data de passagem do satélite Landsat 7 sobre a área de estudos (apresentados na Tabela 6.4). A estimativa da real disponibilidade de forragem foi calculada somente para aqueles períodos em que se tinham coletados em campo os dados de disponibilidade de forragem inicial (períodos 3, 6, 9 e 14).

TABELA 6.4 - Valores da estimativa da disponibilidade de forragem real (kgMS.ha⁻¹) para as 15 unidades amostrais para períodos de 16 dias obtidos a partir do submodelo agrometeorológico.

Unidade amostral	P3 (02/10 - 17/10)	P6 (19/11 - 04/12)	P9 (06/01 - 21/01)	P14 (27/03 - 11/04)
1	1263,6	1132,1	907,2	1682,3
2	882,0	1227,3	1096,7	2245,4
3	1083,6	938,5	990,6	2093,6
4	972,4	1116,9	951,0	2233,6
5	975,6	948,1	883,5	1568,2
6	886,8	1504,1	958,7	2177,8
7	1452,4	1078,5	1130,2	3439,4
8	1079,6	984,1	1007,6	3369,4
9	1040,4	1066,5	1074,0	3448,1
10	753,2	808,9	1318,6	3792,6
11	1198,0	1651,3	1343,4	4071,0
12	1096,4	1363,3	1148,2	2387,8
13	1088,4	1039,3	1025,6	2223,4
14	931,6	1441,7	930,4	2103,9
15	1103,6	1358,5	844,4	2524,7

O crescimento médio estimado pelo submodelo agrometeorológico foi de 428,4 kgMS.ha⁻¹ para o período de 2 a 17 de outubro, 425,7 kgMS.ha⁻¹ para o período de 19 de novembro a 4 de dezembro, 322,1 kgMS.ha⁻¹ para o período de 6 a 21 de janeiro e 462,9 kgMS.ha⁻¹ para o período de 27 de março a 11 de

abril para as quinze unidades amostrais. Os crescimentos médios diários estimados foram agrometeorológico foi de 26,7 kgMS.ha⁻¹ para o período de 2 a 17 de outubro, 26,6 kgMS.ha⁻¹ para o período de 19 de novembro a 4 de dezembro, 20,1 kgMS.ha⁻¹ para o período de 6 a 21 de janeiro e 28,9 kgMS.ha⁻¹ para o período de 27 de março a 11 de abril. As variações das estimativas entre as unidades amostrais para um mesmo período são função da disponibilidade de forragem inicial medida dentro de cada unidade amostral (apresentadas na Tabela 4.5).

Para a vegetação campestre do bioma Campos Sulinos, Moojen (1991) mediu um crescimento médio diário de 24 kgMS.ha⁻¹ para o período de 06 de dezembro de 1989 a 28 de março de 1990, na Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, localizada no município de Eldorado do Sul. No mesmo local Corrêa (1993) mediu um crescimento médio diário de 13,3 kgMS.ha⁻¹ para o período de 17 de setembro de 1990 a 28 de maio de 1991 e Setelich (1994) mediu um crescimento médio diário de 16,5 kgMS.ha⁻¹ para o período de 29 de setembro de 1992 a 30 de abril de 1993. Os resultados destes autores não podem ser utilizados para discussão dos resultados obtidos neste trabalho, já que foram obtidos em um local distinto da área de estudos do presente trabalho, sendo apresentados com a finalidade de ilustrar a variabilidade das taxas de crescimento da vegetação campestre natural medidas em diferentes anos em um mesmo local.

6.4. Dados do Modelo de Previsão Climática Eta

Visando testar a aplicabilidade dos dados de previsão climática utilizou-se como fonte de dados meteorológicos os resultados do modelo de previsão climática regional do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), o modelo Eta, que fornece a previsão climática com uma antecedência de até 3 meses, numa grade horizontal de 40 por 40 km (CPTEC, 2003). Foram utilizados os valores de radiação solar incidente de ondas curtas, substituindo os valores de radiação coletados na estação meteorológica

automática. Foram testados somente os dados do período entre 6 a 21 de janeiro (referentes ao período 9) devido à disponibilidade de dados oriundos do modelo.

Os dados foram recebidos do CPTEC em arquivos ASCII onde, para cada ponto da grade (identificados com as coordenadas de latitude e longitude) foram fornecidos os valores previstos da radiação incidente de ondas curtas ($W.m^{-2}$), para os horários 0, 6, 12 e 18 horas GMT. Foram utilizados os dados da previsão feita para o mês de janeiro de 2003, tendo como condições iniciais de entrada no modelo os dados climáticos coletados nos meses anteriores a novembro de 2002.

A radiação global (Rg) do período foi calculada a partir do total diário da radiação incidente de ondas curtas obtido a partir da Equação 6.12, e posteriormente convertida para a unidade $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$, que é unidade de entrada do modelo agrometeorológico-espectral.

$$Rg = \left(\frac{ROC_0 + ROC_6 + ROC_{12} + ROC_{18}}{4} \right) * N \quad (6.12)$$

onde:

Rg = radiação de ondas curtas incidente por dia, ou radiação global ($J.m^{-2}.dia^{-1}$)

ROC_n = radiação de ondas curtas estimada pelo modelo Eta no horário n considerado ($W.m^{-2}$)

N = duração máxima do fotoperíodo, em segundos (Equação 6.11)

A partir dos valores diários radiação de ondas curtas estimada pelo modelo Eta foi calculada a radiação fotossinteticamente ativa incidente (Equação 6.1), para cada ponto da grade de coordenadas geodésicas, para um período de 16 dias. Os valores da PAR incidente foram importados para o banco de dados a partir

de um arquivo ASCII, gerando um plano de informação com os valores desta variável em cada ponto da grade original (40 x 40 km). A partir dos pontos da grade, os valores foram espacializados, utilizando o operador média zonal, sobre uma nova grade de 30 metros de resolução (Figura 6.3), para permitir a integração com os dados das imagens Landsat, que também apresentam esta resolução espacial. Os valores de PAR incidente para cada unidade amostral foram obtidos a partir da grade de 30 metros, obtido a partir do comando “estatísticas de imagem por polígono” e estão apresentados na Tabela 6.5.

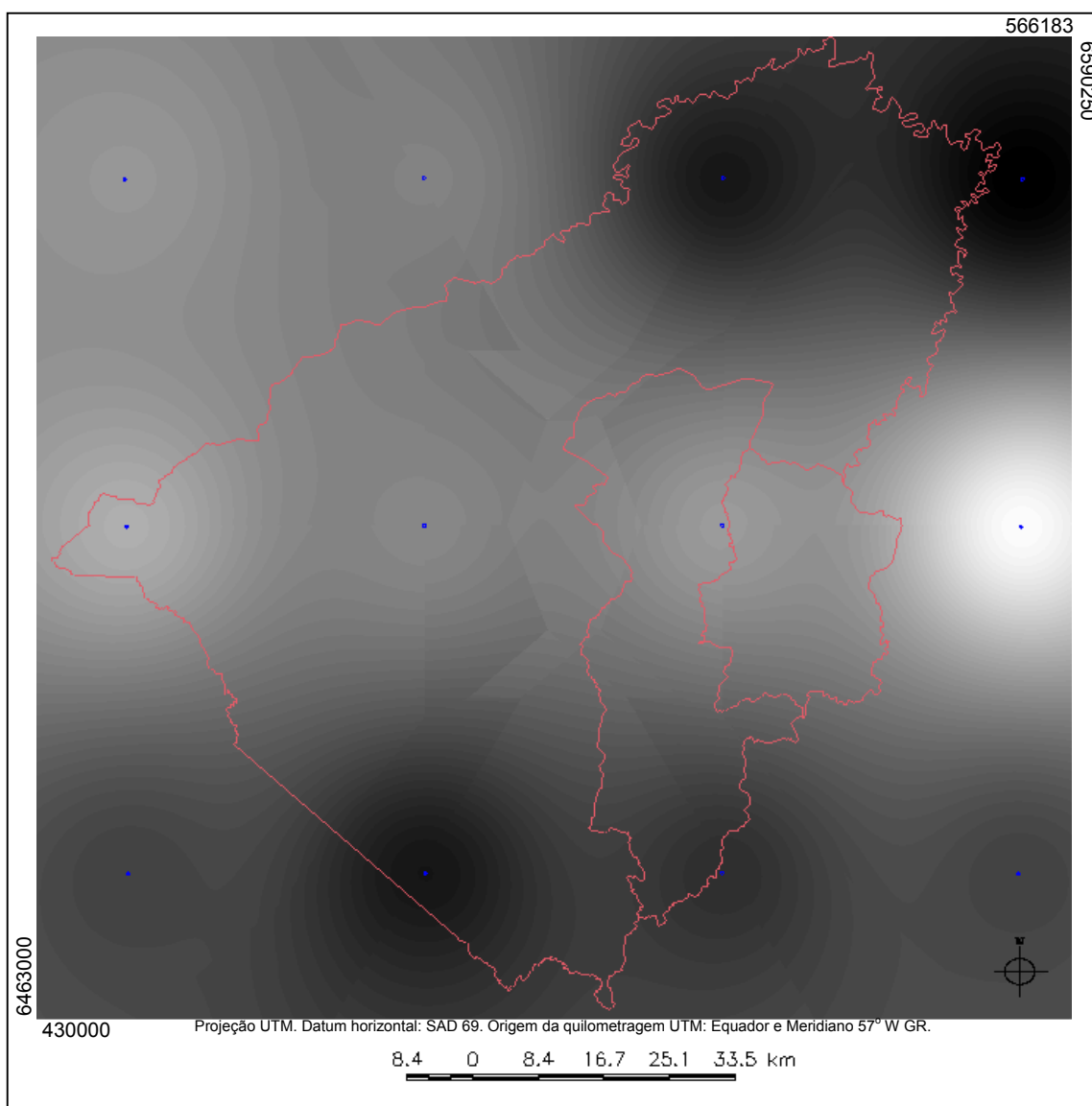


FIGURA 6.3 - Dados de radiação fotossinteticamente ativa incidente (MJ.m^{-2}) espacializados em 30 metros a partir dos valores pontuais da grade original do modelo Eta-CPTEC (em azul).

TABELA 6.5 - Valores do total da PAR incidente (MJ.m^{-2}) em 16 dias obtida a partir da grade de 30 metros com os resultados do modelo Eta-CPTEC para o período de 6 a 21 de janeiro de 2003.

Unidade amostral	$\sum_{t=0}^{16} \text{PAR}_i$
1	151,6
2	151,6
3	151,6
4	151,6
5	151,6
6	151,6
7	151,9
8	151,9
9	152,0
10	152,0
11	152,0
12	152,0
13	151,9
14	151,9
15	151,9

Para o período entre 6 a 21 de janeiro foram refeitos os cálculos da estimativa da disponibilidade real de forragem, utilizando os dados de radiação fotossinteticamente ativa incidente obtidos a partir dos dados do modelo Eta-CPTEC (Tabela 6.5). Os resultados estão apresentados na Tabela 6.6 para as quinze unidades amostrais, onde também estão apresentados os dados de

estimativa da disponibilidade de forragem obtidos utilizando os dados de PAR incidente observados na estação meteorológica para o período considerado (já apresentados na Tabela 6.4).

TABELA 6.6 - Estimativas da disponibilidade real de forragem para as unidades amostrais (kgMS.ha⁻¹), utilizando os dados de PAR incidente medidos pela estação meteorológica e estimados a partir do modelo Eta-CPTEC, para o período entre 6 a 21 de janeiro de 2003.

Unidade amostral	DF (Estação)	DF (Eta-CPTEC)
1	907,2	817,0
2	1096,7	1006,5
3	990,6	900,4
4	951,0	860,8
5	883,5	793,3
6	958,7	868,5
7	1130,2	1040,9
8	1007,6	918,4
9	1074,0	985,1
10	1318,6	1229,7
11	1343,4	1254,4
12	1148,2	1059,0
13	1025,6	936,4
14	930,4	841,1
15	844,4	754,2
Média	1040,7	951,0

Através da aplicação do teste t de Student, observou-se não haver diferença significativa entre a média dos dois conjuntos de valores para um nível de significância de 5% ($t_{\text{calc}} = 1,67$). O resultado do teste t de Student indica a possibilidade de utilização dos dados do modelo Eta-CPTEC para estimativa dos dados agrometeorológicos integrados em modelos de previsão agrícola, possibilitando a previsão do rendimento sem a necessidade de coleta posterior dos dados meteorológicos.

CAPÍTULO 7

CÁLCULO E AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS ESPECTRAIS

7.1. Uniformização das Imagens ETM+ Adquiridas em Diferentes Datas

Para o cálculo das variáveis espectrais foram utilizadas imagens do sensor ETM+ adquiridas nas mesmas datas dos trabalhos em campo realizados para coleta de dados da vegetação. As imagens foram georreferenciadas no banco de dados geográficos (conforme procedimento descrito no Item 5.1) e para eliminar os efeitos atmosféricos sobre os valores de reflectância e uniformizar as imagens das diferentes datas, foram realizados os procedimentos de correção atmosférica e de retificação radiométrica, necessários em estudos realizados com imagens multitemporais (Chuvieco, 1996; Mather, 1999).

A correção atmosférica das imagens foi realizada utilizando o programa 6S, versão 4.1 (Antunes, 2001), que tem implementado o modelo de correção atmosférica 6S, proposto por Vermote et al. (1997). A partir deste programa, foram convertidos os níveis digitais das imagens originais em radiância através da Equação 2.6, e posteriormente em reflectância aparente através da Equação 2.7, para todas as bandas das imagens adquiridas no período de coleta de dados da vegetação. Para as bandas da imagem do dia 6 de janeiro foi calculada a reflectância de superfície sendo esta imagem escolhida como referência atmosférica devido ser a imagem do conjunto 2002/2003 que apresentava atmosfera mais limpa no momento da aquisição da imagem, verificada durante a realização dos trabalhos em campo.

Para o cálculo da reflectância de superfície pelo modelo 6S são necessárias informações sobre as condições atmosféricas locais, podendo ser utilizados os modelos de transferência radiativa, disponíveis próprio programa, que simulam as condições atmosféricas locais no momento da passagem do satélite. Assim,

para estimar a concentração de aerossóis e de vapor d'água na atmosfera foram informadas: a visibilidade horizontal (atmosfera limpa, visibilidade de 50 km), o modelo atmosférico (tropical) e o modelo de aerossóis (continental), além da altitude média da área de estudo (180 metros). As informações sobre a visibilidade horizontal e a seleção dos modelos de transferência radiativa foram feitas com base nas observações feitas em campo no momento da aquisição da imagem pelo satélite.

Através da inspeção visual da reflectância da vegetação após a aplicação dos procedimentos de correção atmosférica e da comparação com os valores de nível de cinza antes da aplicação dos mesmos (Figura 7.1), verificou-se a aplicação correta dos parâmetros do modelo de transferência radiativa utilizados. Percebe-se que a correção atmosférica corrigiu os efeitos de espalhamento das bandas 1, 2 e 3 (que aumenta os valores de reflectância) e compensou o efeito de absorção por gases da banda 4 (que diminuem os valores de reflectância), conforme indicado na literatura (Vermote et al, 1997).

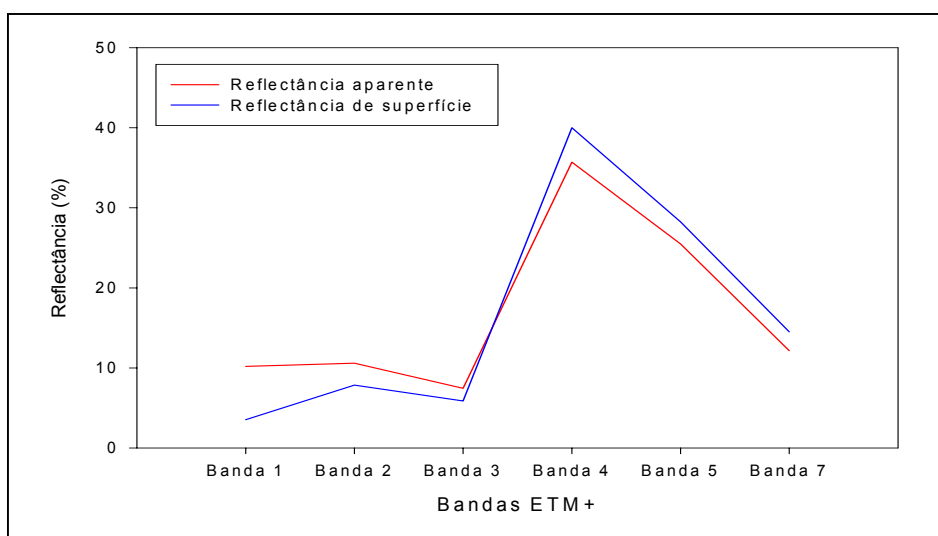


FIGURA 7.1 - Comportamento espectral da vegetação antes da aplicação da correção atmosférica (reflectância aparente) e após a aplicação do procedimento de correção atmosférica (reflectância de superfície) na imagem adquirida em 6 de janeiro de 2003.

Para a retificação radiométrica das imagens do conjunto 2002/2003 foi utilizado o modelo proposto por Hall et al. (1991), sendo os cálculos realizados utilizando um conjunto de programas escritos no módulo LEGAL (Linguagem Espacial para Álgebra de Mapas) que compõe o aplicativo Spring. Para a geração das imagens Brightness e Greenness da transformação Tasseled Cap, que fornecem os dados de entrada do modelo de retificação radiométrica, foram utilizados os coeficientes apresentados por Huang et al. (2002), para o sensor ETM+/Landsat 7 (Tabela 7.1).

TABELA 7.1 - Valores dos coeficientes utilizados na geração das imagens Brightness e Greenness, para o sensor Landsat/ETM+.

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
Brightness	0,3561	0,3972	0,3904	0,6966	0,2286	0,1596
Greenness	-0,3344	-0,3544	-0,4556	0,6966	-0,0242	-0,2630

FONTE: Huang et al. (2002).

Foram geradas uma imagem Brightness e uma imagem Greenness para cada uma das quatro datas de coleta de dados. Os coeficientes foram multiplicados aos valores de reflectância de cada pixel das diferentes bandas e as imagens foram geradas a partir do somatório dos valores calculados para cada pixel de todas as bandas em uma mesma data, como mostra a Equação 7.1:

$$Im_{TC} = (b_1 * C_{TC,1}) + (b_2 * C_{TC,2}) + (b_3 * C_{TC,3}) + (b_4 * C_{TC,4}) + (b_5 * C_{TC,5}) + (b_7 * C_{TC,7}) \quad (7.1)$$

onde:

Im_{TC} = Imagem da transformação Tasseled Cap

b_n = bandas do sensor ETM+

$c_{TC,n}$ = coeficiente para o cálculo da imagem da transformação Tasseled Cap para a banda n do sensor ETM+.

Foi gerado o gráfico de espalhamento dos valores dos níveis de cinza dos pixels das imagens Brightness e Greenness para cada data (Figura 7.2). Os extremos desta distribuição de pontos, ao longo do eixo das abscissas (extremos não vegetados) correspondem aos elementos da imagem que possuem reflectância semelhante no conjunto multitemporal de imagens, denominadas Feições Pseudo-Invariantes (FPIs). Os valores dos pixels correspondentes às FPIs nas diferentes datas foram utilizados para a operação de fatiamento das imagens, gerando para cada data de aquisição dois Planos de Informação (PIs) com polígonos referentes aos pontos de controle radiométricos claros e escuros, correspondentes aos dois extremos do diagrama de espalhamento Brightness e Greenness.

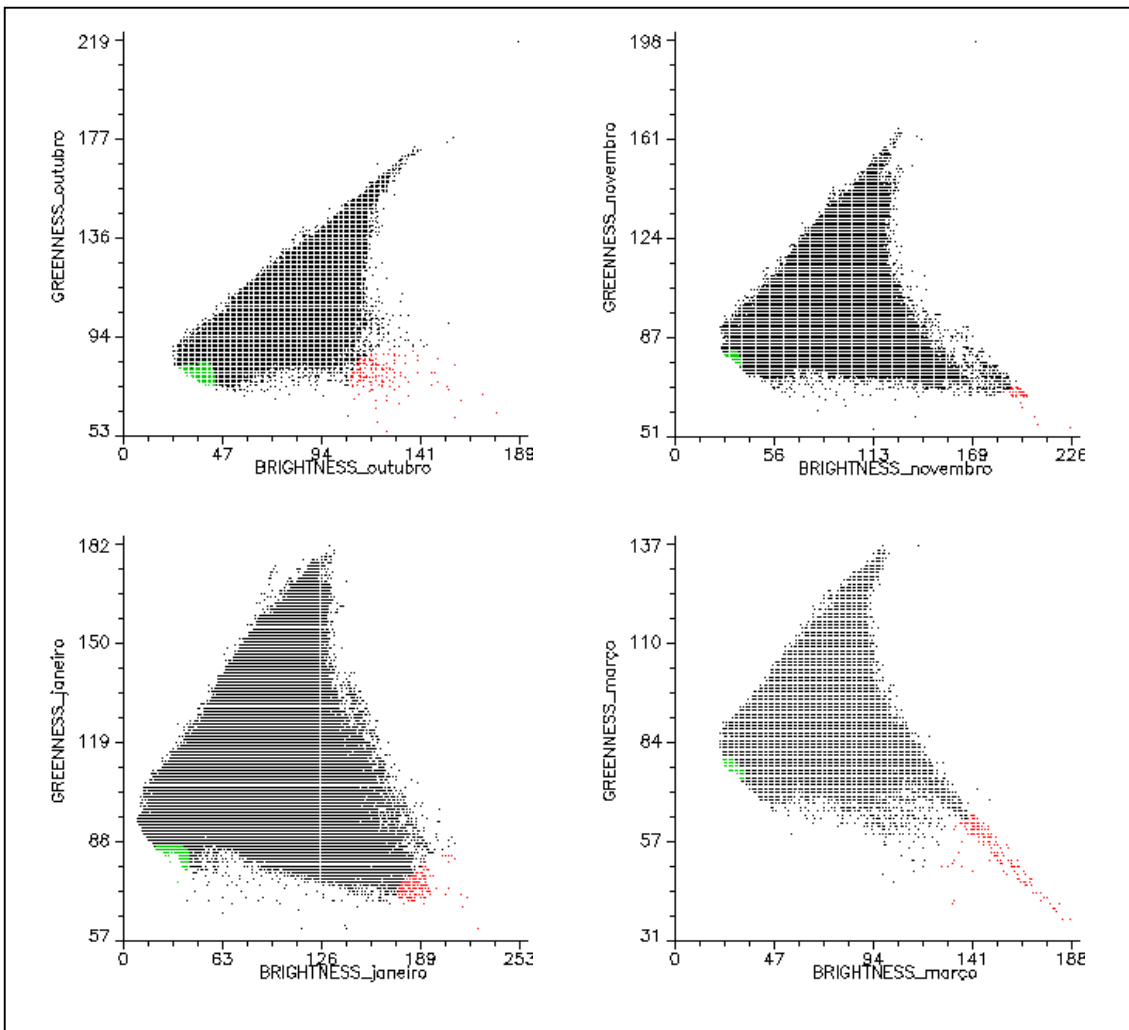


FIGURA 7.2 - Gráficos de espalhamento das imagens Greenness e Brightness para as quatro datas de coleta de dados. Em vermelho e em verde estão destacados extremos não vegetados da distribuição de pontos.

A reflectância média dos pontos de controle radiométricos em cada banda (Tabela 7.2) foi utilizada para o cálculo dos coeficientes de transformação angular (Equação 2.9) e linear (Equação 2.10) utilizados na retificação das imagens. A imagem do dia 6 de janeiro, na qual foi previamente realizada a correção atmosférica foi utilizada como referência para a retificação das demais, a partir da Equação 2.8.

TABELA 7.2 - Reflectância média dos pontos de controle radiométricos, em nível de cinza, nas diferentes bandas nas diferentes datas antes dos procedimentos de retificação.

Bandas ETM+	Pontos Claros				Pontos Escuros			
	OUT	NOV	JAN	MAR	OUT	NOV	JAN	MAR
B1	39,9	52,0	35,1	59,4	27,9	28,9	11,4	27,3
B2	38,3	56,9	48,3	57,0	22,9	24,5	17,6	21,3
B3	44,0	67,7	61,5	55,1	21,7	23,0	20,7	18,9
B4	66,4	102,1	103,2	66,9	13,3	14,4	11,9	6,5
B5	79,7	123,4	135,9	88,9	2,8	5,2	3,4	2,5
B7	58,4	102,8	121,5	63,6	1,5	2,9	1,9	1,0

Após a retificação foi calculada novamente a média dos valores de reflectância (Tabela 7.3) dos pontos de controle radiométricos (FPIs) para verificar se os critérios de avaliação da correta aplicação do modelo matemático de retificação foram atendidos (variação menor que 1% entre as diferentes datas após a retificação para uma mesma banda) (Hall et al., 1991).

TABELA 7.3 - Reflectância média dos pontos de controle radiométricos, em nível de cinza, nas diferentes bandas nas diferentes datas depois dos procedimentos de retificação.

Bandas ETM+	Pontos Claros				Pontos Escuros			
	OUT	NOV	JAN	MAR	OUT	NOV	JAN	MAR
B1	34,8	34,8	35,1	34,6	10,9	10,9	11,4	10,8
B2	47,5	47,8	48,3	47,9	16,8	17,3	17,6	17,2
B3	61,1	61,0	61,5	61,0	20,2	20,1	20,7	20,2
B4	102,6	102,8	103,2	102,7	11,5	11,4	11,9	11,4
B5	135,4	135,2	135,9	135,3	3,1	3,2	3,4	3,0
B7	120,9	120,9	121,5	121,0	1,6	1,6	1,9	1,3

7.2. Cálculo das Variáveis Espectrais e Avaliação das Relações com a Disponibilidade de Forragem

Para a construção de um sistema de monitoramento eficiente da vegetação tornam-se desnecessárias a coleta de informações em campo, que geralmente utilizam técnicas destrutivas, despendendo tempo e recursos nem sempre disponíveis, desde que se tenham meios de inferir sobre as propriedades da vegetação de forma remota (Weiss e Baret, 1999). Assim, para poder inferir sobre um dossel vegetal com o máximo de exatidão, utilizando imagens de satélite, deve-se estabelecer as relações entre a vegetação e as informações espectrais disponíveis, de forma a captar as variações da vegetação nos diferentes aspectos que estas se manifestam.

Como o objetivo é fazer predições sobre a disponibilidade de forragem, esta foi tratada como a variável dependente e as variáveis espectrais formaram o conjunto de variáveis independentes, apesar da resposta espectral ser dependente da condição em que a vegetação se apresenta no momento da

aquisição da imagem pelo sensor orbital. Em análises desta natureza não deve-se ater somente à utilização de índices de vegetação pré-existentes, conforme indicado por Cohen et al. (2003). Por esta razão foi analisada a resposta da vegetação campestre natural nas bandas individuais, nos índices de vegetação NDVI e SAVI, na diferença normalizada entre as bandas espectrais e nas variáveis obtidas pela transformação Tasseled Cap e pelo Modelo Linear de Mistura Espectral frente a disponibilidade de forragem coletada nas unidades amostrais entre outubro de 2002 a março de 2003.

Todas as unidades amostrais foram posicionadas em campo de forma a deixar uma bordadura homogênea na resposta espectral, minimizando a interferência da resposta espectral de áreas não amostradas no cálculo das variáveis espectrais. Para tanto as unidades amostrais foram posicionadas em áreas de relevo e vegetação uniformes. A Figura 7.3 ilustra o posicionamento da unidade amostral 7 sobre a imagem do dia 6 de janeiro de 2003.

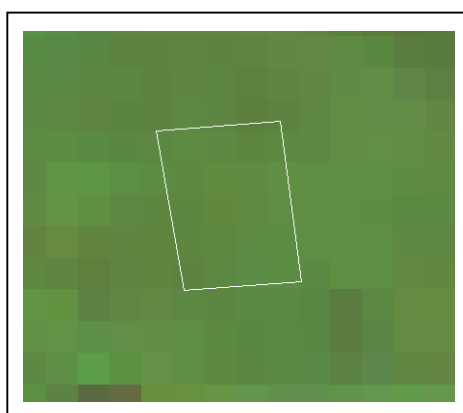


FIGURA 7.3 - Posicionamento da unidade amostral 7, na imagem Landsat/ETM+ (composição 3B,4R,5G), mostrando a bordadura uniforme em torno dos limites da unidade amostral.

Para as análises das variáveis espectrais foram excluídos os valores referentes à unidade amostral 10, devido esta unidade não ter sido corretamente posicionada no campo, apesar da sua demarcação ter seguido os critérios de

posicionamento anteriormente descritos. O polígono referente a esta unidade amostral ficou sobre uma área de transição entre a várzea e a vegetação campestre, o que torna a resposta espectral desta unidade bastante heterogênea, conforme ilustrado na Figura 7.4.

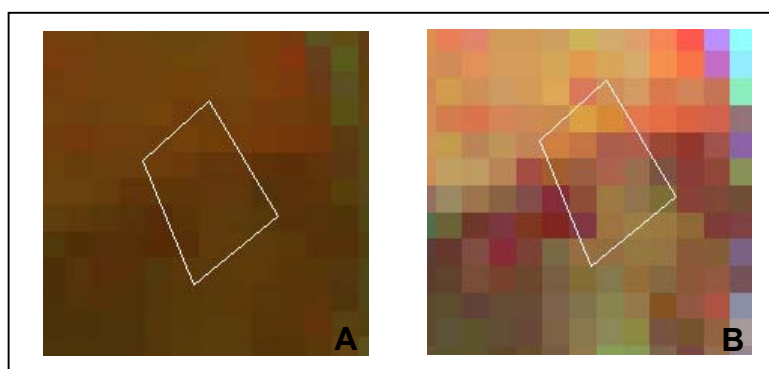


FIGURA 7.4 - Heterogeneidade da resposta espectral da unidade amostral 10, na imagem Landsat/ETM+ (composição 3B,4R,5G), sem contraste (A) e com contraste (B).

7.2.1. Bandas Individuais

Para cada unidade amostral foi calculado o valor médio da reflectância de todos os pixels contidos no polígono que delimitava a unidade amostral. Foram calculados também os valores máximo, mínimo, a moda, a mediana, a amplitude, o desvio padrão, o coeficiente de variação, a assimetria e a curtose da distribuição dos valores de reflectância para cada banda, através da extração das estatísticas espectrais da imagem por unidade amostral, das bandas ETM+ (3, 4, 5 e 7). As estatísticas foram exportadas a partir do banco de dados geográficos, para serem manipuladas e analisadas utilizando programas de planilha eletrônica e de análise estatística. Foram analisadas as correlações da reflectância mínima, máxima e média das bandas 3, 4, 5 e 7 com a disponibilidade de forragem medida em campo, a variação temporal da resposta espectral da vegetação campestre nas nestas bandas e as relações

matemáticas entre a resposta espectral e disponibilidade de forragem medida em campo.

7.2.1.1. Análise de Correlação

A partir da análise da correlação (coeficiente de correlação linear r de *Pearson*) entre os valores de reflectância máximo, mínimo e médio e a disponibilidade de forragem coletada em campo, em cada unidade amostral, nas diferentes datas (Tabela 7.4), selecionou-se qual a estatística que melhor representava a realidade medida em campo. Para estas análises foram excluídos os valores das bandas 1 e 2 devido à alta correlação observada entre a resposta espectral da vegetação nestas bandas e na banda 3, decorrente da absorção da radiação incidente nestas faixas de comprimento de onda pelos pigmentos fotossintéticos, amplamente citada na literatura.

TABELA 7.4 - Valores de correlação entre os valores de reflectância e a biomassa para as bandas 3, 4, 5 e 7 nas diferentes datas de coleta de dados.

Banda	Reflectância	Outubro	Novembro	Janeiro	Março
B3	ρ_{\max}	-0,05	-0,42	-0,54	0,88
	ρ_{\min}	-0,29	-0,17	-0,55	0,80
	ρ_{med}	-0,25	-0,23	-0,59	0,87
B4	ρ_{\max}	-0,31	-0,07	0,32	-0,64
	ρ_{\min}	-0,12	0,18	0,30	-0,58
	ρ_{med}	-0,28	0,15	0,39	-0,60
B5	ρ_{\max}	-0,53	-0,33	-0,60	0,07
	ρ_{\min}	-0,15	-0,21	-0,61	0,08
	ρ_{med}	-0,43	-0,16	-0,64	0,14
B7	ρ_{\max}	-0,35	-0,44	-0,49	0,42
	ρ_{\min}	-0,25	-0,09	-0,58	0,47
	ρ_{med}	-0,43	-0,32	-0,64	0,54

Foram observados valores inversos aos esperados nas correlações entre todas as bandas individuais e a disponibilidade de forragem no mês de março. Esta inversão se justifica pela variação no ciclo fenológico da vegetação, associada à variação anual da temperatura do ar. No final do verão é observada uma diminuição da temperatura e do fotoperíodo o que induz a floração das espécies de crescimento estival (Nabinger et al., 2000), com isso as plantas mudam seu estágio fenológico, passando do estágio vegetativo para o estágio reprodutivo, alterando a fisiologia da planta com relação à translocação de nutrientes e partição de biomassa (Rodrigues e Rodrigues, 1987). A produção de forragem no mês de março apresenta valores elevados, como mostra a

Figura 7.5, sendo esta alta biomassa observada em função da formação das sementes, que possuem alto peso seco. Para a formação das sementes a planta muda sua estrutura, com a formação de órgãos não especializados para a realização da fotossíntese, os quais possuem uma estrutura interna distinta das folhas verdes, promovendo uma mudança no comportamento espectral da vegetação, função da alteração no padrão de partição e utilização da radiação solar incidente (apresentado na Figura 2.2), justificando os valores de correlação observados no mês de março, apresentados na Tabela 7.4.

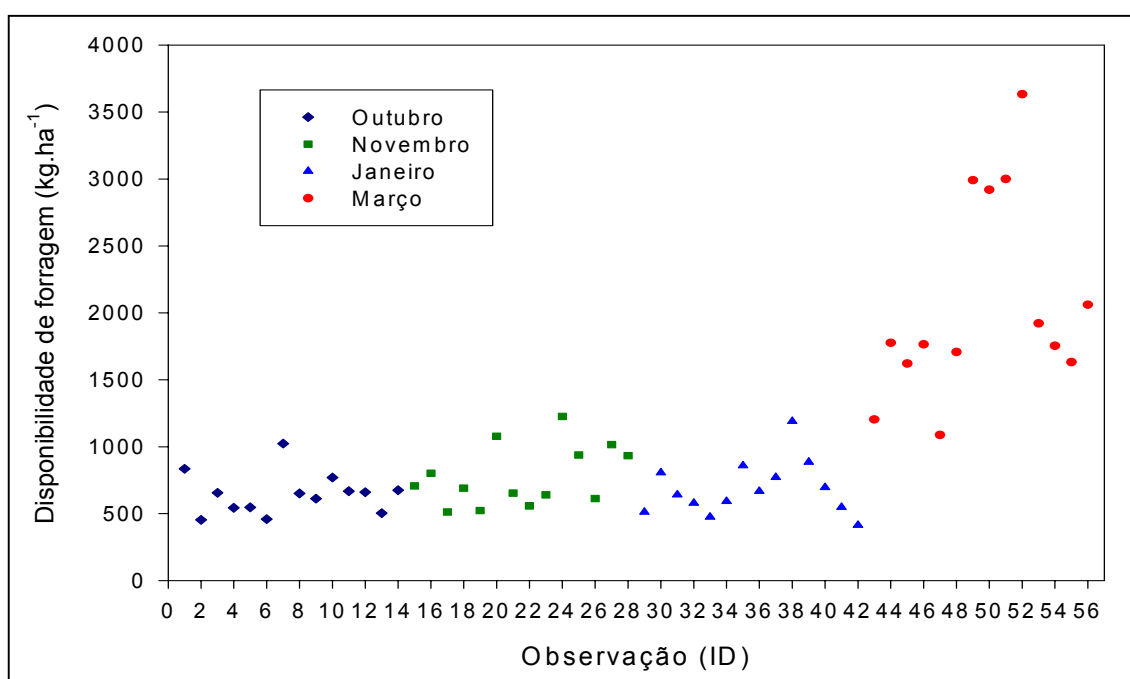


FIGURA 7.5 - Distribuição dos valores de disponibilidade medidos em campo nas diferentes datas de coleta de dados.

Na Tabela 7.4 também foram observados valores inversos aos esperados nas correlações entre a resposta da banda 4 e a disponibilidade de forragem no mês de outubro e também na correlação com a reflectância máxima do mês de novembro. As correlações negativa para a banda 4 também podem ser justificadas pelo estágio fenológico em que se encontrava a vegetação. Com o aumento da temperatura média do ar no início da primavera (final do mês de

setembro) começa o rebrote das espécies estivais, sendo que na data da passagem do satélite (2 de outubro) ainda existia uma baixa disponibilidade de forragem (como pode ser observado pelos dados médios apresentados na Figura 5.3), aumentando a participação do solo na composição da resposta espectral dos pixels.

Com base na análise dos valores de correlação linear apresentados na Tabela 7.4 selecionou-se a reflectância média do conjunto de pixels (ρ_{med}) de cada unidade amostral, nas diferentes bandas, para compor o conjunto de variáveis que será utilizado para a seleção da variável espectral para parametrizar o modelo JONG. Esta definição foi feita considerando que para as variáveis da vegetação também foram utilizados dados médios de disponibilidade de forragem (apresentados na Tabela 5.5).

Também foram observadas baixas correlações entre a disponibilidade de forragem e a reflectância média (ρ_{med}) dos pixels nas bandas individuais nas diferentes datas (Tabela 7.4), quando comparados os resultados obtidos com os valores apresentados por Ripple (1984). As baixas correlações apresentadas na Tabela 7.4 são justificadas pela heterogeneidade da composição florística dos dosséis analisados neste trabalho (Tabela 5.4), enquanto Ripple (1984) trabalhou com dosséis monoespecíficos homogêneos. Dosséis heterogêneos apresentam uma arquitetura não uniforme, com a formação de extratos de diferentes alturas, como pode ser observado na Figura 7.6. A heterogeneidade da arquitetura do dossel altera a sua resposta espectral, já que nestes dosséis existe uma maior quantidade da fração sombra na composição da reflectância dos pixels (Jackson et al., 1979).



FIGURA 7.6 - Exemplo das variações na arquitetura e composição florística dos dosséis analisados.

7.2.1.2. Análise da Variação Temporal do Comportamento Espectral das Unidades Amostrais

Na Figura 7.7 estão apresentadas as curvas de reflectância de superfície nas diferentes datas de coleta de dados para a unidade amostral 1, compostas a partir da reflectância média dos pixel da unidade amostral. A variação do brilho dos pixels desta unidade é apresentada na Figura 7.8. As curvas de reflectância da superfície das demais unidades amostrais são apresentadas no Apêndice C.

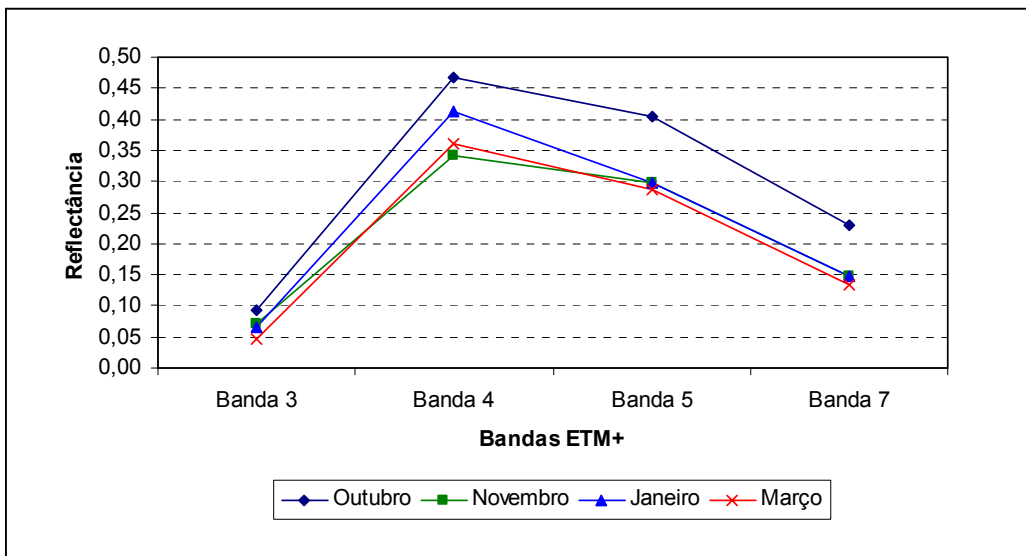


FIGURA 7.7 - Reflectância espectral da unidade amostral 1, nas diferentes datas de coleta de dados.

Analisando a variação temporal das curvas espectrais observa-se, associado às medições do mês de outubro, um padrão característico de baixa quantidade de vegetação, quando comparada com as demais datas. Este padrão observado é decorrência baixa disponibilidade de forragem, o que aumenta a participação do solo na composição da resposta espectral dos pixels, sendo este o padrão da vegetação observado durante os trabalhos em campo. Este comportamento espectral característico de baixa quantidade de vegetação também foi observado nos trabalhos em campo e graficamente (Apêndice C) para as demais unidades amostrais.

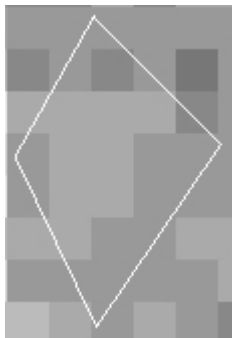
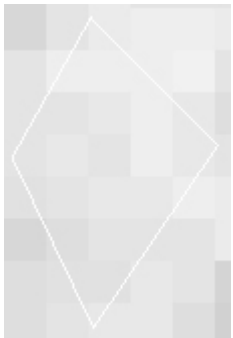
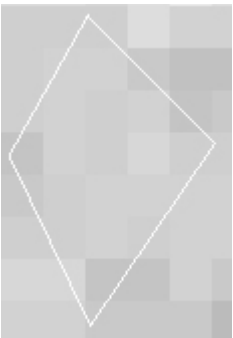
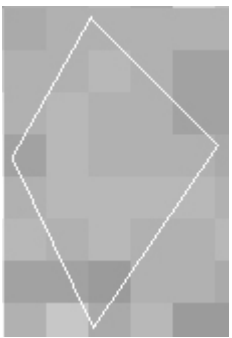
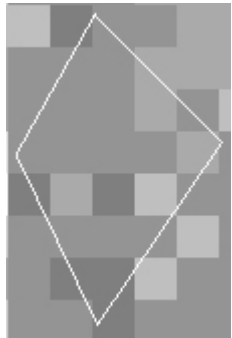
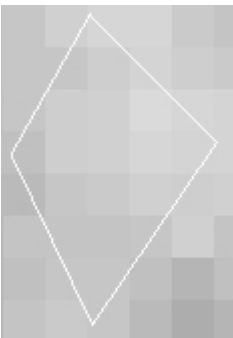
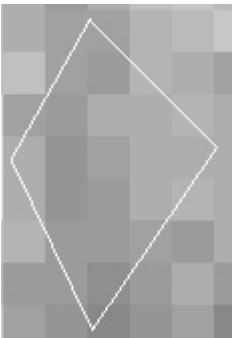
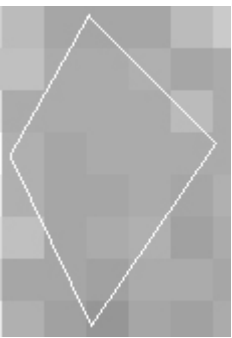
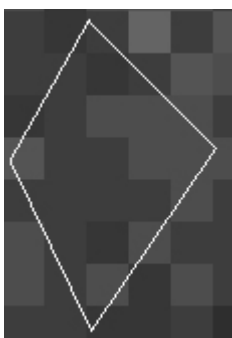

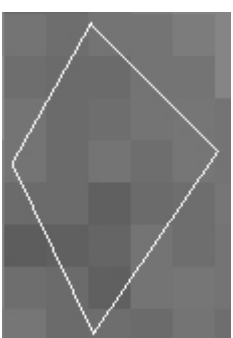
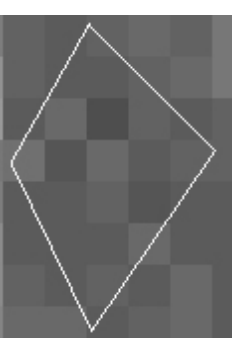

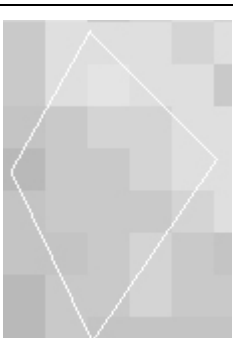

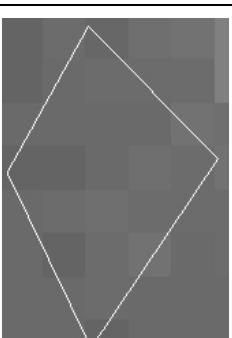
Data	B3	B4	B5	B7
Out				
Nov				
Jan				
Mar				

FIGURA 7.8 - Segmentos das imagens das bandas 3, 4, 5 e 7 nas diferentes datas de coleta de dados, ilustrando a variação de brilho dos pixels da unidade amostral 1.

Observou-se uma grande amplitude de valores na resposta espectral da banda 4 entre as diferentes datas de coleta de dados (Figuras 7.7 e 7.8), que não refletiu a amplitude dos dados de biomassa medidos em campo, apresentados na Tabela 5.5. Segundo as observações feita em campo no momento da coleta das amostras de vegetação, esperava-se que os dados de biomassa aérea apresentassem uma maior variação, devido ao volume de vegetação fresca cortado ter apresentado uma grande variação (não mensurada). Para melhor interpretar a resposta espectral da vegetação campestre natural é necessário medir a biomassa aérea em outras unidades de medida além da matéria seca, podendo ser por exemplo matéria fresca ou índice de área foliar. Nas bandas 5 e 7, tanto na unidade amostral 1, como nas demais unidades amostrais (Apêndice C), também existiu uma amplitude nos valores da resposta espectral que não foi refletida pela amplitude dos valores de disponibilidade de forragem medida em campo, na unidade de quilogramas de matéria seca por hectare.

7.2.1.3. Análise das Relações entre Resposta Espectral das Bandas Individuais e a Disponibilidade de Forragem

A Figura 7.9 apresenta o diagrama de dispersão de pontos da resposta espectral da vegetação nas bandas individuais e a disponibilidade de forragem medida em campo na data de passagem do satélite. Foram analisados os dados coletados nos meses de outubro e novembro de 2002 e de janeiro de 2003. Foram excluídos os dados coletados no mês de março de 2003, limitando as análises e a parametrização do submodelo espectral ao período de crescimento vegetativo da vegetação.

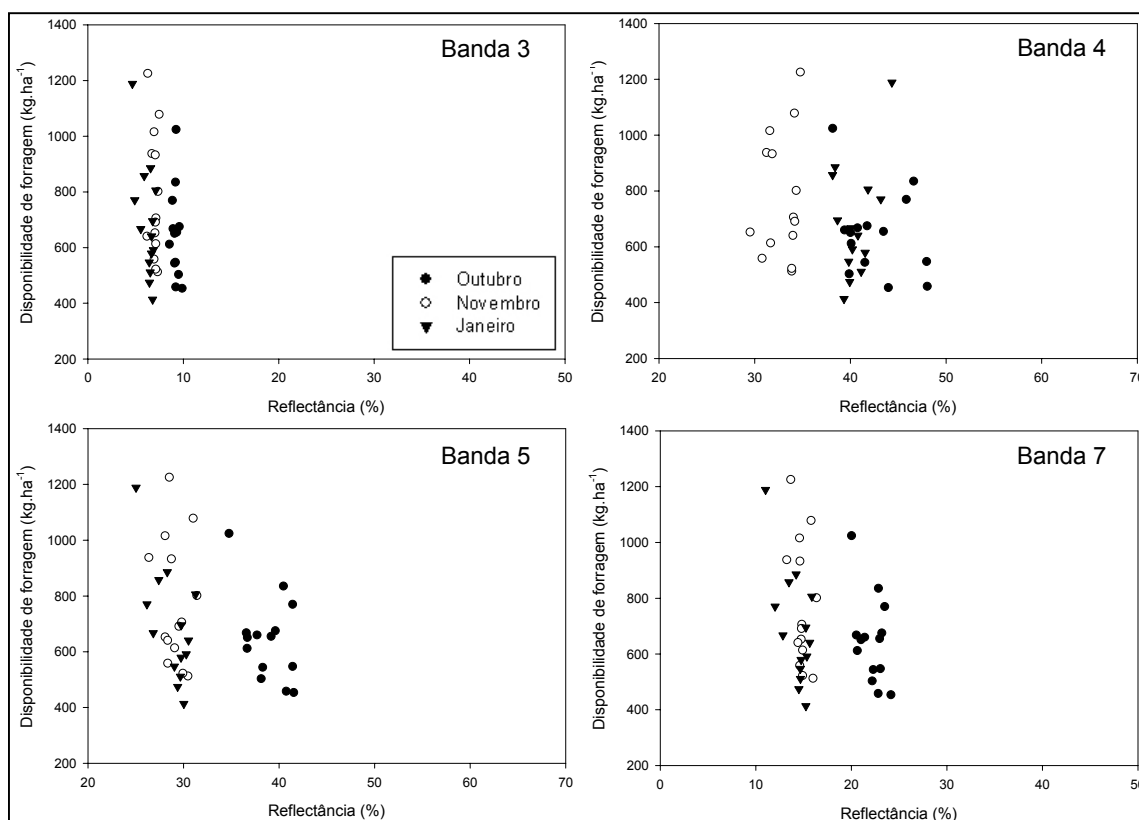


FIGURA 7.9 - Diagrama de dispersão de pontos da disponibilidade de forragem versus a resposta espectral das bandas 3, 4, 5 e 7.

Pela análise do diagrama de dispersão dos pontos, não ficou evidenciada nenhuma relação significativa entre a disponibilidade de forragem e as variáveis espectrais analisadas. A não linearidade das relações observadas nos diagramas de dispersão também explicam as baixas correlações observadas entre a disponibilidade de forragem e a reflectância das bandas individuais (apresentadas na Tabela 7.4), já que o coeficiente de correlação de *Pearson* expressa a intensidade de relação linear entre duas variáveis e a ausência de significância pode indicar a não linearidade da relação (Valentin, 2000). Ripple (1984) analisou dosséis monoespecíficos de *Lolium multiflorum*, com o auxílio de um espectrorradiômetro portátil e demonstrou a existência de relações exponenciais entre a produção de biomassa de folhas e a reflectância na banda 3. Fonseca et al. (2002) demonstraram ser não linear a relação entre

a produção de biomassa de folhas e a reflectância nas bandas 3 e 4 em dosséis mono-específicos de *Paspalum notatum*.

Observou-se a formação de um bloco de valores referentes aos dados coletados no mês de outubro, função da baixa cobertura do solo pela vegetação nesta data de coleta de dados. Por este motivo optou-se também por não utilizar os dados coletados no mês de outubro na parametrização do submodelo espectral. Com isso, fica garantida a uniformidade da vegetação quanto ao estágio fenológico (pela retirada dos dados coletados no mês de março), e cobertura do solo pela vegetação (pela retirada dos dados coletados no mês de outubro), atuando sobre a resposta espectral da vegetação somente os fatores aleatórios referentes ao manejo da atividade pastoril que promovem a variação espacial na oferta de forragem.

Assim, as análises das relações entre a disponibilidade de forragem e as variáveis espectrais para a parametrização do submodelo espectral passam a ser feitas considerando um total de 28 pares de pontos para cada variável espectral, utilizando os valores coletados nos meses de novembro e janeiro. A Tabela 7.5 apresenta o intervalo de valores, a média, o desvio padrão, o coeficiente de variação para a reflectância das bandas individuais e para a disponibilidade de forragem para os dados coletados nos meses de novembro e janeiro, sendo os valores da reflectância para todas as unidades amostrais apresentados no Apêndice D.

TABELA 7.5 - Sumário das estatísticas descritivas para as variáveis espectrais reflectância das bandas individuais e para a disponibilidade de forragem dos dados coletados nos meses de novembro e janeiro.

Variável	Intervalo (Li - Ls)	Média	DP	CV (%)
DF (kgMS.ha ⁻¹)	413,60 - 1225,60	732,80	214,94	29,33
Banda 3 (%)	4,66 - 7,47	6,62	0,68	10,23
Banda 4 (%)	29,51 - 44,34	36,68	4,26	11,62
Banda 5 (%)	25,03 - 31,39	28,97	1,57	5,42
Banda 7 (%)	11,02 - 16,35	14,53	1,18	8,10

Quando a normalidade das variáveis de entrada do modelo de regressão não é observada, torna-se necessário avaliar a validade das relações encontradas através da análise de resíduos (Neter e Wasserman, 1974), que compara os valores estimados pelas equações de regressão com os valores medidos em campo. Para o uso desta metodologia é necessário que a variável dependente apresente distribuição normal dos valores em relação à média, já que a análise de resíduos é feita sobre esta variável (Souza, 1998). Conforme o resultado do teste de Shapiro-Wilks (W), que testa a normalidade da distribuição dos dados a partir da hipótese nula (H_0 : os dados têm distribuição normal) (Souza, 1998), observa-se que os valores de disponibilidade de forragem dos meses de novembro e janeiro apresentam distribuição normal com relação à média ($W = 0,94$, valor $p = 0,0852$). A Figura 7.10 mostra o histograma da distribuição da variável disponibilidade de forragem referente aos dados coletados em campo nos meses de novembro e janeiro, permitindo verificar visualmente a normalidade da distribuição dos valores em relação a média.

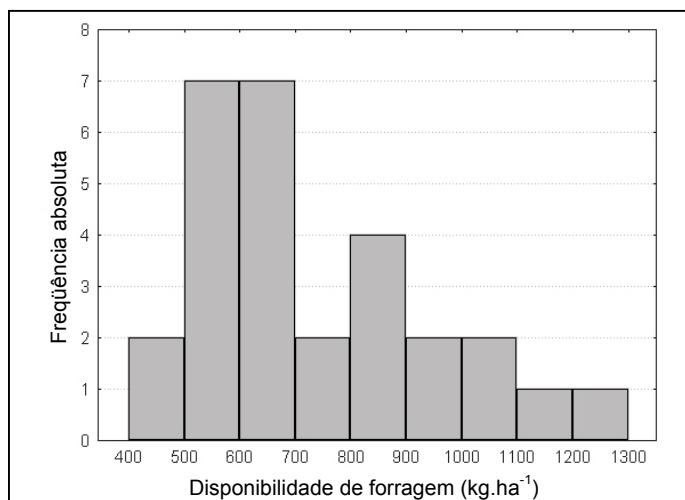


FIGURA 7.10 - Histograma de freqüência da distribuição dos valores amostrais da disponibilidade de forragem para os dados coletados nos meses de novembro e janeiro.

7.2.2. Índices de Vegetação e Diferença Normalizadas entre as Bandas

Os índices de vegetação e a diferença normalizada entre as bandas foram calculados a partir dos valores da reflectância (ρ) das bandas individuais, utilizando o valor de todos os pixels de cada unidade amostral. Os cálculos foram realizados a partir de programas escritos no módulo LEGAL do aplicativo SPRING. As equações utilizadas para os cálculos estão apresentadas na Tabela 7.6. Foram calculadas as variáveis espectrais NDVI, SAVI (utilizando quatro diferentes valores para a constante L : 0,25, 0,50, 0,75 e 1) e Diferença Normalizada (ND) entre as bandas 4 e 5, bandas 4 e 7, bandas 5 e 3 e bandas 7 e 3. As diferenças normalizadas entre as bandas foram calculadas visando analisar a resposta da vegetação campestre natural em combinações entre bandas diferentes das bandas 4 e 3, utilizadas com freqüência para estudos com vegetação. A Tabela 7.7 apresenta as estatísticas descritivas destas variáveis espectrais e os valores para todas as unidades amostrais apresentados no Apêndice E.

TABELA 7.6 - Equações utilizadas para o cálculo das variáveis espectrais a partir dos índices de vegetação NDVI e SAVI.

Variável	Equação	Variável	Equação
NDVI	<input type="text"/>	SAVI 0,25	<input type="text"/>
ND 45	<input type="text"/>	SAVI 0,5	<input type="text"/>
ND 47	<input type="text"/>	SAVI 0,75	<input type="text"/>
ND 53	<input type="text"/>	SAVI 1	<input type="text"/>
ND 73	<input type="text"/>		

TABELA 7.7 - Sumário das estatísticas descritivas para os índices de vegetação e diferença normalizada entre bandas (valores adimensionais) para os dados coletados nos meses de novembro e janeiro.

Variável	Intervalo (Li - Ls)	Média	DP	CV (%)
NDVI	0,62 - 0,81	0,69	0,05	7,29
ND 45	0,02 - 0,28	0,11	0,07	58,02
ND 47	0,33 - 0,60	0,43	0,06	14,98
ND 53	0,59 - 0,69	0,62	0,02	3,68
ND 73	0,33 - 0,42	0,37	0,02	5,70
SAVI 0,25	0,46 - 0,67	0,56	0,06	10,19
SAVI 0,5	0,39 - 0,60	0,48	0,06	11,69
SAVI 0,75	0,35 - 0,56	0,44	0,06	12,50
SAVI 1	0,33 - 0,53	0,42	0,05	12,95

As Figuras 7.11 e 7.12 apresentam o diagrama de dispersão de pontos das variáveis espectrais e da disponibilidade de forragem. Observou-se que as variáveis espectrais que possuem no seu cálculo os valores referentes à banda 4 (NDVI, ND 45 e ND 47) apresentaram uma clara distinção dos valores conforme a data de coleta dos dados, sendo este comportamento esperado devido às relações observadas entre a resposta espectral da banda 4 e a disponibilidade de forragem (Figura 7.9). Esperava-se uma nuvem de pontos sem distinção de datas de coletas nas variáveis que não utilizassem no seu cálculo os valores referentes à banda 4 (ND 53 e ND 73), mas este não foi o comportamento observado, existindo também nestes índices a formação de blocos de valores que acompanham a data de coleta de dados.

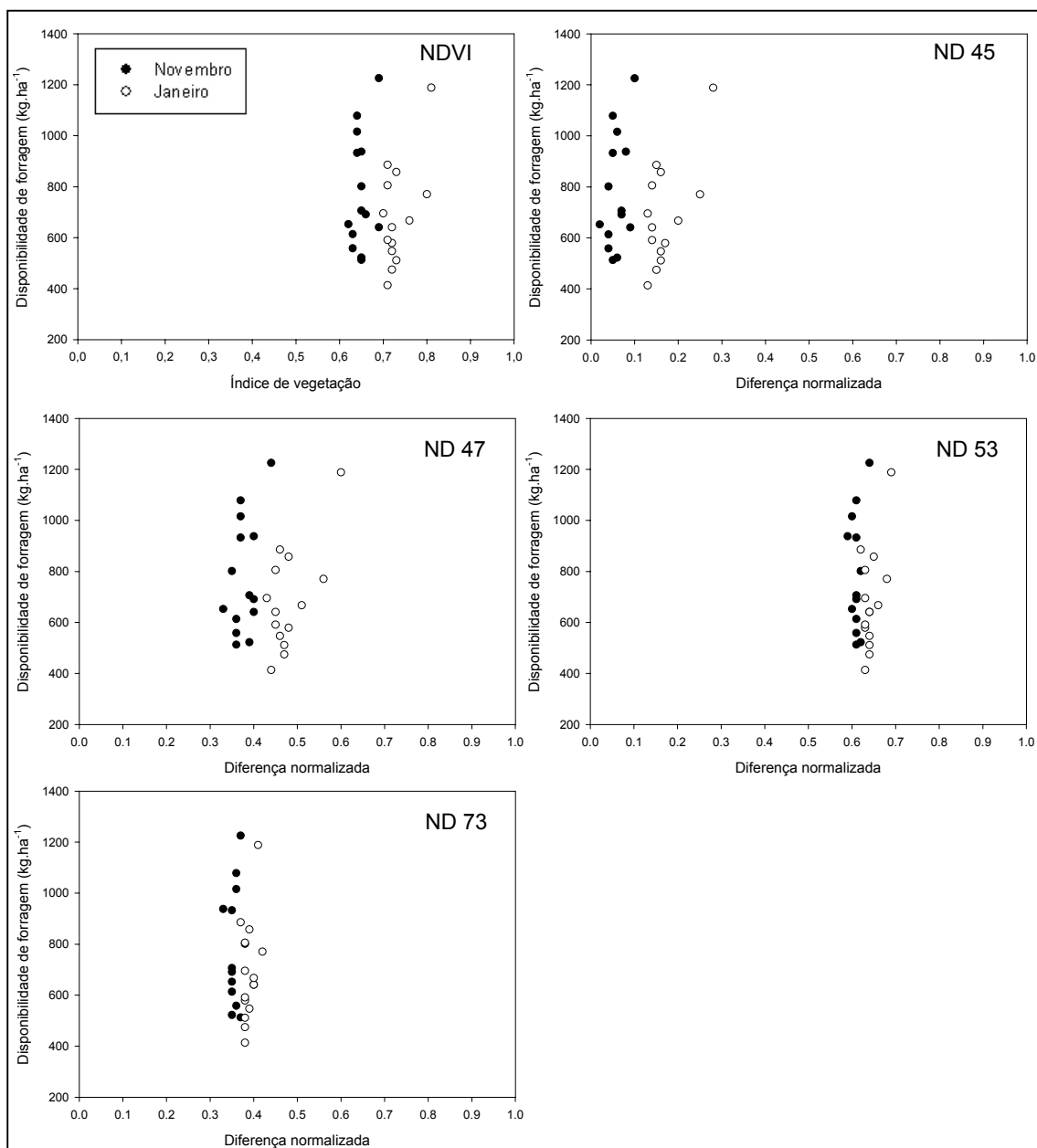


FIGURA 7.11 - Diagrama de dispersão de pontos da disponibilidade de forragem versus o NDVI e versus a diferença normalizada das bandas.

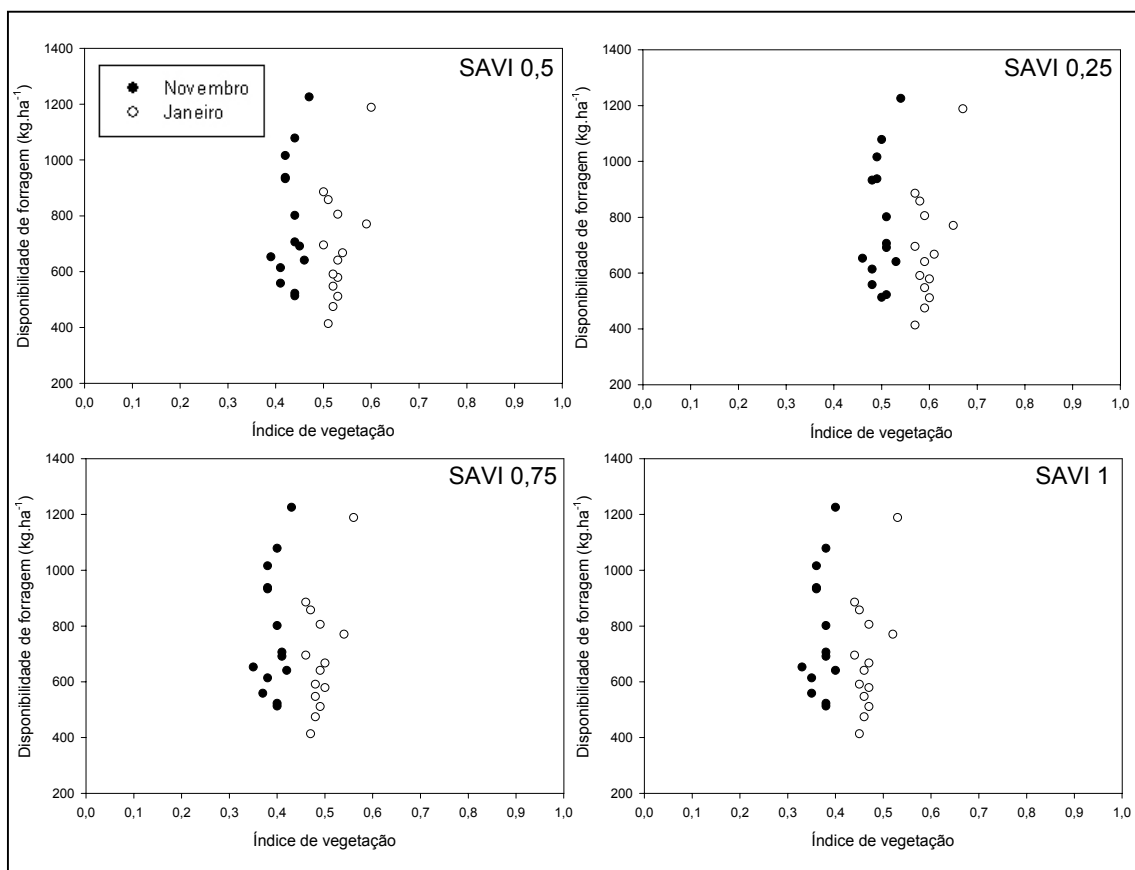


FIGURA 7.12 - Diagrama de dispersão da disponibilidade de forragem versus os índices de vegetação ajustados para o solo (SAVI).

Comparando a resposta apresentada pelo NDVI e os índices SAVI 0,25, SAVI 0,5, SAVI 0,75 e SAVI1, observa-se que a variação no valor de L no cálculo do índice de vegetação desloca a nuvem de pontos no eixo das abscissas, não alterando o formato da distribuição de pontos. Pela análise dos diagramas de dispersão dos pontos não ficou evidenciada vantagem na inclusão e na variação dos valores de L para estudos da vegetação campestre natural.

7.2.3. Transformação Tasseled Cap

A partir das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do conjunto de imagens retificadas foram calculadas as imagens Brightness, Greenness, Wetness, e as quarta, quinta e sexta componentes da transformação Tasseled Cap a partir da Equação 7.1.

Os coeficientes utilizados para o cálculo das componentes estão apresentados na Tabela 7.8, sendo os cálculos foram feitos através de programas escritos na linguagem LEGAL. Foram extraídos os valores das diferentes variáveis espectrais testadas para cada unidade amostral utilizando o módulo estatísticas de imagem por polígono, descrito no Item 7.2.1, sendo o sumário das estatísticas das variáveis espectrais oriundas da transformação Tasseled Cap apresentadas na Tabela 7.9 e os valores para todas as unidades amostrais apresentados no Apêndice F.

TABELA 7.8 - Valores dos coeficientes utilizados na transformação Tasseled Cap, para o sensor Landsat/ETM+.

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
Brightness	0,3561	0,3972	0,3904	0,6966	0,2286	0,1596
Greenness	-0,3344	-0,3544	-0,4556	0,6966	-0,0242	-0,2630
Wetness	0,2626	0,2141	0,0926	0,0656	-0,7629	-0,5388
Quarta	0,0805	-0,0498	0,1950	-0,1327	0,5752	-0,7775
Quinta	-0,7252	0,0202	0,6683	0,0631	-0,1494	-0,0274
Sexta	0,4000	-0,8172	0,3832	0,0602	-0,1095	0,0985

FONTE: Huang et al. (2002).

TABELA 7.9 - Sumário das estatísticas descritivas para as variáveis oriundas da transformação Tasseled Cap (em nível de cinza) para os dados dos meses de novembro e janeiro.

Variável	Intervalo (Li - Ls)	Média	DP	CV (%)
Brightness	90,55 - 117,50	104,30	7,94	7,61
Greenness	123,90 - 155,83	136,17	8,10	5,95
Wetness	29,91 - 49,28	36,99	4,30	11,63
Quarta componente	1,50 - 5,65	3,84	1,29	33,62
Quinta componente	97,00 - 99,33	98,21	0,56	0,55
Sexta Componente	94,56 - 96,75	95,56	0,63	0,66

Optou-se por incluir no diagrama de dispersão dos pontos das variáveis espectrais oriundas da transformação Tasseled Cap versus a disponibilidade de forragem (Figura 7.13) os dados coletados no mês de outubro, apesar dos dados coletados neste período não serem utilizados para a parametrização do modelo agrometeorológico-espectral. O objetivo foi verificar se o efeito da baixa cobertura do solo pelo dossel, observado nos dados do mês de outubro, fica minimizado por algumas das variáveis espectrais oriundas da transformação Tasseled Cap visando a estimativa das variáveis biofísicas da vegetação.

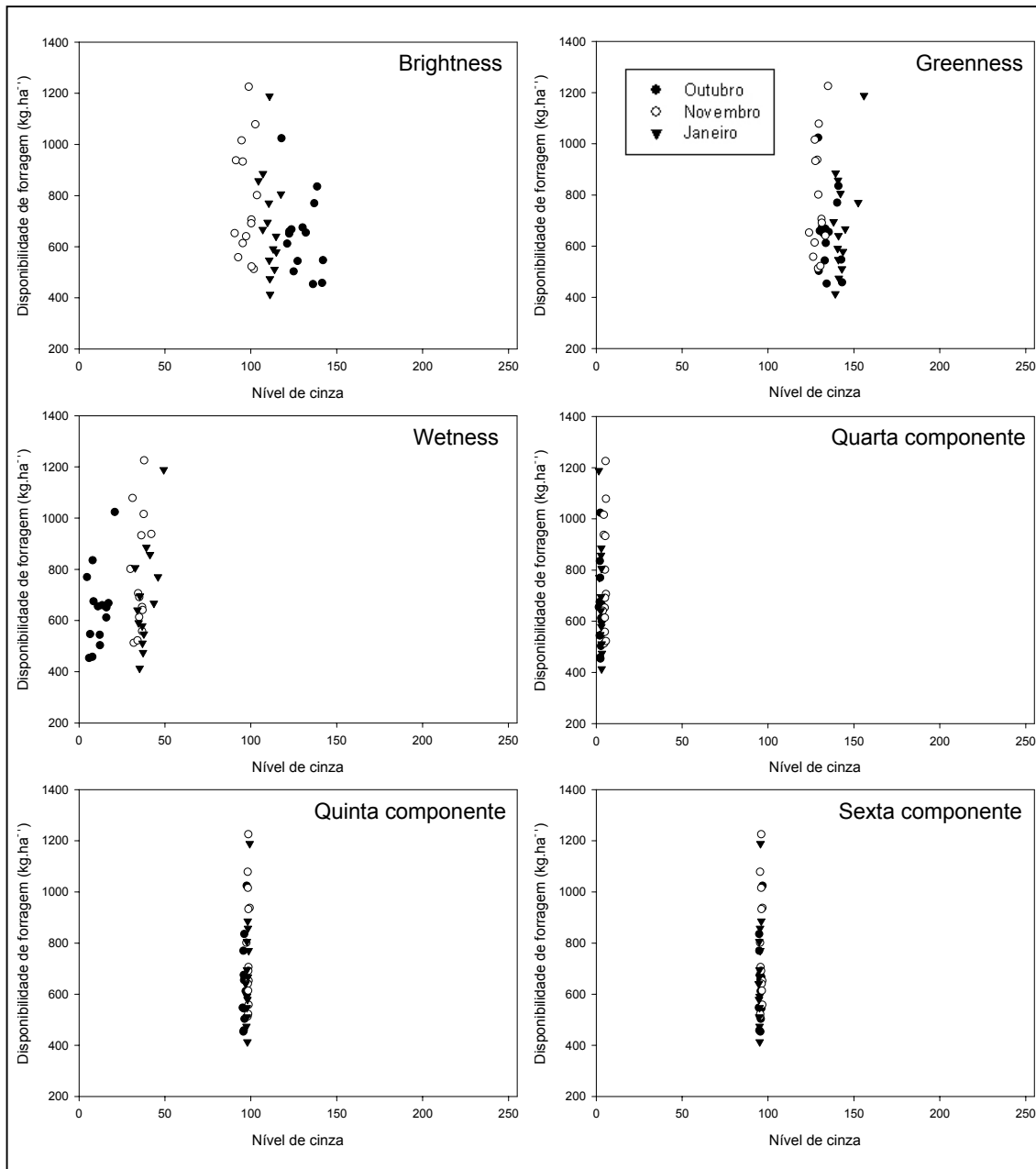


FIGURA 7.13 - Diagrama de dispersão de pontos da disponibilidade de forragem versus a resposta das variáveis espectrais oriundas da transformação Tasseled Cap.

Foi observada uma distinção dos valores da variável Brightness com relação a data de coleta dos dados, semelhante a observada para a resposta espectral da banda 4 (Figura 7.9), devido ao maior peso desta banda no cálculo da variável Brightness (Tabela 7.8). Para a variável Greenness não foi observada

esta distinção entre as datas de coleta de dados, provavelmente devido ao maior peso da banda 3 no cálculo desta variável (como mostra a Tabela 7.8) que também não apresentou esta distinção como mostra a Figura 7.9. Para a variável Wetness, observou-se uma dependência da distribuição dos pontos com a data de coleta de dados, havendo uma separação do mês de outubro das demais datas de coleta de dados, cujos pontos formaram um único bloco. Esta variável, que representa o teor de umidade tanto do solo quanto da vegetação (Crist e Cicone, 1984b), o que está sendo expresso é a relação da resposta espectral detectada com relação a disponibilidade hídrica existente no momento da passagem do satélite. As três últimas componentes da transformação Tasseled Cap não possuem sentido físico associado e, segundo Huang et al. (2002), representam os efeitos atmosféricos existente sobre os valores da reflectância. Pela análise do diagrama da distribuição dos pontos observa-se que os efeitos representados por estas componentes é o mesmo para todas as datas de coleta de dados.

7.2.4. Cálculo das Imagens Fração a partir do Modelo Linear de Mistura Espectral

Utilizando o modelo linear de mistura espectral foram calculadas três imagens fração, decompondo os valores de reflectância dos pixels em vegetação, solo e sombra, a partir das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do conjunto de imagens retificadas. Para estes cálculos utilizou-se o módulo “modelo de mistura” do aplicativo Spring onde para cada data foram extraídas as curvas espectrais das frações desejadas (Figura 7.14), a partir da leitura dos pixels puros destes alvos existentes na imagem. Da mesma forma que para as variáveis Tasseled Cap, foram incluídos na análise os dados coletados no mês de outubro para verificar se o efeito da baixa cobertura do dossel fica minimizado por alguma das variáveis testadas, sem a intenção de inclusão destes dados na parametrização do submodelo espectral.

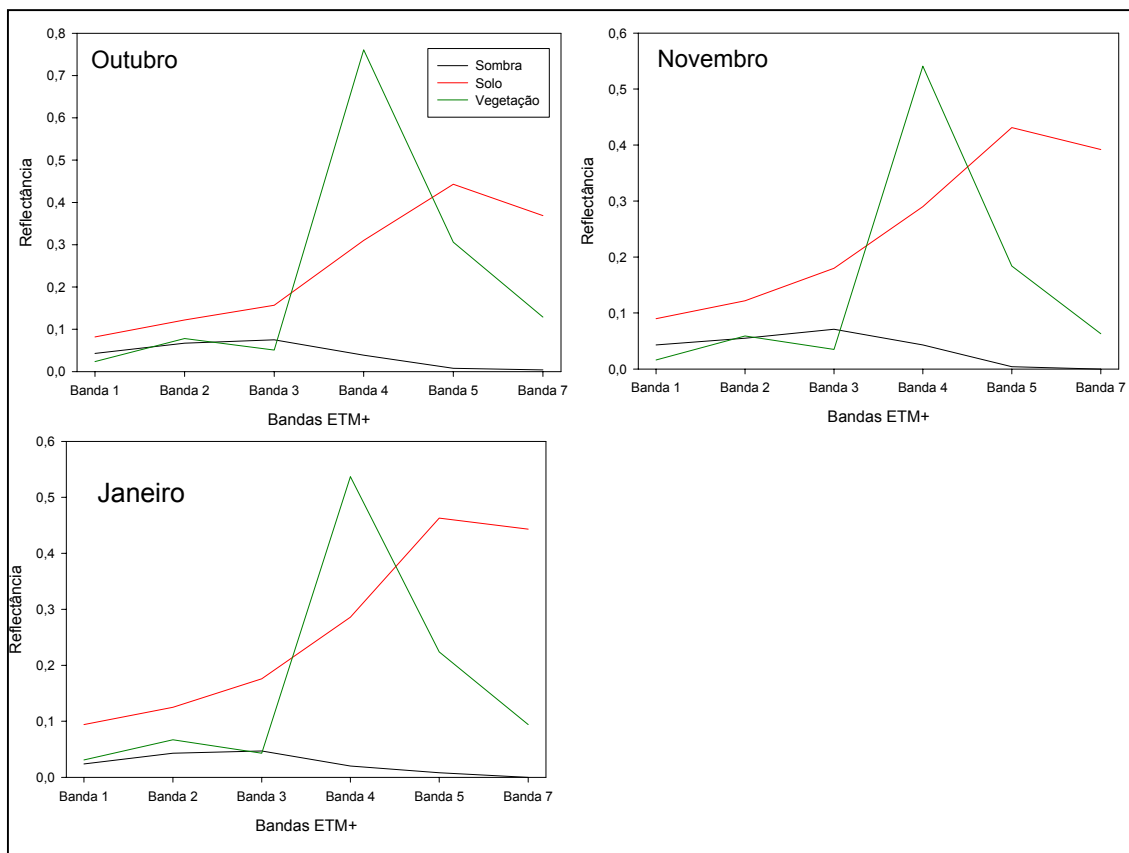


FIGURA 7.14. Curvas espectrais das feições vegetação solo e sombra utilizadas para o cálculo das imagens fração dos meses de outubro, novembro e janeiro.

Os valores das variáveis espectrais oriundas do modelo linear de mistura espectral para cada unidade amostral foram obtidos a partir da geração das estatísticas de imagem por polígono, sendo que os valores para todas as unidades amostrais estão apresentados no Apêndice G e o sumário das estatísticas apresentados na Tabela 7.10. Os diagramas de dispersão de pontos da disponibilidade de forragem versus a resposta espectral das variáveis estão apresentados na Figura 7.15.

TABELA 7.10 - Sumário das estatísticas descritivas para as variáveis fração vegetação, solo e sombra (em valores relativos), calculadas a partir do modelo linear de mistura espectral.

Variável	Intervalo (Li - Ls)	Média	DP	CV (%)
Fração vegetação	34,25 - 76,78	52,31	12,29	23,50
Fração solo	11,00 - 42,45	30,62	8,50	27,76
Fração sombra	6,73 - 25,85	15,54	5,19	33,41

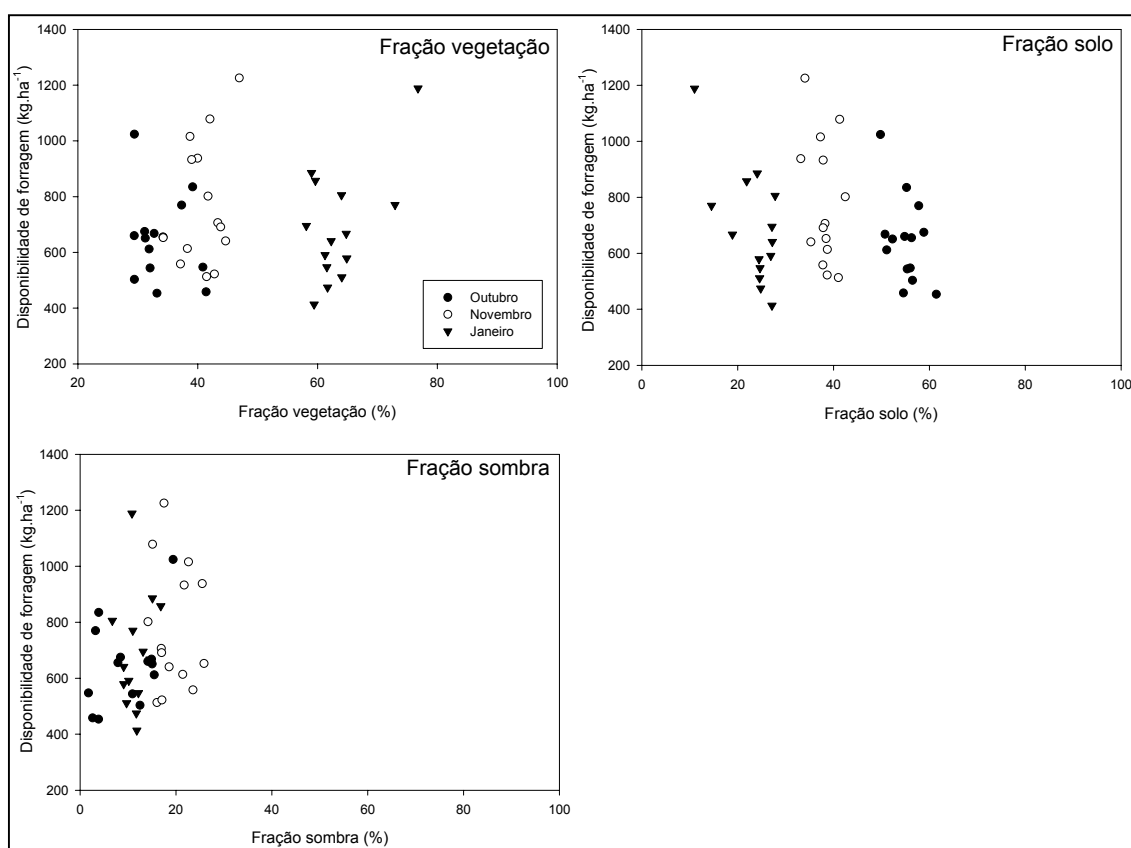


FIGURA 7.15 - Diagrama de dispersão de pontos da disponibilidade de forragem versus as frações vegetação, solo e sombra, calculadas a partir do modelo linear de mistura espectral.

Observa-se que da mesma forma que para as demais variáveis espectrais, as variáveis oriundas do modelo linear de mistura espectral apresentam a formação de blocos de valores associados à data de coleta de dados (Figura 7.15). Observou-se que na distribuição dos pontos da fração solo os valores dos meses de outubro foram bem mais altos que os demais, indicando a maior participação do solo nesta data na composição da reflectância do pixel. Este comportamento, também verificado durante os trabalhos em campo, onde no mês de outubro as espécies vegetais estavam no início da estação de crescimento existindo ainda uma grande quantidade de solo descoberto. Com o avanço da estação de crescimento os valores da fração solo diminuem, apesar de não ser observada uma grande variação na disponibilidade de forragem média entre as três datas de coleta de dados, como mostra a Tabela 7.11, que apresenta a comparação entre os valores médios de biomassa e das variáveis fração através do teste de Tukey.

TABELA 7.11 - Média das variáveis fração e disponibilidade de forragem para as diferentes datas de coleta de dados e o resultado do teste de Tukey para comparação das médias.

	Disp. forragem (kgMS.ha ⁻¹)	Solo (%)	Vegetação (%)	Sombra (%)
Outubro	646,91 ^A	55,06 ^C	33,83 ^A	9,58 ^A
Novembro	777,89 ^A	38,01 ^B	41,02 ^B	19,51 ^B
Janeiro	687,71 ^A	23,23 ^A	63,60 ^C	11,58 ^A

* Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey para $\alpha = 5\%$.

Observa-se pelo resultado do teste de Tukey que, mais do que a disponibilidade de forragem do dossel, fica evidente a expressão da fenologia e fisiologia da vegetação na resposta espectral detectada pelo satélite,

ressaltada pelos resultados do modelo linear de mistura espectral. Existe no mês de janeiro uma maior quantidade de perfilhos e folhas verdes (verificada durante os trabalhos em campo) que apresentam a mesma quantidade de biomassa, medida em unidades de matéria seca, quando comparada com os valores dos meses de outubro e novembro. Com o avanço da estação de crescimento a vegetação cobre mais o solo e as folhas apresentam paredes celulares mais finas, com maior conteúdo de água, com isso, para um mesmo peso seco, a vegetação apresenta um maior índice de área foliar ao final da estação de crescimento. Este comportamento fisiológico é ressaltado pelo modelo de mistura que apresenta o grau de cobertura do solo pela vegetação no momento da passagem do satélite, mais claramente observado ao analisarmos a variação antagônica entre a fração solo e a fração vegetação frente ao avanço da estação de crescimento da vegetação.

CAPÍTULO 8

PARAMETRIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO SUB-MODELO ESPECTRAL

8.1. Seleção das Variáveis Espectrais

Para estimar a disponibilidade de forragem inicial a partir da resposta espectral da vegetação (Equação 3.5) torna-se necessário selecionar uma variável espectral ou uma combinação destas variáveis que expresse de forma coerente as variações da disponibilidade de forragem. Através das análises da distribuição dos valores de disponibilidade de forragem coletados em campo versus as diferentes variáveis espectrais (apresentadas no Capítulo 7), não ficou evidenciada em nenhuma das análises, sensibilidade suficiente para explicar as variações na disponibilidade de forragem da forma desejada utilizando somente uma variável espectral.

Não foi observada a tendência de saturação dos valores das variáveis espectrais em relação a disponibilidade de forragem medida em campo, nos diagramas de dispersão de pontos apresentados no Capítulo 7, estando o conjunto de dados analisado na porção linear da relação exponencial apresentada na Figura 2.4, o que permite utilizar um modelo linear para relacionar a disponibilidade de forragem e as variáveis espectrais. Assim, utilizou-se um modelo de regressão linear múltiplo (Equação 8.1), para parametrizar o submodelo espectral, visando estimativa da disponibilidade de forragem inicial do modelo JONG.

$$DF_j = \beta_0 + \beta_1 VE_{1j} + \beta_2 VE_{2j} + \dots + \beta_k VE_{kj} + \varepsilon_j \quad (8.1)$$

onde:

j = número de observações, variando de 1 a 28

VE_k = variáveis espectrais independentes

β_k = parâmetros do modelo de regressão linear múltipla

ε_j = erro aleatório ou resíduo

Para a seleção das variáveis espectrais e parametrização do modelo linear múltiplo foram testados os dados espectrais dos meses de novembro de 2002 e janeiro de 2003, referentes ao pelo desenvolvimento vegetativo pleno da vegetação. Assim o modelo JONG passa a ser válido somente para o estágio de crescimento vegetativo da vegetação campestre natural após o cobrimento total do solo pela vegetação. Os dados foram agrupados em cinco conjuntos (C1: bandas individuais; C2: bandas individuais + índices de vegetação + diferença normalizada entre as bandas; C3: bandas individuais + variáveis Tasseled Cap; C4: bandas individuais + variáveis fração; C5: todo o conjunto de variáveis espectrais) e a equação de regressão foi ajustada através do método *Stepwise*, onde a cada passo adiciona-se à equação da estimativa da disponibilidade de forragem (Equação 8.2) uma variável do conjunto testado.

$$\hat{DF}_j = b_0 + b_1VE_{1j} + b_2VE_{2j} + \dots + b_kVE_{kj} \quad (8.2)$$

onde:

\hat{DF}_j = estimativa da disponibilidade de forragem

j = número de observações, variando de 1 a 28

VE_k = variáveis espectrais independentes

b_k = coeficientes do modelo de regressão linear múltipla

As variáveis são selecionadas com base na análise de variância visando encontrar a melhor solução do teste F (minimização da variância total da estimativa). Foi estabelecida uma tolerância de 0,01% para a correlação entre as variáveis que poderão integrar a equação definida. O resultado da seleção

das variáveis para cada conjunto testado é uma equação linear múltipla, as quais estão apresentadas na Tabela 8.1, juntamente com o valor do coeficiente de correlação linear múltiplo (R). Como obteve-se a mesma equação como resposta para mais de um conjunto testado, as equações obtidas foram renomeadas para A (conjuntos 1 e 2), B (conjunto 3 e 5) e C (conjunto 4).

TABELA 8.1 - Equações para a estimativa da disponibilidade inicial de forragem obtidas através do método *Stepwise* e o valor do coeficiente de correlação múltiplo (R).

ID	Equação	R
(A)	$DF_{t0} = 1988,45 - 173,75B7 + 191,56B3$	0,49
(B)	$DF_{t0} = 8568,53 - 346,21B7 - 75,85 \text{ Wetness}$	0,52
(C)	$DF_{t0} = 1275,96 - 182,45B7 + 29,96\text{Solo} + 32,45B4$	0,55

Observou-se um baixo coeficiente de correlação linear múltipla (R) para as equações ajustadas quando comparados com dados da literatura obtidos sobre o mesmo tipo de formação vegetal para a estimativa da biomassa vegetal a partir de dados radiométricos. Gamon et al. (1995) obtiveram valores de correlação de 0,84 entre a biomassa total e o NDVI, para vegetação campestre natural do estado da Califórnia (EUA), sendo estas medidas feitas em 23 pontos coletados na mesma data, utilizando um espectrorradiômetro portátil. Paruelo et al. (1997) obtiveram um coeficiente de determinação de 0,92 utilizando a média de 3 anos de produção medida em 19 pontos em uma relação exponencial com a integração anual do NDVI (medido pelo sensor AVHRR/NOAA) para gramíneas da região central dos Estados Unidos. Paruelo et al. (2000) estudando a vegetação campestre natural da Argentina, que apresenta muita semelhança com a vegetação do bioma *Campos Sulinos* (Deregibus, 2000) obteve um coeficiente de determinação de 0,74 utilizando

35 pontos para a estimativa, coletados em diferentes datas, sendo que os autores relacionaram através de um modelo linear a biomassa aérea acumulada em um período entre 35 a 95 dias e o NDVI (medido pelo sensor TM/Landsat).

O que se observa ao analisar os resultados obtidos por estes autores é que nenhum destes resultados foi obtido com o mesmo delineamento experimental do presente trabalho, no qual os dados foram coletados em pontos e datas distintas com o objetivo de estimar a disponibilidade de forragem instantânea no momento da passagem do satélite. Assim a comparação dos resultados deste trabalho com os resultados obtidos pelos autores supra citados torna-se inconsistente para fins de verificação da exatidão das equações ajustadas.

Os valores estimados para disponibilidade de forragem através das equações ajustadas versus os valores observados de disponibilidade de forragem em campo estão apresentados nos gráficos da Figura 8.1. Observou-se uma tendência de subestimação dos altos valores de disponibilidade de forragem medidos em campo e um comportamento inverso para os valores mais baixos de disponibilidade de forragem para as três equações ajustadas pelo método *Stepwise*.

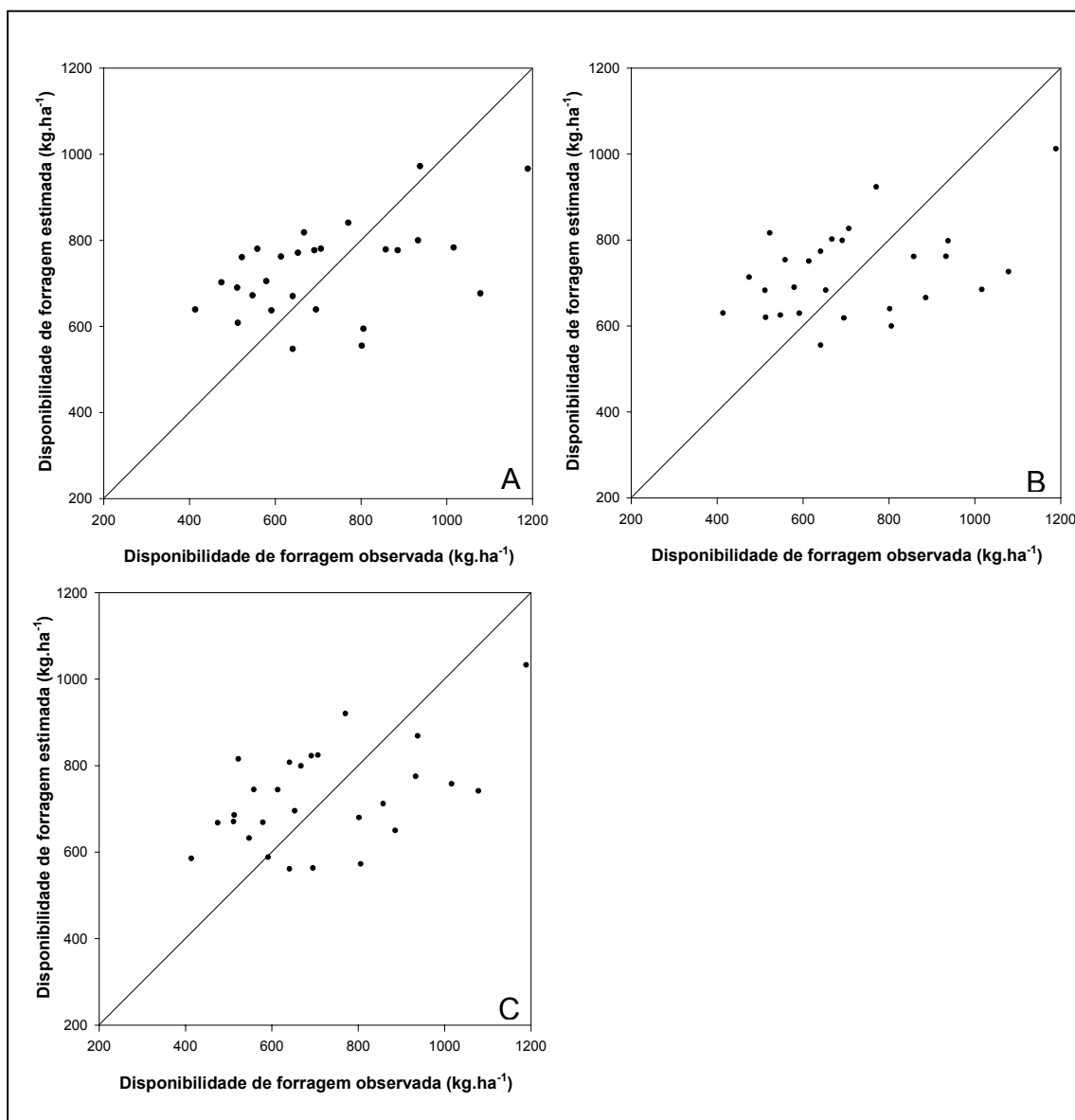


FIGURA 8.1 - Valores observados de disponibilidade de forragem versus valores estimados a partir das equações ajustadas pelo método *Stepwise*.

Para a verificação e seleção das equações obtidas pelo método *Stepwise* foram avaliados a significância dos coeficientes calculados (b_k) em representar os parâmetros populacionais (β_k) utilizando a análise de variância da regressão múltipla (teste F) e o teste t de *Student*, apresentados nas Tabelas 8.2, 8.3 e 8.4. O objetivo da análise de variância é testar a validade da equação obtida a

partir da hipótese nula ($H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_k = 0$). A aceitação desta hipótese significa ausência de validade na regressão obtida já que pelo menos uma das variáveis incluídas no modelo linear não apresenta relação com a variável dependente. Para testar validade da contribuição de cada uma das variáveis independentes utiliza-se o teste t , testando a hipótese nula ($H_0: \beta = 0$) para cada um dos coeficientes angulares estimadores dos parâmetros do modelo, utilizando como nível mínimo de significância 10%.

TABELA 8.2 - Resultados dos testes de significância da Equação A ($DF_{t0} = 1988,45 - 173,75B7 + 191,56B3$).

Hipótese testada	Teste (valor p)	Resultado
$H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$	3,96 (0,0321)	Rejeita H_0
$H_0: \beta_{\text{Banda 7}} = 0$	-2,43 (0,0227)	Rejeita H_0
$H_0: \beta_{\text{Banda 3}} = 0$	1,54 (0,1358)	Aceita H_0

TABELA 8.3 - Resultados dos testes de significância da Equação B ($DF_{t0} = 8568,53 - 346,21B7 - 75,85 \text{ Wetness}$).

Hipótese testada	Teste (valor p)	Resultado
$H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$	2,35 (0,0270)	Rejeita H_0
$H_0: \beta_{\text{Banda 7}} = 0$	-2,33 (0,0284)	Rejeita H_0
$H_0: \beta_{\text{Wetness}} = 0$	-1,86 (0,0741)	Rejeita H_0

TABELA 8.4 - Resultados dos testes de significância da Equação C ($DF_{t0} = 1275,96 - 182,45B7 + 29,96Solo + 32,45B4$).

Hipótese testada	Teste (valor p)	Resultado
$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$	3,53 (0,0299)	Rejeita H_0
$H_0: \beta_{\text{Banda 7}} = 0$	-2,7 (0,0083)	Rejeita H_0
$H_0: \beta_{\text{Fração solo}} = 0$	1,73 (0,0959)	Rejeita H_0
$H_0: \beta_{\text{Banda 4}} = 0$	1,19 (0,2440)	Aceita H_0

As equações obtidas pelo método *Stepwise* sempre serão válidas, pois são resolvidas pelo método dos mínimos quadrados, visando a rejeição da hipótese nula ($H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_k = 0$), sendo selecionada as variáveis que minimizam a soma de quadrados dos desvios da regressão. As variáveis independentes selecionadas podem não apresentar validade ($\beta = 0$) da sua contribuição para o cálculo do resultado final, apesar da equação gerada ser válida (Souza, 1998). Esta situação foi observada nas Equações A e C, ao adotar-se um nível mínimo de significância de 10% para teste dos parâmetros β . Na Equação A observou-se um nível mínimo de significância de 13,58% para o parâmetro β da banda 3. Apesar no nível mínimo de significância ter sido superior a 10%, optou-se por testar as estimativas de disponibilidade de forragem feitas através desta equação, já que são utilizados no cálculo somente os valores das bandas originais. Para o parâmetro β da banda 4, na Equação C observou-se um nível mínimo de significância para a rejeição da hipótese nula de 24,40%. Como este valor é muito maior que o nível mínimo de significância pré-estabelecido (10%), esta equação foi descartada do conjunto de equações analisadas.

Para avaliar a validade das relações encontradas através de um modelo linear múltiplo, no qual as variáveis independentes não apresentam distribuição

normal dos valores em relação à média, torna-se necessário fazer uma análise dos resíduos, sendo o resíduo ou desvio de uma estimativa expresso por:

$$e_j = DF_j - \hat{DF}_j \quad (8.3)$$

onde:

e_j = resíduo da estimativa j

DF_j = disponibilidade de forragem observada

\hat{DF}_j = estimativa da disponibilidade de forragem

O modelo de regressão linear múltiplo tem como pressuposição resíduos independentes, com distribuição normal dos valores em relação à média, a qual tem que ser nula. A variância associada aos resíduos corresponde aos erros do modelo linear múltiplo, assim a melhor solução para a obtenção da equação de regressão a partir do método *Stepwise* é aquela que minimiza a soma de quadrados dos desvios da estimativa (a variância) (Souza, 1998), dados por:

$$\sum_{j=1}^{28} e_j^2 = \sum_{j=1}^{28} (DF_j - \hat{DF}_j)^2 \quad (8.4)$$

Para testar a independência dos resíduos das estimativas da disponibilidade de forragem feitas a partir das Equações A e B, foram analisados os gráficos apresentados nas Figuras 8.2 e 8.3 que mostram a distribuição dos resíduos versus o identificador da amostra, a estimativa de disponibilidade de forragem, as variáveis independentes do modelo linear múltiplo e o tipo de solo da unidade amostral.

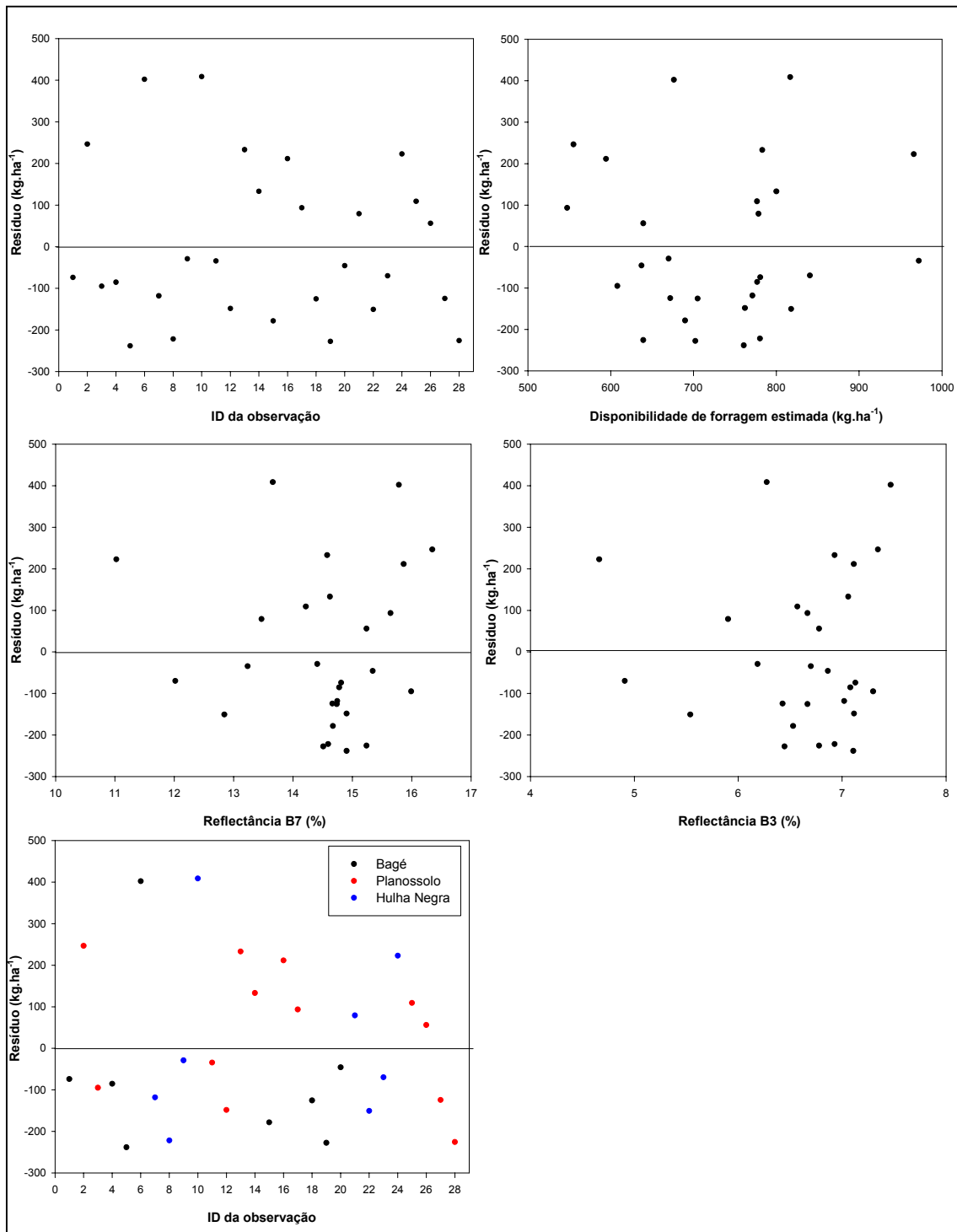


FIGURA 8.2 - Gráficos da distribuição dos resíduos calculados a partir da estimativa obtida pela Equação A ($DF_{10} = 1988,45 - 173,75B7 + 191,56B3$).

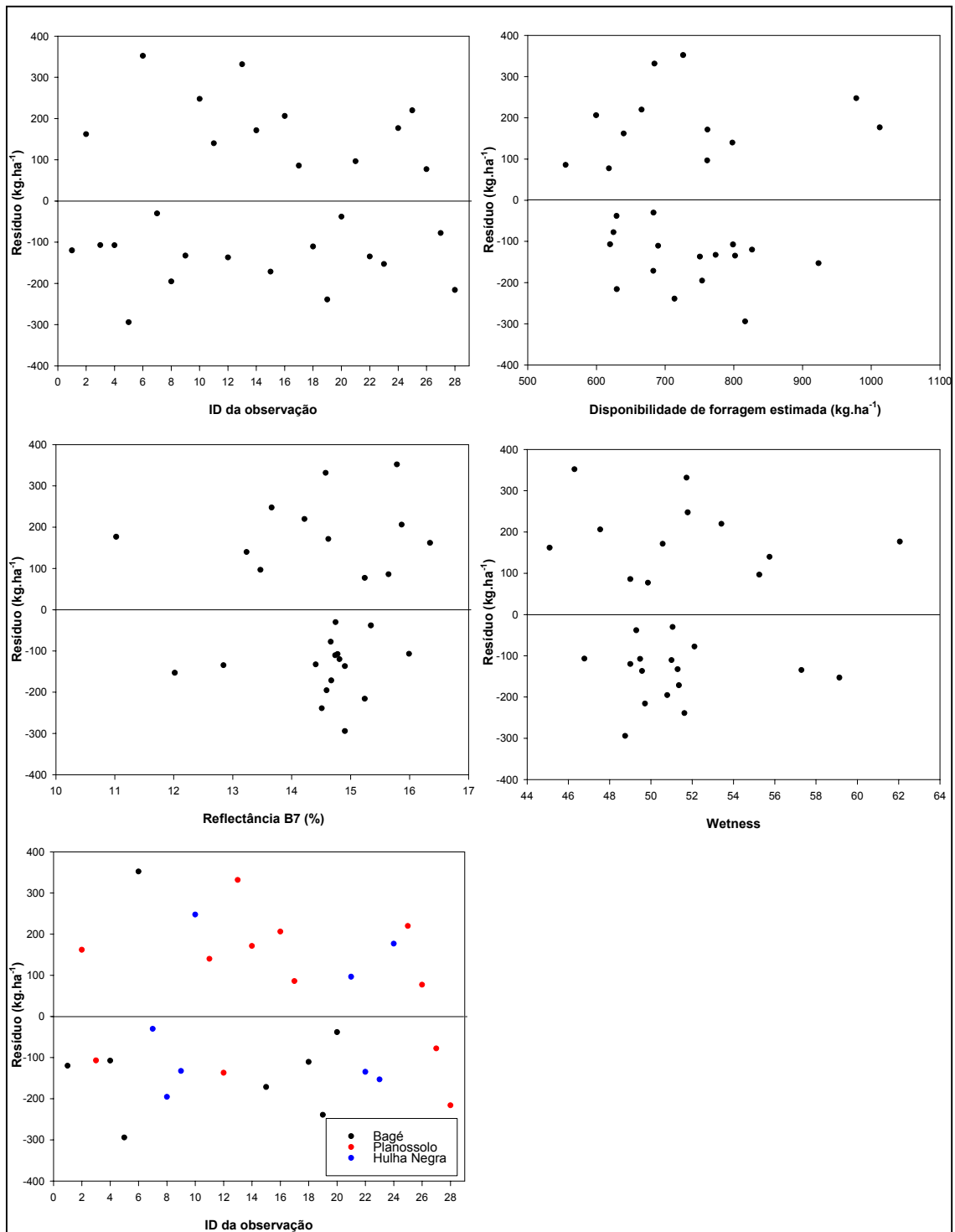


FIGURA 8.3 - Gráficos da distribuição dos resíduos calculados a partir da estimativa obtida pela Equação B ($DF_{t0} = 8568,53 - 346,21B7 - 75,85 \text{ Wetness}$).

Observou-se a independência dos resíduos com relação à data de coleta dos dados a partir da análise da distribuição dos resíduos versus o identificador da amostra, não existindo tendência de agrupamento dos valores na nuvem de pontos em nenhuma das relações analisadas. Também não foram verificadas tendências de agrupamentos de valores na nuvem de pontos dos resíduos versus os valores ajustados, indicando que a variância da estimativa é constante, não apresentando acréscimo nem decréscimo com o aumento dos valores ajustados. Na análise dos gráficos dos resíduos versus as variáveis independentes observaram-se áreas com poucos pontos em um dos extremos da distribuição, mas não evidenciou tendências de agrupamento de valores na nuvem de pontos, indicando a independência dos resíduos com relação aos valores das variáveis de entrada.

Pelas análises dos gráficos dos resíduos versus o tipo de solo foi verificada uma tendência de subestimativa dos valores de disponibilidade de forragem sobre os solos da unidade de mapeamento Bagé. Para verificar a existência de dependência dos valores das variáveis espectrais com o tipo de solo foi testada a igualdade das médias das variáveis reflectância das bandas 3 e 7 e valores da variável Wetness, separadas por tipo de solo das unidades amostrais, a partir do teste de Tukey, sendo o resultado do teste apresentado na Tabela 8.5.

TABELA 8.5 - Resultado do teste de Tukey para a comparação das médias coletadas sobre diferentes tipos de solos.

Unidade de mapeamento	B7 (%)	Wetness (NC)	B3 (%)
Bagé	14,94 ^A	49,60 ^A	6,91 ^A
Planossolo	15,04 ^A	50,09 ^A	6,90 ^A
Hulha Negra	13,34 ^B	54,83 ^B	5,93 ^B

*Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey para $\alpha = 5\%$.

Pela análise do resultado do teste de Tukey não foi observada a subestimativa dos valores das variáveis espectrais sobre o solo da unidade de mapeamento Bagé. Observou-se uma diferença significativa nos valores das variáveis espectrais medidas sobre as unidades amostrais posicionadas sobre a unidade de mapeamento de solo Hulha Negra, mas este efeito fica mascarado pelas atividades do manejo das pastagens (principalmente o número de animais em pastejo por área de pastagem), sendo esta uma característica de cada propriedade rural, já que estas unidades amostrais encontram-se no interior de uma mesma propriedade rural (Estância Recreio), como mostra a Tabela 5.2. Assim, esta avaliação fica prejudicada no sentido de verificar a existência de uma dependência espacial da disponibilidade de forragem não só com o tipo de solo e composição florística, mas também com relação ao manejo da atividade pastoril.

Conforme abordado no Item 6.2, a eficiência de conversão da radiação solar em biomassa aérea (ϵ_{CA}) necessita ser calculada para os diferentes tipos de solos que compõem a unidade homogênea. Com os valores de eficiência para cada tipo de solo torna-se possível uma análise estatística adequada da dependência espacial da disponibilidade de forragem com o tipo de solo, já que as variações do tipo de solo são responsáveis pelas variações nutricionais e também hídricas da vegetação campestre natural e, conseqüentemente, da resposta espectral da vegetação.

8.2. Integração dos Submodelos Agrometeorológico e Espectral

A partir modelo conceitual definido na Equação 3.7, foram integrados o submodelo agrometeorológico (que apresenta as variáveis agrometeorológicas que determinam o crescimento da vegetação) com o submodelo espectral (que faz a estimativa da disponibilidade de forragem inicial) para o cálculo do acúmulo de forragem das unidades amostrais. Foi considerado o intervalo de tempo de 16 dias e foram analisadas a utilização das Equações A e B (Tabela

8.1) referentes ao submodelo espectral, obtendo-se os seguintes modelos de regressão múltipla:

$$\Delta DF = \left[(1988,45 - 173,75B7 + 191,56B3) + \varepsilon_{CA} \sum_{t=0}^{16} PAR_i \right] * \frac{ETR}{ETP} \quad (8.5)$$

$$\Delta DF = \left[(9581,07 - 325,72B7 - 80,22Wetness) + \varepsilon_{CA} \sum_{t=0}^{16} PAR_i \right] * \frac{ETR}{ETP} \quad (8.6)$$

Para o cálculo do acúmulo de forragem a partir da Equação 8.5 (Modelo A) foram utilizados os dados de radiação fotossinteticamente ativa incidente, evapotranspiração real e evapotranspiração potencial apresentados na Tabela 6.1, da eficiência de conversão da radiação solar em matéria seca aérea apresentados na Tabela 6.3 e os valores de reflectância médios das bandas 3 e 7 apresentados no Apêndice D, para cada unidade amostral. Os cálculos foram feitos de forma a estimar o acúmulo de forragem para períodos de 16 dias, referentes aos períodos P6 (19 de novembro a 04 de dezembro) e P9 (6 de janeiro a 21 de janeiro). Os valores estimados para o acúmulo de forragem obtidos a partir do modelo A estão apresentados na Tabela 8.6. Para o cálculo do acúmulo de forragem a partir da Equação 8.6 (Modelo B) nos mesmos períodos de 16 dias, foram utilizadas as mesmas variáveis agrometeorológicas, os valores de reflectância médios da banda 7, apresentados no Apêndice D e os valores médios da variável Wetness, apresentados no Apêndice F, sendo os valores calculados apresentados na Tabela 8.7.

TABELA 8.6 - Valores da estimativa da disponibilidade de forragem real (kgMS.ha⁻¹) para as 14 unidades amostrais nos períodos de 16 dias (P6, P9), obtidos a partir da Equação 8.5 (Modelo A).

Unidade amostral	P6 (19/nov - 04/dez)	P9 (6/jan - 21/jan)
1	1206,3	1022,1
2	980,8	960,7
3	1033,6	930,5
4	1202,5	1031,9
5	1186,4	1030,1
6	1101,9	988,2
7	1196,8	1079,2
8	1205,9	1104,6
9	1095,5	1119,2
11	1242,5	1200,0
12	1397,7	1078,1
13	1187,7	989,6
14	1208,7	1010,6
15	1225,7	989,6

TABELA 8.7 - Valores da estimativa da disponibilidade de forragem real (kgMS.ha⁻¹) para as 14 unidades amostrais nos períodos P6 e P9, obtidos a partir da Equação 8.6 (Modelo B).

Unidade amostral	P6 (19/nov - 04/dez)	P9 (6/jan - 21/jan)
1	1252,2	1017,7
2	1065,4	964,1
3	1045,6	935,5
4	1224,5	1022,1
5	1242,2	1037,5
6	1152,0	983,2
7	1108,8	1068,2
8	1179,5	1094,3
9	1199,1	1172,5
11	1403,8	1229,7
12	1223,5	1006,6
13	1176,3	976,1
14	1110,2	980,4
15	1187,3	983,4

Para analisar a contribuição relativa das variáveis espectrais e meteorológicas na estimativa da disponibilidade de forragem, a porção agrometeorológica dos modelos A e B foi transformada em uma variável independente do modelo de regressão linear múltiplo, com coeficiente angular igual à unidade ($b = 1$). Esta transformação permite que sejam calculados os coeficientes de regressão

padronizados (b^*), que são utilizados para analisar a contribuição relativa das variáveis independentes do modelo sem considerar a escala de medição destas variáveis (Neter e Wasserman, 1974). Os coeficientes de regressão padronizados foram calculados a partir da Equação 8.7, estando os coeficientes calculados apresentados nas Tabelas 8.8 e 8.9.

$$b_k^* = b_k \sqrt{\frac{SQX_k}{SQY}} \quad (8.7)$$

onde:

SQY = soma dos quadrados dos desvios da variável dependente Y

SQX_k = soma dos quadrados dos desvios da variável independente X_k

b_k = coeficiente de regressão parcial da variável independente X_k

TABELA 8.8 - Coeficientes de regressão parcial (b^*) e seus valores relativos para as variáveis do modelo agrometeorológico-espectral A.

Variáveis	b^*	b^* (%)
B7	1,84	75,1
B3	0,12	4,9
Agrometeorológica	0,49	20

TABELA 8.9 - Coeficientes de regressão parcial (b^*) e seus valores relativos para as variáveis do modelo agrometeorológico-espectral B.

Variáveis	b^*	b^* (%)
B7	3,35	50,1
Wetness	2,65	39,7
Agrometeorológica	0,68	10,2

Pela análise dos valores dos coeficientes padronizados, através da sua transformação em valores relativos, observa-se que a disponibilidade de forragem inicial, representada pelas variáveis espectrais, possui maior importância no cálculo da estimativa do acúmulo de forragem nos dois modelos agrometeorológicos-espectrais testados. Isto se justifica pelo processo de acúmulo de biomassa, que é realizado pela fotossíntese, a partir da fixação do CO_2 atmosférico, para o qual existe uma dependência direta da quantidade de pigmentos fotossintéticos que farão a absorção da energia solar incidente (Salisbury e Ross, 1992). Assim, observa-se que a exatidão da estimativa da disponibilidade de forragem inicial tem fundamental importância na estimativa do acúmulo de forragem.

Em um modelo agrometeorológico-espectral as variáveis espectrais têm a função de expressar a condição inicial da vegetação, com relação a nutrição, sanidade e status hídrico das plantas. A condição inicial da vegetação é função dos fatores climáticos que atuaram no sistema solo-planta-atmosfera no período anterior à passagem do satélite e estes mesmos fatores climáticos alteram a resposta espectral dos alvos da superfície que é detectada pelo sensor orbital (Mather, 1999). Com isso a parametrização da porção espectral do modelo JONG teria resultados diferentes caso fossem utilizadas imagens adquiridas em datas, ou se tivesse ocorrido uma forte chuva antes da data de

passagem do satélite, em função dos efeitos atmosféricos não totalmente eliminados pelo processo de correção atmosférica e retificação radiométrica.

8.3. Avaliação da Espacialização do Modelo JONG

Para a melhor visualização da aplicabilidade dos modelos agrometeorológicos-espectrais A e B foram gerados mapas síntese de disponibilidade de forragem, a partir da espacialização dos valores estimados. Foram utilizados os valores de radiometria das imagens ETM+/Landsat, adquiridas em 19 de novembro de 2002 e 6 de janeiro de 2003, para o cálculo das variáveis espectrais gerando mapas de estimativa da disponibilidade de forragem acumulada em um período de 16 dias, com uma resolução espacial de 30 metros, apresentados nas Figuras 8.4 e 8.5. Utilizou-se para a espacialização dos dados somente uma parte da área de estudos sobre a qual encontram-se as unidades amostrais, com a finalidade de analisar os resultados estimados pelos modelos.

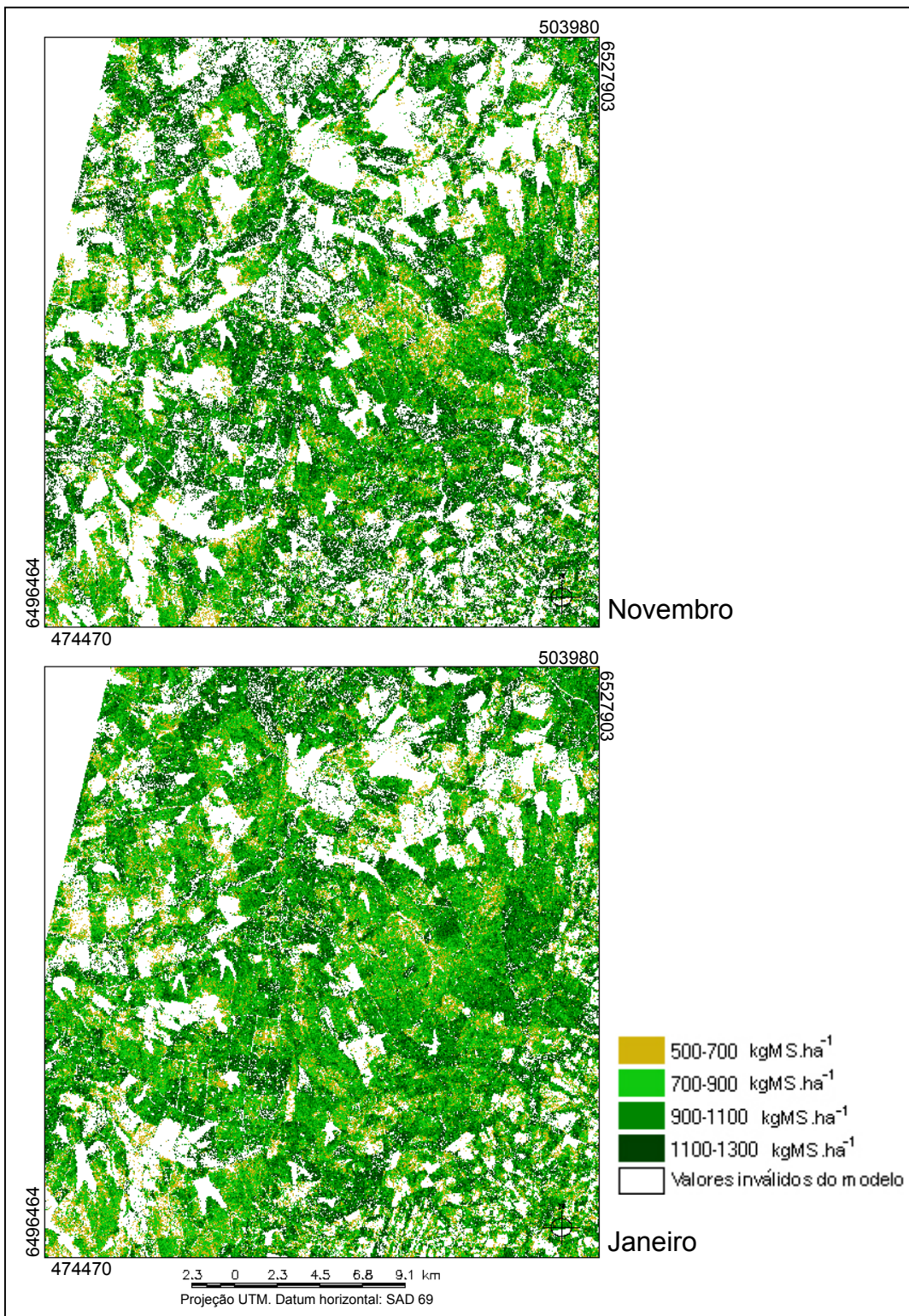


FIGURA 8.4 - Espacialização da estimativa da disponibilidade de forragem feita a partir do modelo agrometeorológico-espectral A, para os períodos P6 e P9.

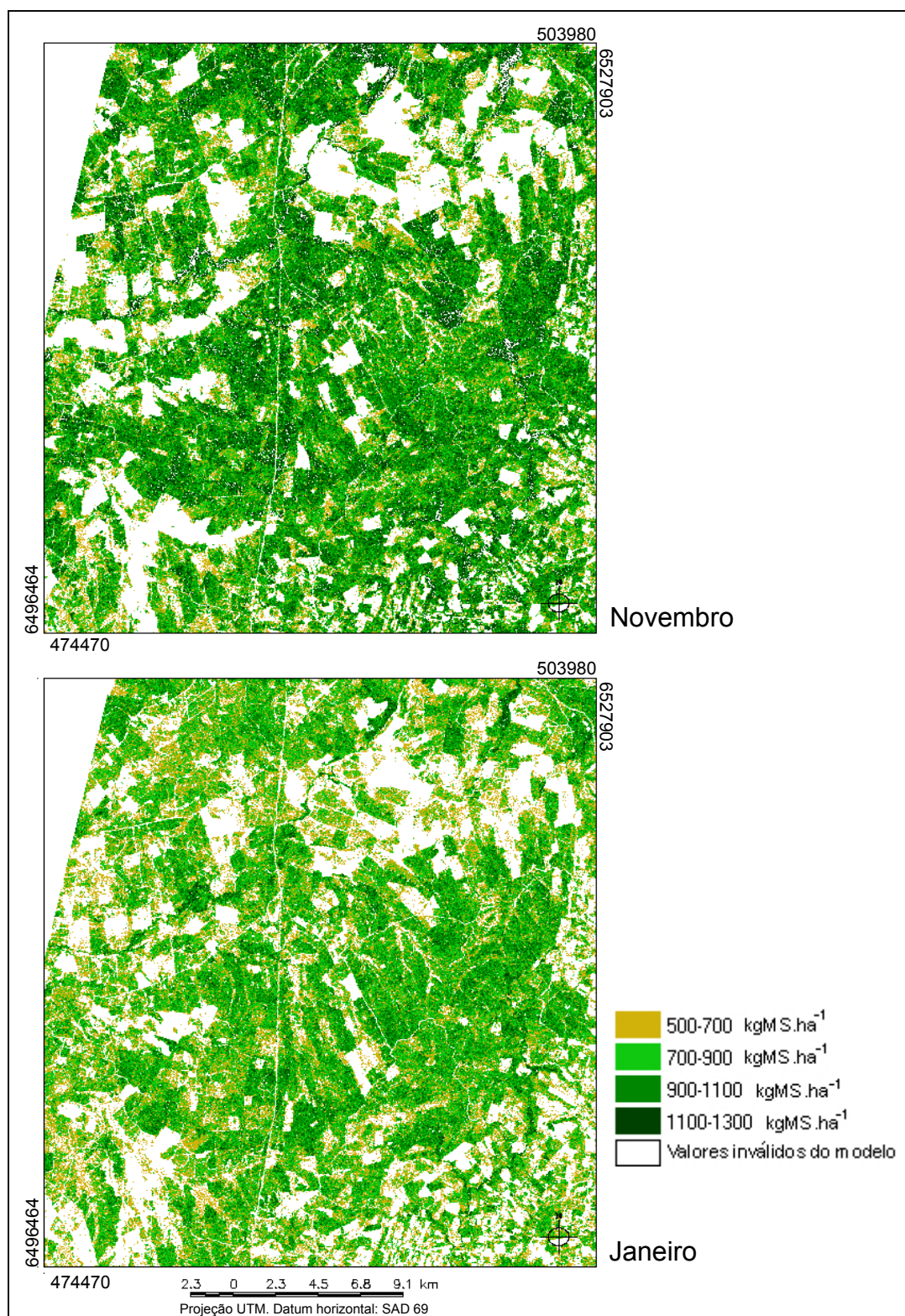


FIGURA 8.5 - Espacialização da estimativa da disponibilidade de forragem feita a partir do modelo agrometeorológico-espectral B, para os períodos P6 e P9.

Ao observar os mapas de disponibilidade de forragem gerados a partir do modelo agrometeorológico-espectral A (Figura 8.4) verifica-se uma tendência dos valores estimados representarem os valores extremos coletados em campo (entre 1100 e 1330 kgMS.ha⁻¹). Já ao observarmos os mapas de disponibilidade de forragem gerados pelo modelo agrometeorológico-espectral B (Figura 8.5) observa-se uma tendência das estimativas ficarem mais próximas dos valores médios calculados. Nestes mapas observa-se também a expressão da diminuição da disponibilidade de forragem em decorrência do déficit hídrico que existiu na área de estudos durante o período P9 (6 de janeiro a 21 de janeiro de 2003), fazendo com que as estimativas para este período sejam menores que as estimativas feitas para o período P6, onde não existiu déficit hídrico.

Pela análise visual dos mapas apresentados observou-se uma homogeneização dos valores de disponibilidade de forragem após o fatiamento dos valores estimados, suavizando a grande variabilidade espacial verificada nos valores espectrais das unidades amostrais (apresentados no Capítulo 7) e dos valores de disponibilidade de forragem (apresentados no Capítulo 5). O tamanho do pixel influencia diretamente na variabilidade espectral da imagem, neste tipo de formação vegetal, como demonstrado por Paruelo et al. (2000) que observaram uma alta variabilidade dos valores do NDVI medidos sobre os campos do Rio da Prata, na Argentina, em janelas de pixels de 200 por 200 metros, obtidos a partir sobre uma imagem Landsat, sendo que a variabilidade espectral diminuía à medida que aumentava o tamanho da janela (foram avaliadas janelas de até 3200 metros). O fatiamento dos valores de entrada das variáveis espectrais tende a suavizar o mapa de biomassa resultante. Neste trabalho optou-se por fatiar o mapa resultante e não os valores de entrada das variáveis espectrais. O fatiamento do mapa final tem por vantagem fatiar o resultado de uma operação que feita sem a degradação dos dados de entrada do modelo agrometeorológico-espectral.

Para melhor analisar as variações espaciais das estimativas da disponibilidade de forragem foi descontado do valor da estimativa de cada pixel a média dos valores estimados sobre as unidades amostrais a partir do modelo agrometeorológico-espectral analisado, gerando mapas de resíduos os quais estão apresentados nas Figuras 8.6 e 8.7. Pela análise visual destes mapas observa-se uma tendência de sub-estimativas dos valores de disponibilidade de forragem para as estimativas feitas tanto a partir do modelo agrometeorológico-espectral A quanto pelo modelo agrometeorológico-espectral B.

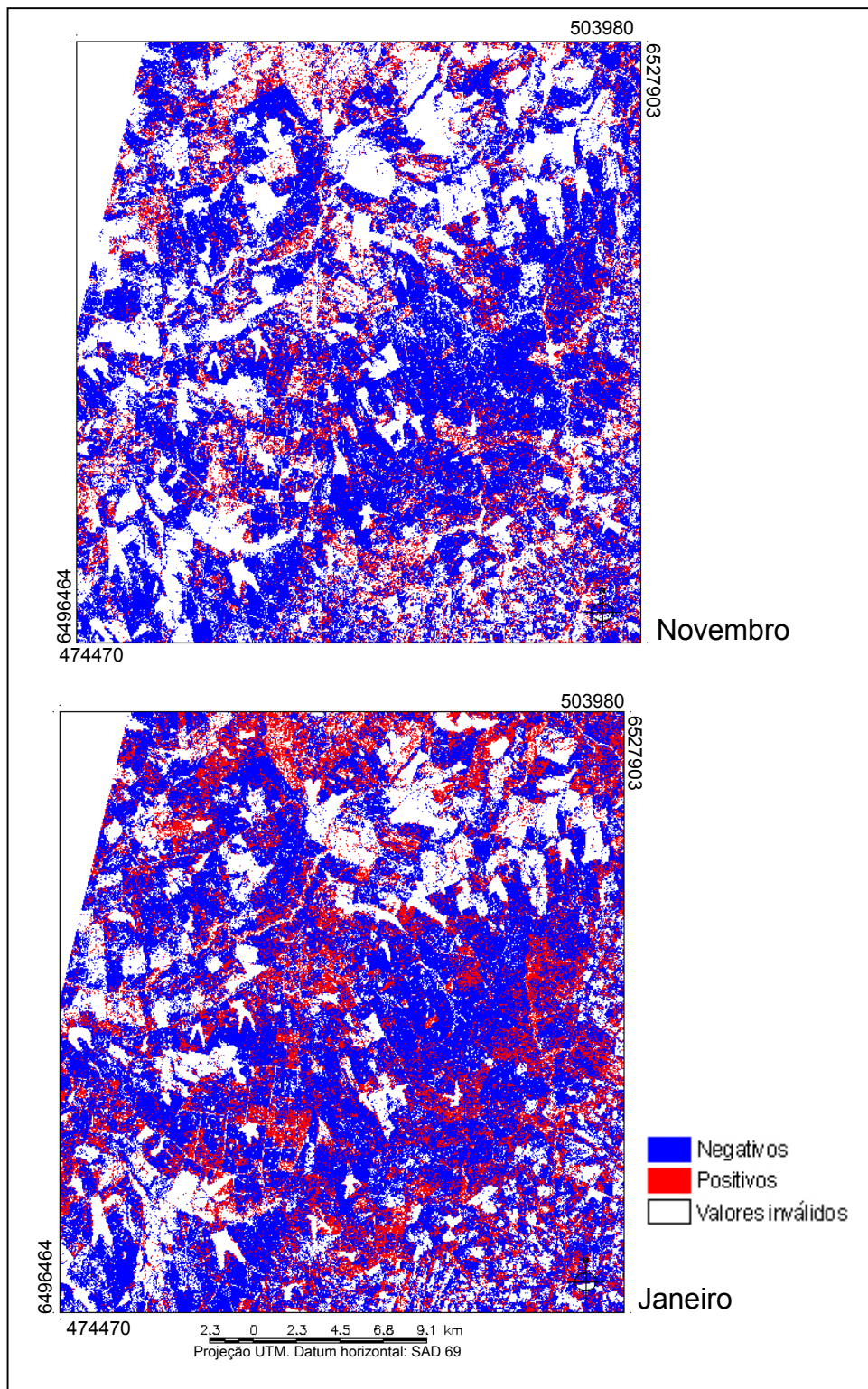


FIGURA 8.6 - Espacialização do resíduo da estimativa da disponibilidade de forragem feita a partir do modelo agrometeorológico-espectral A, para os períodos P6 e P9.

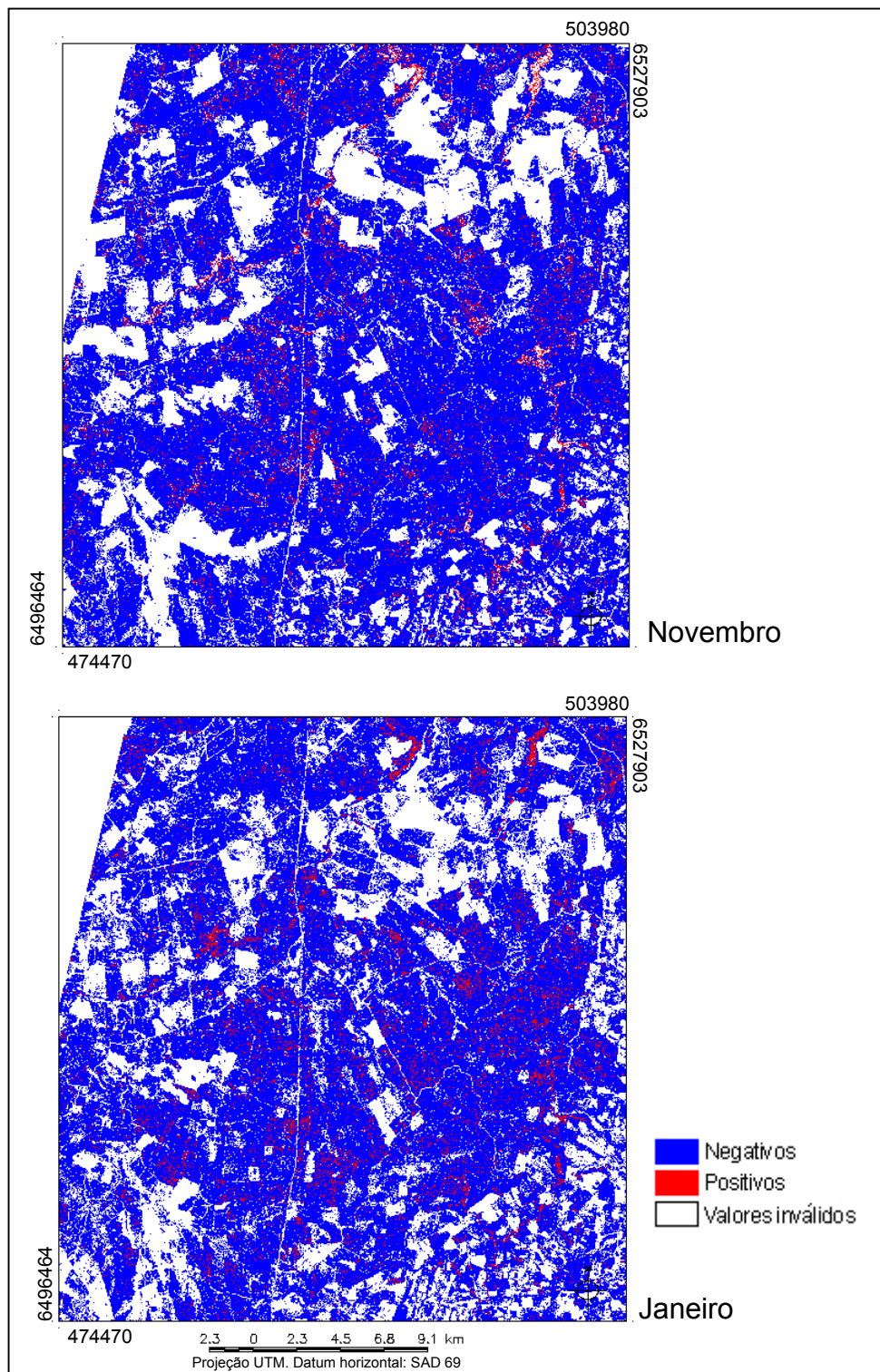


FIGURA 8.7 - Espacialização do resíduo da estimativa da disponibilidade de forragem feita a partir do modelo agrometeorológico-espectral B, para os períodos P6 e P9.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi definido o modelo JONG um modelo agrometeorológico-espectral conceitual para a estimativa do acúmulo de forragem na unidade homogênea Campo Sul localizada sobre o bioma *Campos Sulinos*. O modelo foi desenvolvido a partir do desenvolvimento de dois submodelos: o submodelo agrometeorológico de estimativa da produção de forragem, ao qual foi integrado o submodelo espectral, que tem por finalidade estimar a disponibilidade inicial de forragem sobre a qual irão atuar os fatores agrometeorológicos que definem o crescimento da vegetação.

As variáveis agrometeorológicas utilizadas para estimar o crescimento da vegetação foram a radiação fotossinteticamente ativa incidente, a evapotranspiração potencial e a evapotranspiração real. A eficiência da conversão da radiação solar incidente em biomassa aérea foi parametrizada com dados coletados sobre a unidade de mapeamento de solos Bagé e foi extrapolada para uma área homogênea, quanto a cobertura vegetal e resposta espectral (unidade homogênea Campo Sul), mas heterogênea quanto ao tipo de solo. Como o tipo de solo tem influencia direta sobre o crescimento da vegetação campestre natural torna-se necessário parametrizar esta eficiência para os diferentes tipos de solo. Da mesma forma tem-se necessário o estabelecimento de valores da capacidade de armazenamento de água para os diferentes tipo de solo que são utilizados para o cálculo da evapotranspiração real, ficando, tanto o cálculo da eficiência da conversão da radiação solar incidente em biomassa aérea, quanto o cálculo da capacidade de armazenamento de água no solo, como sugestões para trabalhos futuros.

As variáveis espectrais que melhor representam a dinâmica da disponibilidade de forragem na unidade homogênea Campo Sul são a reflectância espectral

das bandas 3 e 7 e a componente Wetness da transformação Tasseled Cap. Estas variáveis foram eficientes em representar a condição inicial da vegetação nas condições estudadas. A utilização de um maior número de amostras de disponibilidade de forragem (um maior número de unidades amostrais e um maior número de amostras no interior das unidades amostrais), tenderia a minimizar a variância das estimativas feitas pelo submodelo espectral, pela suavização da variância dos dados de entrada. Assim para trabalhos futuros recomenda-se aumentar a grade amostral e também medir outras variáveis biofísicas além da matéria seca, tais como a matéria fresca, o índice de área foliar e a taxa de crescimento da vegetação e também o consumo animal, que teriam grande validade para discutir os dados radiométricos das diferentes datas de coleta de dados.

Salienta-se que os resultados da parametrização do submodelo espectral seriam diferentes os dados espectrais tivessem sido coletados por outro sensor, ou se as condições climáticas que antecedessem a data de passagem do satélite fossem muito distintas das observadas. Para estudos semelhantes, a serem realizados com sensores orbitais distintos, torna-se necessário fazer uma nova calibração e parametrização das variáveis espectrais. Uma parametrização robusta do submodelo espectral para um determinado sensor, feita a partir de um conjunto de dados maior, coletados em diferentes anos, tornará operacional a metodologia para estimativa da disponibilidade de forragem a partir do modelo JONG.

As duas parametrizações do modelo JONG avaliadas neste estudo foram especializadas sobre a área de estudos permitindo visualizar a aplicabilidade do modelo em escala local, para a estimativa da produção de forragem, nas diferentes épocas de coleta de dados analisadas. O modelo JONG foi sensível para expressar as variações espaciais da disponibilidade de forragem e a diminuição da produção em função da ocorrência de déficit hídrico durante o período de crescimento vegetativo das plantas, após a total cobertura do solo, não sendo válido para outros estádios fenológicos da vegetação.

Os dados de radiação solar incidente de ondas curtas previstos pelo modelo Eta-CPTEC com dois meses de antecedência se mostraram adequados para integrar modelos de previsão de rendimento vegetal em escala local, ao propiciar estimativas adequadas da variável radiação fotossinteticamente ativa incidente, apesar da escala regional dos dados de saída deste modelo. A utilização de dados de previsão dos elementos climáticos torna possível a realização de estimativas do crescimento das plantas, tornando operacional as metodologias de previsão de safras, que têm como dados de entrada a magnitude dos fatores climáticos de um clima que ainda não ocorreu.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Second simulation of satellite signal in the solar spectrum - 6S, 4.1. Antunes, M.A.H. 2001. 1 CD-ROM

Arruda, M.B. **Ecossistemas brasileiros**. Brasília: IBAMA, 2001. 49p.

Asrar, G.; Fuchs, M.; Kanemasu, E.T.; Hatfield, J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**, v.76, n.2, p.300-306, 1984.

Baier, W. Note on the terminology of crop-weather models. **Agricultural Meteorology**, v.20, n.2, p.137-145, 1979.

Baret, F.; Guyot, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, v.35, n.2, p.161-173, 1991.

Barni, N.A.; Berlato, M.A.; Bergamaschi, H.; Riboldi, J. Modelo agrometeorológico do girassol: I. Relação entre rendimento e índice hídrico. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.2, n.1, p.7-18, 1996.

Bergamaschi, H. Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas. In: _____. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1992. 125p. cap.2, p.25-32.

Berlato, M. A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja no Rio Grande do Sul e disponibilidade hídrica**. 1987. 94p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1987.

Berlato, M.A.; Molion, L.C.B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre: IPAGRO, 1981. 96p.

Berretta, E.J.; Risso, D.F.; Montossi, F.; Pigurina, G. Campos in Uruguay. In: Lelaire, G.; Hodgson, J.; De Moraes, A.; Carvalho, P.C.F.; Nabinger, C. (ed.) **Grassland ecophysiology and grazing ecology**. Cambridge: CABI Publishing, 2000. cap.19, p.377-394.

Boegh, E.; Soegaard, H.; Broge, N.; Hasager, C.B.; Jensen, N.O.; Schelde, K.; Thomsen, A. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v.81, n.2, p.179-193, 2002.

Boldrini, I.I. **Boletim do instituto de biociências: campos do Rio Grande do Sul, caracterização fisionômica e problemática ocupacional**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997. 39 p.

Boote, K.J.; Jones, J.W.; Pickering, N.B. Potencial uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, v.88, n.5, p.704-716, 1996.

Bork, E.W.; West, N.E.; Prince, K.P.; Walker, J.W. Rangeland cover component quantification using broad (TM) and narrow-band (1.4 nm) spectrometry. **Journal of Range Management**, v.52, n.3, p.249-257, 1999.

Câmara, G.; Souza, R.C.M.; Freitas, U.M.; Garrido, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computer & Graphics**, v.20, n.3, p.395-403, 1996.

Chapin III, F.S., Bloom, A.J., Field, C.B., Waring, R.H. Plant response to multiple environmental factors. **BioScience**, v.37, n.1, p.49-57, 1987.

Chavez Jr., P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, n.3, p.459-479, 1988.

Chuvieco, E. **Fundamentos de teledetección espacial**. Madrid: Ediciones Rialp, 1996. 568p.

Clark, P.E.; Seyfried, M.S.; Harris, B. Intermountain plant community classification using Landsat TM and SPOT HRV data. **Journal of Range Management**, v.54, n.2, p.152-160, 2001.

Corrêa, F.L. **Produção e qualidade de uma pastagem nativa do Rio Grande do Sul sob níveis de oferta de forragem a novilhos**. 1993. 167p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1993.

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) **Modelo Eta**. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/prevnum/exp_eta.shtml>. Acesso em: nov. 2003.

Cohen, W.B.; Maersperger, T.K.; Gower, S.T.; Turner, D.P. An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. **Remote Sensing of Environment**, v.84, n.4, p.561-571, 2003.

Crist E.P.; Cicone, R.C. Application of the tasseled cap concept to simulated thematic mapper data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.50, n.3, p. 343-352, 1984a.

Crist E.P.; Cicone, R.C. Physically-based transformation of thematic mapper data - the TM tasseled cap. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.GE-22, n.3, p.256-263, 1984b.

Cunha, G.R. Balanço hídrico climático. In: Bergamaschi, H. (ed.) **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1992. cap.5, p.63-84.

Curran, P.J.; Milton, E.J. The relationships between the chlorophyll concentration, LAI and reflectance of a simple vegetation canopy. **International Journal of Remote Sensing**, v.4, n.2, p.247-255, 1983.

Departamento Nacional de Meteorologia (DNMET) **Normais climatológicas (1961-1990)**. Brasília: DNMET, 1992. 84p.

Deregibus, V.A. Argentina's humid grazing lands. In: Lelaire, G.; Hodgson, J.; De Moraes, A.; Carvalho, P.C.F.; Nabinger, C. (ed). **Grassland ecophysiology and grazing ecology**. Cambridge: CABI Publishing, 2000. cap.20, p.395-405.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 1999. 412p.

Escosteguy, C.M.D. **Avaliação agrônômica de uma pastagem natural sob níveis de pressão de pastejo**. 1990. 231p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1990.

Federação da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul (FARSUL) **Índices de lotação pecuária para o Rio Grande de Sul**. Porto Alegre: FARSUL, 1997. 32p.

Fonseca, E.L. **Caracterização espectral e índices de vegetação em *Paspalum notatum* Flüggé var. *notatum* com vistas à modelagem de crescimento**. 2000. 61p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2000.

Fonseca, E.L.; Rosa, L.M.G.; Fontana, D.C. Caracterização espectral de *Paspalum notatum* em diferentes níveis de adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.3, p.365-371, 2002.

Fontana, D.C. Notas de aula da disciplina de Bioclimatologia Agrícola, curso de Pós-Graduação em Agrometeorologia, Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998.

Fontana, D.C.; Weber, E.; Ducati, J.R.; Figueiredo, D.C.; Bergamaschi, H.; Berlato, M.A. Monitoramento e previsão de safras no Brasil. In: Simposio Latino Americano de Percepción Remota, 9., 2000, Puerto Iguazú. **Anais...** Puerto Iguazú: SELPER, 2000. 1CD-ROM.

França, S.; Rosa, L.M.; Bergamaschi, H.; Nabinger, C.; Spanennberg, P. Radiação fotossinteticamente ativa e sua relação com a radiação solar global em dossel de alfafa em função do índice de área foliar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.2, p.147-153, 1997.

Gamon, J.A.; Field, C.B.; Goulden, M.L.; Griffin, K.L.; Hartley, A.E.; Joel, G.; Peñuelas, J.; Valentini, R. Relationships between NDVI, canopy structure and photosynthesis in three californian vegetation types. **Ecological Applications**, v.5, n.1, p.28-41, 1995.

Gillet, M. **Las gramíneas forrajeras**. Zaragoza: Acribia, 1984. 355p.

Girardi-Deiro, A.M.; Gonçalves, J.O.N; Gonzaga, S.S. Campos naturais ocorrentes nos diferentes tipos de solo no Município de Bagé, RS. 2: Fisionomia e composição florística. **Iheringia**, série botânica, v.42, n.1, p.55-79, 1992.

Gleriani, J.M. Antunes, M.A.H. Epiphany, J.C.N. Coeficientes da transformação espectral tasseled cap para uma cena com predomínio de latossolo roxo. In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p.101-107. 1 CD-ROM.

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

Gomes, K.E. **Dinâmica e produtividade de uma pastagem natural do Rio Grande do Sul após seis anos de aplicação de adubos, diferimentos e oferta de forragem**. 1996. 223p. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1996.

Gonçalves, J.O.N. **Campos naturais ocorrentes nos diferentes tipos de solo no Município de Bagé, RS**. 1: caracterização, localização e principais componentes da vegetação. Bagé: Embrapa, 1998. 34p.

Gonçalves, J.O.N. **Campos naturais da região da campanha do Rio Grande do Sul**. Bagé: Embrapa, 1999. 30p.

Hall, D.O., Rao, K.K. **Photosynthesis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 211p.

Hall, F.G.; Strebel, D.E.; Nickeson J.E; Goetz, S.J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. **Remote Sensing of Environment**, v.35, n.1, p.11-27, 1991.

Hanks, R.J. Model for predicting plant yield as influenced by water use. **Agronomy Journal**, v.66, n.5, p.660-665, 1974.

Hanks, R.J.; Hill, R.W **Modeling crop responses to irrigation in relations to soils, climate and salinity**. Jerusalem: International Irrigation Information Center, 1980. 66p.

Hill, M.J.; Donald, G.E.; Vickery, P.J.; Moore, A.D.; Donnelly, J.R. Combining satellite data with a simulation model to describe spatial variability in pasture growth at a farm scale. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v.39, n.3, p.285-300, 1999.

Huang, C.; Wylie, B.; Yang, L.; Homer, C.; Zylstra, G. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.8, p.1741-1748, 2002.

Huber, O. Neotropical savannas: their flora and vegetation. **Trends in Ecology and Evolution**, v.2, n.3, p.67-71, 1987.

Huete, A.R. A soil-adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v.25, n.3, p.295-309, 1988.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) **Censo Agropecuário Brasileiro 1995-1996**. Disponível em: <<http://www.ibge.net/ibge/default.php>>. Acesso em: set.2002.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) **Pesquisa Pecuária Municipal**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em jan.2004.

Jackson, R.D.; Reginato, R.J.; Pinter JR, P.J.; Isdo, S.B. Plant canopy information extraction from composite scene reflectance of row crops. **Applied Optics**, v.18, n.22, p.3775-3782, 1979.

Jensen, M.E. Water consumption by agricultural plants. In: Kozlowsky, T.T.; (ed.) **Water deficits and plant growth**. New York: Academic Press, 1968. v.2. cap.1, p.1-22.

Jones, H.G. **Plants and microclimate**. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 323p.

Kanemasu, E.T.; Stone, L.R.; Powers, W.L. Evapotranspiration model tested for soybean and sorghum. **Agronomy Journal**, v.68, n.6, p.840-842, 1976.

Kaspebauer, M.J. Light and plant development. In: Wilkinson, R.E. (Ed.) **Plant-environment interactions**. New York: Marcel Dekker, 1994. cap.3, p.83-123.

Kauth, R. J.; Thomas, G. S. The tasseled cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen in Landsat. In: Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, 1976, West Lafayette. **Proceedings**... West Lafayette, Indiana, 1976. p.41-51.

Kerdiles, H.; Grondona, M.O. NOAA-AVHRR NDVI decomposition and subpixel classification using linear mixing in the Argentinean Pampa. **International Journal of Remote Sensing**, v.16, n.7, p.1303-1325, 1995.

King, D. **Remote sensing and agrometeorological models for yield forecasts**. Ispra: Joint Research Centre, 1989. 25p.

Kiniry, J.R.; Jones, C.A.; O'Toole, J.C.; Blanchet, R.; Cabelguenne, M.; Spanel, D.A. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain crop species. **Field Crops Research**, v.20, n.1, p.51-64, 1989.

Knipling, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance visible and near infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.1, n.3. p.155-159, 1970.

Le Roux, X.; Gauthier, H.; Bégué, A.; Sinoquet, H. Radiation absorption and use by humid savanna grassland: assessment using remote sensing and modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.85, n.2, p.117-132, 1997.

Maas, S.J. Parametrized model of gramineous crop growth: I. Leaf area and dry mass simulation. **Agronomy Journal**, v.85, n.2, p.348-353, 1993.

Macedo, W. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Município de Bagé, RS**. Bagé: Embrapa, 1984. 69p.

Machado, L.A.Z. **Manejo de pastagem nativa**. Guaíba: Editora Agropecuária, 1999. 156p.

Marschner, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 1990. 674p.

Mather, P.M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. Great Britain: John Wiley & Sons, 1999. 210p.

Melo, R.W.; Fontana, D.C.; Berlatto, M.A. Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento da soja par o estado do Rio Grande do Sul. In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p.173-179. 1 CD-ROM.

Memorial do Rio Grande do Sul **Linha do tempo**. Disponível em:<http://www.memorial.rs.gov.br/index_tempo.html>. Acesso em: maio 2002.

Monteith, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v.281, series B, p.277-294, 1977.

Monteith, J.L.; Unsworth, M.H. **Principles of environmental physics**. London: Edward Arnold, 1990. 291p.

Mota, F.S.; Goedert, C.O. Lopes, N.F.; Garcez, J.R.B.; Gomes, A.S. Balanço hídrico do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.5, n.1, p.1-27, 1970.

Nabinger, C. Aspectos ecofisiológicos de manejo de pastagens e utilização de modelos como ferramenta de diagnóstico e indicação de necessidades de pesquisa. In: Reunião do Grupo técnico em Melhoramento e Utilização de Recursos Forrageiros das Áreas Tropical e Subtropical do Cone Sul, 16, 1996, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: FAO, 1996. p.17 - 62

Nabinger, C. De Moraes, A. Maraschin, G.E. Campos in southern Brazil. In: Lelaire, G.; Hodgson, J.; De Moraes, A.; Carvalho, P.C.F.; Nabinger, C. (ed.) **Grassland ecophysiology and grazing ecology**. Cambridge: CABI Publishing, 2000. cap.18, p.355-376.

National Aeronautics and Space Administration (NASA) **Landsat 7: Science data users handbook**. Disponível em: <http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/las/handbook/handbook_toc.html>. Acesso em: set. 2003.

Neter, J.; Wasserman, W. **Applied linear statistical models: regression, analysis of variance and experimental designs**. Illinois: Richard D. Irwin, Inc., 1974. 842p.

Nobel, P. S. **Physicochemical and environmental plant physiology**. London: Academic Press, 1999. 474p.

Nobel, P.S.; Forseth, I.; Long, S.P. Canopy structure and light interception. In: Hall, D.O.; Scurlock, H.R.; Bolhàr-Nordenkamp; Leegood, R.C.; Long, S.P. **Photosynthesis and production in a changing environment**. London: Chapman & Hall, 1993. cap.2, p.79-90.

Norman, J.M. Modeling the complete crop canopy. In: Barfield, B.J.; Gerber, J.F. **Modification of the aerial environment of plants**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1979. cap.6, p.249-277, 1979.

Nouvellon, Y.; Seen, D.L.; Rambal, S; Bégué, A.; Moran, M.S.; Kerr, Y.; Qi, J. Time course of radiation use efficiency in a shortgrass ecosystem: consequences for remotely sensed estimation of primary production. **Remote Sensing of Environment**, v.71, n.1, p.43-55, 2000.

Nouvellon, Y.; Moran, M.S.; Seen, D.L.; Bryant, R.; Rambal, S; Ni, W.; Bégué, A.; Chehbouni, A.; Emmerich, W.E.; Heilman, P.; Qi, J. Coupling a grassland ecosystem model with Landsat imagery for a 10-year simulation of carbon and water budgets. **Remote Sensing of Environment**, v.78, n.2, p.131-149, 2001.

Paruelo, J.M.; Epstein, H.E.; Lauenroth, W.K.; Burke, I.C. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. **Ecology**, v.78, n.3, p.953-958, 1997.

Paruelo, J.M.; Oesterheld, M.; Di-Bella, C.M.; Arzadum, M.; Lafontaine, J.; Cahuep, M.; Rebella, C.M. Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. **Applied Vegetation Science**, v.3, n.2, p.189-195, 2000.

Passioura, J.B. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering? **Agronomy Journal**, v.88, n.5, p.690-694, 1996.

Penman, H.L. Evaporation: an introductory survey. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v.4, n.1, p.9-29, 1956.

Pessoa, M.C.P.Y; Luchiari Junior, A.; Fernandes, E.N.; Lima, M.A. **Principais modelos e simuladores utilizados para a análise de impactos ambientais das atividades agrícolas**. Jaguariuna: Embrapa, 1997. 83p.

Plummer, S.E. Perspectives on combining ecological process models and remotely sensed data. **Ecological Modelling**, v.129, n.2, p.169-186, 2000.

Ponzoni, F.J. Comportamento espectral da vegetação In: Meneses, P.R.; Madeira Netto, J.S. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. cap.5, p.157-199.

Primavesi, A. **Manejo ecológico de pastagens**. São Paulo: Nobel, 1984. 184p.

Rambo, B. **A fisionomia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Livraria Selbach, 1956. 438p.

Reeves, M.C.; Winslow, J.C.; Running, S.W. Mapping weekly rangeland vegetation productivity using MODIS algorithms. **Journal of Range Management**, v.54, n.2, p.A90-A105, 2001.

Reynolds, H.L.; D'Antonio, C. The ecological significance of plasticity in root weight ratio in response to nitrogen: Opinion. **Plant and Soil**, v.185, n.1, p.75-97, 1996.

Richards, J.A.; Jia, X. **Remote sensing digital image analysis**. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 365p.

Ripple, W.J. **Relationships between grass canopy characteristics and Landsat Thematic Mapper**. 1984. 109p. Thesis (Ph.D. Thesis) - Oregon State University, Oregon. 1984.

Rodrigues, L.R.A.; Rodrigues, T.J.D. Ecofisiologia de plantas forrageiras. In: Castro, P.R.C.; Ferreira, S.O.; Yamada, T. (ed.) **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Potafos, 1987. cap.12, p.203-230.

Rudorff, B. F. T.; Batista, G.T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v.33, n.3, p.183-192, 1990.

Russel, G.; Jarvis, P.G; Monteith, J.L. Absorption of radiation by canopies and stand growth. In: Russel, G.; Marshall, B.; Jarvis, P.G. **Plant canopies: their growth, form and function**. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. cap.2, p.21-39.

Salisbury, F.B.; Ross, C.W. **Plant physiology**. Belmont: Wadsworth Publishing Company, 1992. 682p.

Secretaria da Coordenação e Planejamento do Estado do Rio Grande do Sul (SCP). **Atlas Sócio Econômico do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <<http://www.scp.rs.gov.br/atlas>>. Acesso em fev.2004.

Sellers, P.J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. **International Journal of Remote Sensing**, v.6, n.8, p.1335-1372, 1985.

Setelich, E.A. **Potencial produtivo de uma pastagem natural do Rio Grande do Sul, submetida a distintas ofertas de forragem**. 1994. 169p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1994.

Shimabukuro, Y. E. and Smith, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.29, n.1, p.16-20, 1991.

Silveira, V. **Farmer integrated decision model: integration between beef cattle and rice production in Rio Grande do Sul, Brazil**. 1999. 224 p. Thesis (Ph.D. Thesis) - University of Edinburgh, Edinburgh. 1999.

Song, C.; Woodcock, C.E.; Sete, K.C.; Lenney, M.P.; Macomber, S.A. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? **Remote Sensing of Environment**, v.75, n.2, p.230-244, 2001.

Souza, G.S. **Introdução aos modelos de regressão linear e não linear**. Brasília: Embrapa, 1998. 505p.

Steinmetz, S.; Guerif, M.; Delecolle, R.; Baret, F. Spectral estimates of the absorbed photosynthetically active radiation and light-use efficiency of a winter wheat crop subjected to nitrogen and water deficiencies. **International Journal of Remote Sensing**, v.11, n.10, p.1797-1808, 1990.

Taiz, L.; Zeiger, E. **Plant Physiology**. Redwood: The Benjamin/Cummings Publishing Company, 1991. 565p.

Thomas, J.R.; Gausman, H.W. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops. **Agronomy Journal**, v.69, n.5, p.799-802, 1977.

Thornley, J.H.M. **Mathematical models in plant physiology**: a quantitative approach to problems in plant and crop physiology. London: Academic Press, 1976. 312p.

Thornley, J.H.M. **Grassland dynamics**: an ecosystem simulation model. Cambridge: CAB Internacional 1998. 241p.

Thornthwaite, C.W.; Mather, J.R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. **Publications in Climatology**, v.10, n.3, p.181-311, 1957

Tubelis, A.; Nascimento, F.J.L. **Meteorologia descritiva**: fundamentos e aplicações brasileiras. São Paulo: Nobel, 1984. 374p.

Tucker, C.J. **The remote estimation of a grassland canopy / its biomass, chlorophyll, leaf water, and underlying soil spectra**. 1973. 212p. Thesis (Master Degree) - Colorado State University, Fort Collins. 1973.

Tueller, P.T. Remote sensing of range production and utilization. **Journal of Range Management**, v.54, n.2, p.A77-A89, 2001.

Valentin, J.L. **Ecologia numérica**: uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2000. 117p.

Van Dijk, A.; Callis, S.L.; Decker, W.L. Comparison of vegetation indices derived from NOAA/AVHRR data for sahelian crop assessments. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.46, n.1, p. 3-49, 1989.

Veloso, H.P.; Rangel Filho, A.L.R.; Lima, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. 124p.

Vermote, E.F.; Tanré, D.; Deuzé, J.L.; Herman, M.; Morcrette, J.J Second simulation of de satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.35, n.3, p.675-686, 1997.

Vianello, R. L.; Alves, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1991. 448 p.

Walter, H. **Vegetação e zonas climáticas**. São Paulo: EPU, 1986. 325p.

Weiss, M.; Baret, F. Evaluation of canopy biophysical variable retrieval performances from the accumulation of large swath satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v.70, n.3, p.293-306, 1999.

Woolley, J.T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Plant Physiology**, v.47, n.3, p.656-662, 1971.

Yuan, D.; Elvidge, C.D. Comparison of relative radiometric normalization techniques. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.51, n.3, p.117-126, 1996.

APÊNDICE A

NOME E IDENTIFICAÇÃO (MI) DAS CARTAS TOPOGRÁFICAS DA DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO BRASILEIRO, NA ESCALA 1:50.000 UTILIZADAS PARA A GERAÇÃO DAS CARTAS-IMAGENS

Nome da Carta	MI
Lavras do Sul	2995-3
Arroio Carajá	2995-4
Torquato Severo	3007-2
Pirai	3007-3
Bajé	3007-4
Passo do Tigre	3008-1
Palmas	3008-2
Seival	3008-4
Tupi Silveira	3017-1
Pedras Altas	3017-2
Passo São Diogo	3017-3
Vila da Lata	3016-1
Colônia Nova	3016-2
Aceguá	3016-4

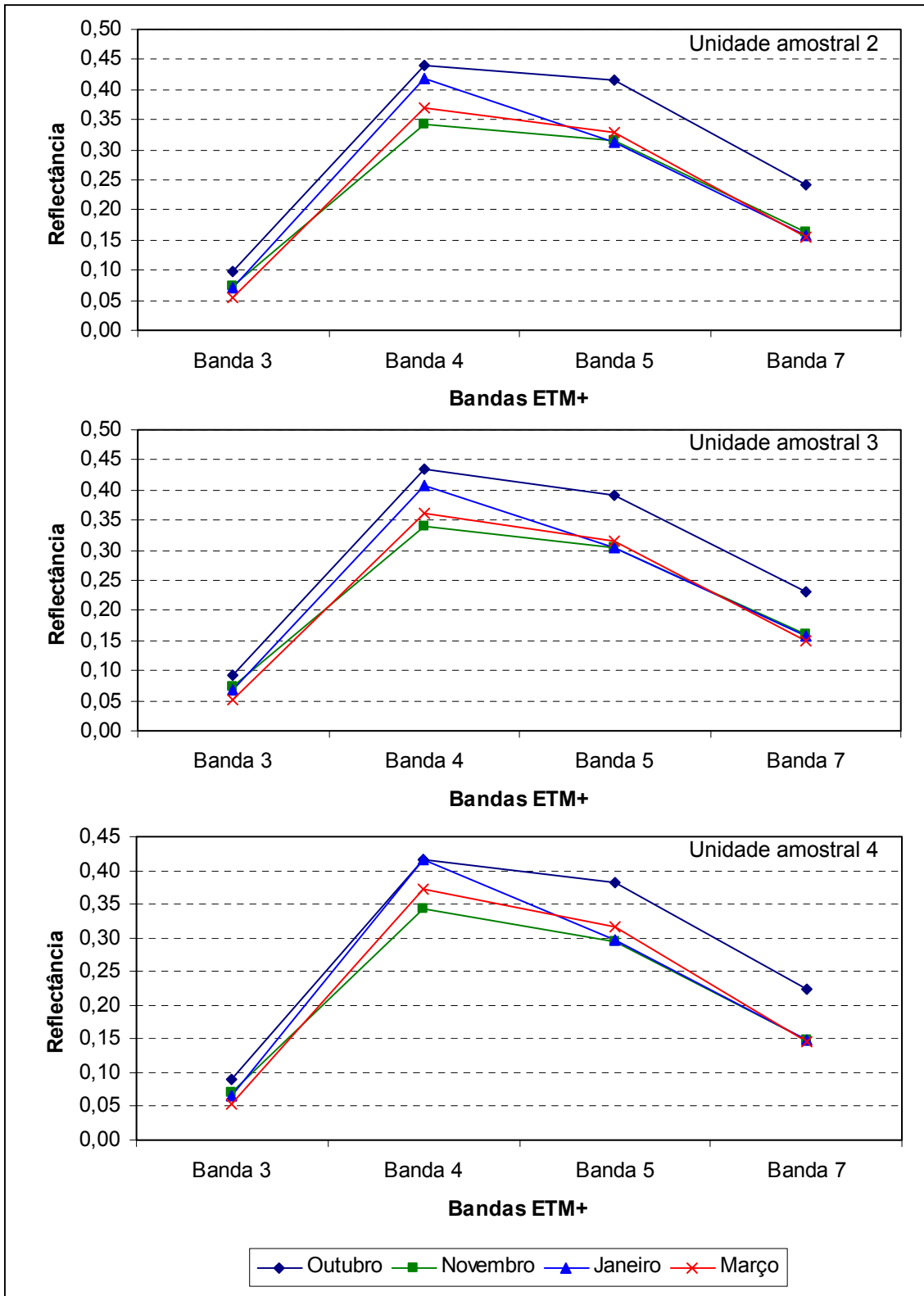
APÊNDICE B

PLANILHA PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMÁTICO DA ÁREA DE ESTUDO

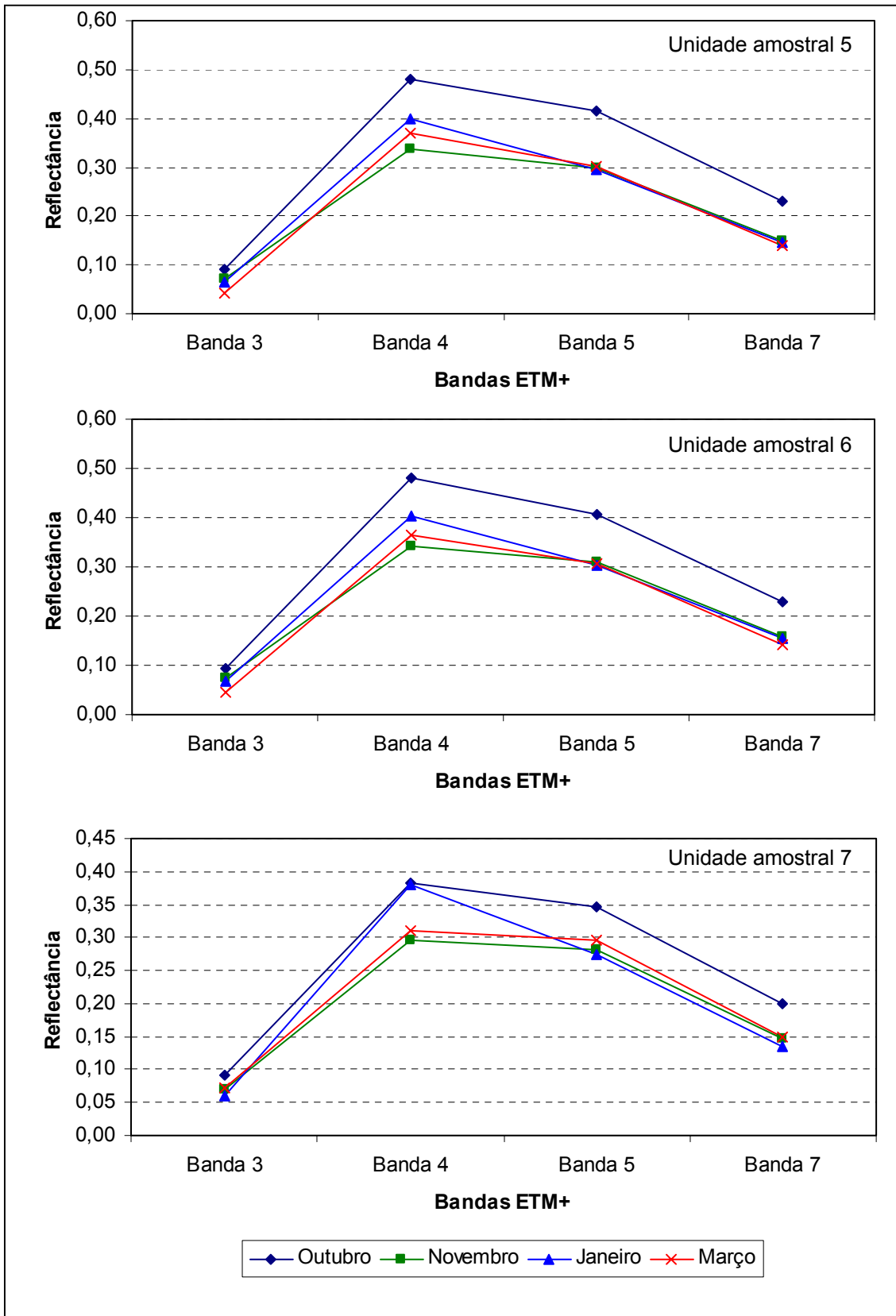
Período	P	ETP	P - ETP	NEG. ACUM.	ARM.	VAR. ARM.	ETR
P1	139,3	62,7	76,6	0	75		62,7
P2	94,2	71,1	23,1	0	75	0	71,1
P3	172,1	60,4	111,7	0	75	0	60,4
P4	39,1	80,0	-40,9	-40,9	43	-32	71,1
P5	71,7	104,9	-33,2	-74,1	27	-16	87,7
P6	256,8	82,6	174,2	0	75	48	82,6
P7	97	95,4	1,6	0	75	0	95,4
P8	98,3	104,3	-6,0	-6	69	-6	104,3
P9	34,9	135,0	-100,1	-106,1	17	-52	86,9
P10	35,5	128,6	-93,1	-199,2	5	-12	47,5
P11	88,4	97,8	-9,4	-208,6	4	-1	89,4
P12	206,4	76,2	130,2	0	75	71	76,2
P13	91,6	82,1	9,5	0	75	0	82,1
P14	52,2	71,4	-19,2	-19,2	57	-18	70,2
P15	167,3	56,9	110,4	0	75	18	56,9

APÊNDICE C

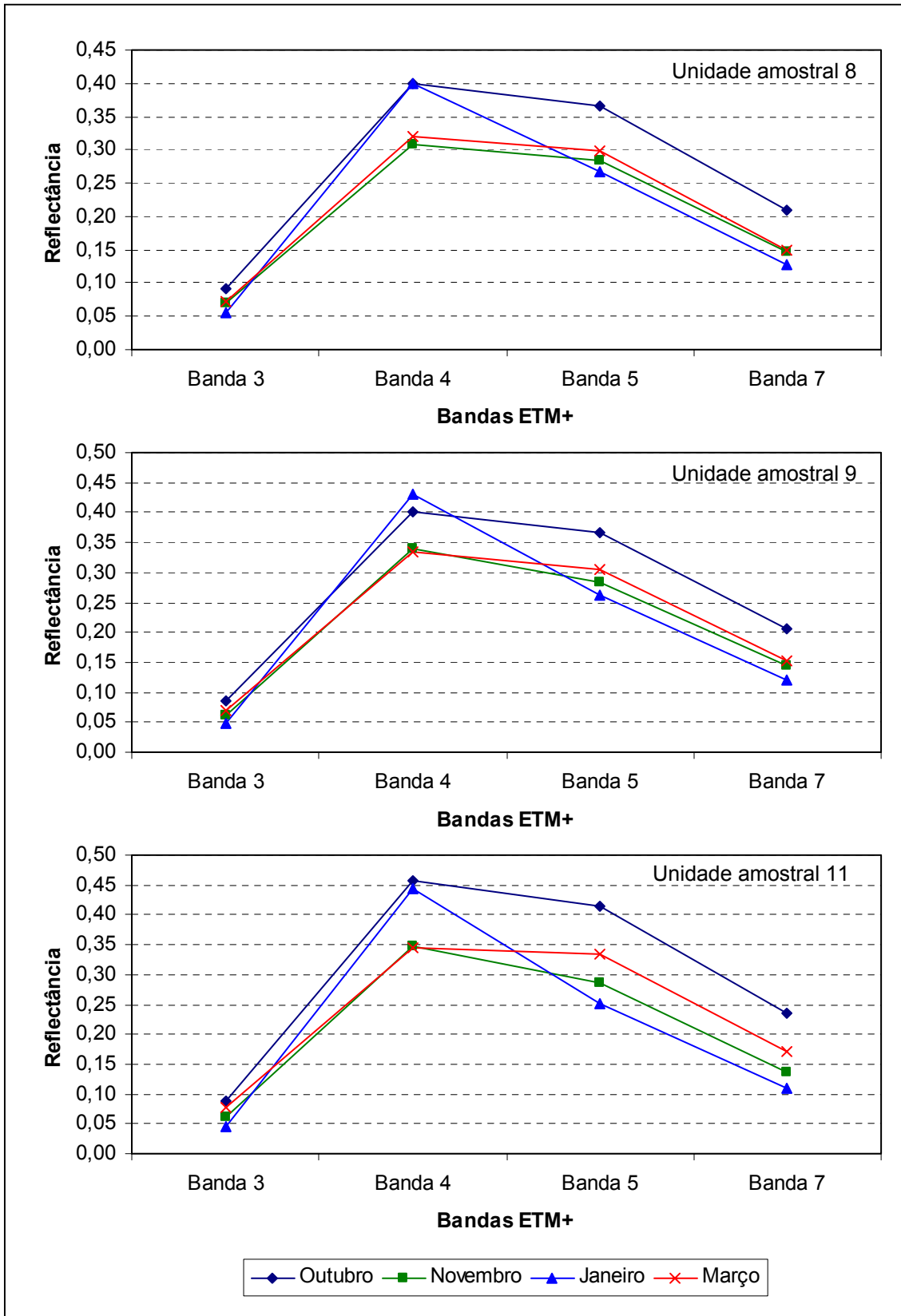
COMPORTAMENTO ESPECTRAL DAS UNIDADES AMOSTRAIS



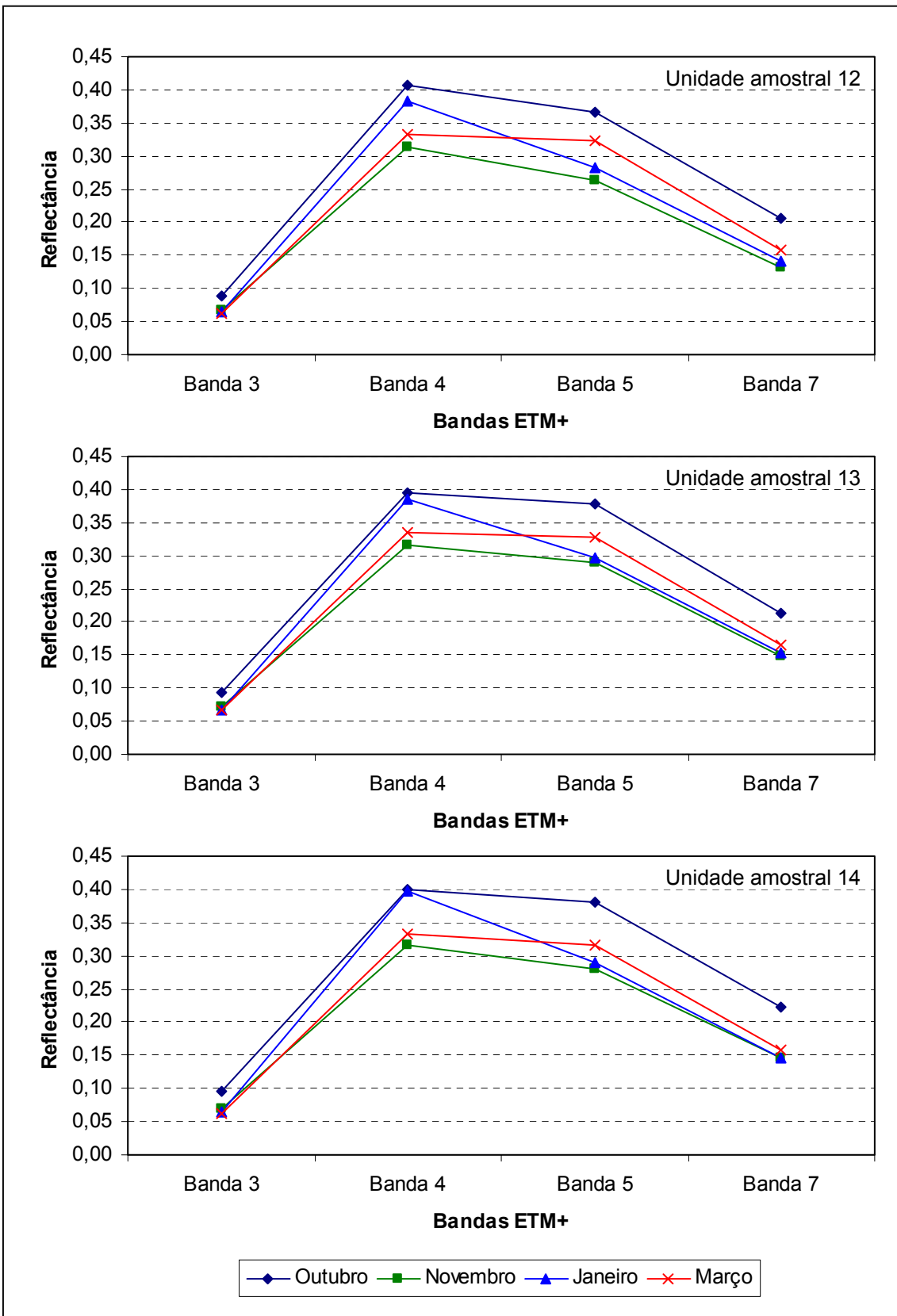
APÊNDICE C – Continuação (Continua)



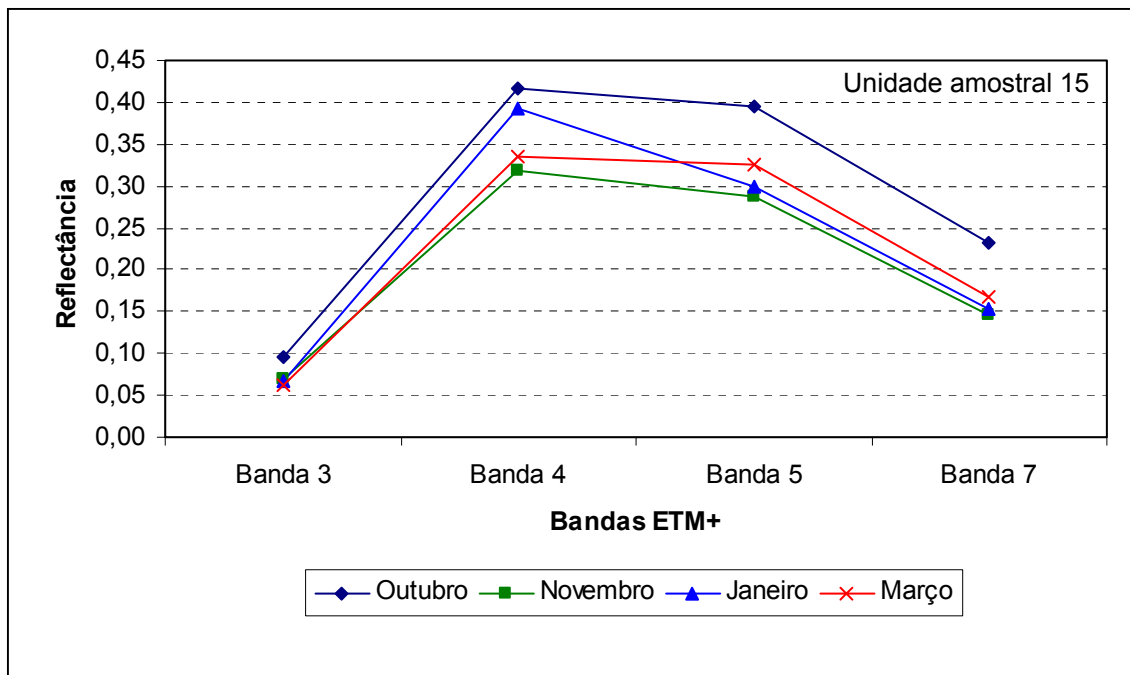
APÊNDICE C – Continuação (Continua)



APÊNDICE C - continuação (Continua)



APÊNDICE C – Conclusão.



APÊNDICE D

VALORES DA REFLECTÂNCIA (%) DAS BANDAS INDIVIDUAIS PARA OS MESES DE NOVEMBRO E JANEIRO

Repetição temporal	Repetição espacial	Bandas					
		Data	Amostra	B3	B4	B5	B7
nov	1			7,13	34,05	29,80	14,81
nov	2			7,34	34,33	31,39	16,35
nov	3			7,30	33,86	30,46	15,99
nov	4			7,08	34,18	29,51	14,78
nov	5			7,11	33,87	29,93	14,90
nov	6			7,47	34,15	31,01	15,78
nov	7			7,02	29,51	28,08	14,75
nov	8			6,93	30,77	28,35	14,59
nov	9			6,19	33,99	28,34	14,41
nov	11			6,27	34,77	28,52	13,66
nov	12			6,70	31,24	26,37	13,24
nov	13			7,11	31,65	29,08	14,90
nov	14			6,93	31,57	28,08	14,58
nov	15			7,06	31,82	28,74	14,62
jan	1			6,53	41,13	29,67	14,67
jan	2			7,11	41,84	31,27	15,86
jan	3			6,67	40,78	30,52	15,64
jan	4			6,67	41,55	29,74	14,74
jan	5			6,45	39,93	29,39	14,51
jan	6			6,86	40,21	30,28	15,34
jan	7			5,90	38,14	27,41	13,47
jan	8			5,54	40,05	26,83	12,84
jan	9			4,91	43,18	26,17	12,02
jan	11			4,66	44,34	25,03	11,02
jan	12			6,57	38,40	28,30	14,22
jan	13			6,78	38,66	29,75	15,24
jan	14			6,43	39,83	29,04	14,66
jan	15			6,78	39,33	30,03	15,24

APÊNDICE E

VALORES DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E DIFERENÇA NORMALIZADAS DAS BANDAS (VALORES ADIMENSIONAIS) PARA OS MESES DE NOVEMBRO E JANEIRO

Repetição temporal Data	Repetição espacial Amostra	NDVI	ND 45	ND 47	Variáveis espectrais					
					ND 53	ND 73	SAVI 0,5	SAVI 0,25	SAVI 0,75	SAVI 1
nov	1	0,65	0,07	0,39	0,61	0,35	0,44	0,51	0,41	0,38
nov	2	0,65	0,04	0,35	0,62	0,38	0,44	0,51	0,40	0,38
nov	3	0,65	0,05	0,36	0,61	0,37	0,44	0,50	0,40	0,38
nov	4	0,66	0,07	0,40	0,61	0,35	0,45	0,51	0,41	0,38
nov	5	0,65	0,06	0,39	0,62	0,35	0,44	0,51	0,40	0,38
nov	6	0,64	0,05	0,37	0,61	0,36	0,44	0,50	0,40	0,38
nov	7	0,62	0,02	0,33	0,60	0,35	0,39	0,46	0,35	0,33
nov	8	0,63	0,04	0,36	0,61	0,36	0,41	0,48	0,37	0,35
nov	9	0,69	0,09	0,40	0,64	0,40	0,46	0,53	0,42	0,40
nov	11	0,69	0,10	0,44	0,64	0,37	0,47	0,54	0,43	0,40
nov	12	0,65	0,08	0,40	0,59	0,33	0,42	0,49	0,38	0,36
nov	13	0,63	0,04	0,36	0,61	0,35	0,41	0,48	0,38	0,35
nov	14	0,64	0,06	0,37	0,60	0,36	0,42	0,49	0,38	0,36
nov	15	0,64	0,05	0,37	0,61	0,35	0,42	0,48	0,38	0,36
jan	1	0,73	0,16	0,47	0,64	0,38	0,53	0,60	0,49	0,47
jan	2	0,71	0,14	0,45	0,63	0,38	0,53	0,59	0,49	0,47
jan	3	0,72	0,14	0,45	0,64	0,40	0,53	0,59	0,49	0,46
jan	4	0,72	0,17	0,48	0,63	0,38	0,53	0,60	0,50	0,47
jan	5	0,72	0,15	0,47	0,64	0,38	0,52	0,59	0,48	0,46
jan	6	0,71	0,14	0,45	0,63	0,38	0,52	0,58	0,48	0,45
jan	7	0,73	0,16	0,48	0,65	0,39	0,51	0,58	0,47	0,45
jan	8	0,76	0,20	0,51	0,66	0,40	0,54	0,61	0,50	0,47
jan	9	0,80	0,25	0,56	0,68	0,42	0,59	0,65	0,54	0,52
jan	11	0,81	0,28	0,60	0,69	0,41	0,60	0,67	0,56	0,53
jan	12	0,71	0,15	0,46	0,62	0,37	0,50	0,57	0,46	0,44
jan	13	0,70	0,13	0,43	0,63	0,38	0,50	0,57	0,46	0,44
jan	14	0,72	0,16	0,46	0,64	0,39	0,52	0,59	0,48	0,46
jan	15	0,71	0,13	0,44	0,63	0,38	0,51	0,57	0,47	0,45

APÊNDICE F

VALORES VARIÁVEIS ORIUNDAS DA TRANSFORMAÇÃO TASSELED CAP (EM NÍVEL DE CINZA), PARA OS MESES DE NOVEMBRO E JANEIRO

Repetição temporal Data	Repetição espacial Amostra	Brigthness	Greenness	Wetness	Quarta	Quinta	Sexta
nov	1	100,29	131,12	34,41	5,65	98,59	95,65
nov	2	103,55	129,27	29,91	5,05	97,45	95,36
nov	3	101,72	129,06	31,83	4,61	98,11	95,33
nov	4	100,26	131,32	35,05	5,05	98,58	95,95
nov	5	100,38	130,50	34,06	5,63	98,44	95,44
nov	6	102,63	129,50	31,13	5,63	98,21	95,33
nov	7	90,55	123,90	36,70	4,90	98,65	96,60
nov	8	92,63	126,29	36,67	5,00	98,67	96,67
nov	9	97,23	133,35	37,00	3,87	98,26	96,32
nov	11	98,78	134,94	37,89	5,44	98,50	96,00
nov	12	91,33	128,67	42,08	4,42	99,33	96,75
nov	13	95,29	127,14	35,00	5,00	98,43	96,43
nov	14	94,56	127,22	37,61	4,39	98,28	96,00
nov	15	95,29	127,57	36,29	5,29	98,57	96,14
jan	1	113,76	143,00	36,88	3,06	97,71	94,82
jan	2	117,50	142,14	32,64	3,05	97,68	94,86
jan	3	114,67	141,00	34,06	2,56	97,00	94,56
jan	4	114,79	143,58	36,79	2,95	98,05	94,74
jan	5	111,06	141,19	37,25	3,31	97,44	95,06
jan	6	113,00	140,54	34,63	3,08	97,75	95,08
jan	7	104,40	140,75	41,30	2,80	98,30	95,35
jan	8	106,92	144,92	43,58	2,29	98,29	94,96
jan	9	110,45	152,45	46,00	1,74	98,71	95,45
jan	11	110,83	155,83	49,28	1,50	99,33	95,61
jan	12	107,00	139,33	39,17	2,92	98,17	96,08
jan	13	109,71	138,14	35,43	2,71	97,71	95,00
jan	14	110,72	140,94	37,72	2,39	97,67	95,06
jan	15	111,14	139,14	35,29	3,14	98,00	95,14

APÊNDICE G

VALORES VARIÁVEIS OBTIDAS A PARTIR DO MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL (EM PORCENTAGEM) PARA OS MESES DE NOVEMBRO E JANEIRO

Repetição temporal Data	Repetição espacial Amostra	Fração solo	Fração vegetação	Fração sombra
nov	1	38,24	43,35	16,94
nov	2	42,45	41,73	14,18
nov	3	41,00	41,50	16,06
nov	4	37,84	43,84	17,00
nov	5	38,69	42,81	17,06
nov	6	41,29	42,04	15,13
nov	7	38,45	34,25	25,85
nov	8	37,79	37,13	23,54
nov	9	35,29	44,68	18,58
nov	11	34,06	46,94	17,50
nov	12	33,17	40,00	25,50
nov	13	38,71	38,29	21,43
nov	14	37,28	38,72	22,61
nov	15	37,86	39,00	21,71
jan	1	24,59	64,06	9,71
jan	2	27,82	64,00	6,73
jan	3	27,22	62,28	9,11
jan	4	24,47	64,89	9,11
jan	5	24,81	61,69	11,75
jan	6	26,92	61,25	10,17
jan	7	21,90	59,65	16,85
jan	8	18,92	64,79	14,58
jan	9	14,55	72,94	11,00
jan	11	11,00	76,78	10,83
jan	12	24,08	59,00	15,08
jan	13	27,14	58,14	13,14
jan	14	24,67	61,56	12,17
jan	15	27,14	59,43	11,86