

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**VARIAÇÕES DA REFLECTÂNCIA E DOS ÍNDICES DE
VEGETAÇÃO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DA
MODELAGEM TOPOGRÁFICA NO PARQUE
ESTADUAL DO TURVO, RS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

William Gaida

**Santa Maria, RS, Brasil
2015**

VARIAÇÕES DA REFLECTÂNCIA E DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DA MODELAGEM TOPOGRÁFICA NO PARQUE ESTADUAL DO TURVO, RS

William Gaida

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Área de Concentração de Dinâmicas da Natureza e Qualidade Ambiental do Cone Sul, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Geografia**.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Marcelo Breunig

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Gaida, William

Variações da reflectância e dos índices de vegetação em função dos parâmetros da modelagem topográfica no Parque Estadual do Turvo, RS / William Gaida.-2015.

146 p.; 30cm

Orientador: Fabio Marcelo Breunig

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências, RS, 2015

1. Sensoriamento remoto 2. Estudos florestais 3. Geometria de aquisição de dados 4. Relevo I. Marcelo Breunig, Fabio II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Naturais e Exatas
Programa de Pós-Graduação em Geografia**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**VARIAÇÕES DA REFLECTÂNCIA E DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO
EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DA MODELAGEM TOPOGRÁFICA
NO PARQUE ESTADUAL DO TURVO, RS**

elaborada por
William Gaida

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Geografia

Comissão Examinadora:

Fabio Marcelo Breunig, Dr.
(Presidente/Orientador)

Waterloo Pereira Filho, Dr. (UFSM)

Lênio Soares Galvão, Dr. (INPE)

Santa Maria, 01 de abril de 2015

AGRADECIMENTOS

À *Universidade Federal de Santa Maria* pela possibilidade da realização do Mestrado em Geografia de qualidade e gratuito.

À *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior* (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado. À *Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo* (FAPESP) pelo apoio financeiro ao projeto “Uso combinado de imagens dos satélites MODIS/Terra e RapidEye no estudo da floresta subtropical do Parque Estadual do Turvo (RS)” (processo n° 2013/03908-3). À *Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul* (FAPERGS) pelo apoio financeiro no projeto “Influência dos efeitos direcionais sobre produtos de sensoriamento remoto em florestas decíduais subtropicais” (processo n° 2012/0383-5).

À minha namorada *Vanelise*, minha mãe *Ieda* e meu tio *Érico* pela força e apoio.

Ao Professor Dr. *Fábio Marcelo Breunig* por seus ensinamentos, orientação e incentivo.

Ao Professor Dr. *Waterloo Pereira Filho*, Professor Dr. *Lênio Soares Galvão* e ao Professor Dr. *Romário Trentin* pela leitura e contribuições a este trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Geotecnologias: *Felipe*, *Gustavo* e *Joceli*, pela amizade e conhecimentos compartilhados nas atividades diárias de laboratório, trabalhos e projetos.

Aos meus amigos *Gustavo* e *Taiany* pela amizade e apoio.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Geografia
Universidade Federal de Santa Maria

VARIAÇÕES DA REFLECTÂNCIA E DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DA MODELAGEM TOPOGRÁFICA NO PARQUE ESTADUAL DO TURVO, RS

AUTOR: WILLIAM GAIDA

ORIENTADOR: FÁBIO MARCELO BREUNIG

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 01 de abril de 2015.

O processo de ocupação do espaço e a expansão agrícola ocorrida no Rio Grande do Sul contribuíram para a redução da cobertura florestal, a exemplo da floresta subtropical decídua. Esta floresta inicialmente presente na maior parte do noroeste do Estado, hoje restringe-se aos limites do Parque Estadual do Turvo (PET) e da Terra Indígena de Guarita. Localizado no município de Derrubadas, o PET é a maior área preservada de floresta subtropical decídua do Estado constituindo-se como uma área de grande importância ambiental e para a realização de estudos florestais com uso de técnicas de sensoriamento remoto como os índices de vegetação. Estes índices podem sofrer influências de componentes externos que alteram as respostas espectrais dos alvos imageados. Dentre os componentes que podem acarretar este tipo de problema, o relevo pode influenciar as condições de iluminação. Neste sentido, o objetivo do trabalho foi avaliar a magnitude das variações da reflectância bidirecional e dos índices de vegetação em função das variações topográficas locais, com uso de dados de alta resolução espacial do sensor Rapideye. A metodologia aplicada incluiu a aquisição de duas séries temporais dos índices de vegetação do produto MOD13Q1 do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), um modelo digital de elevação do *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – Global Digital Elevation Map version 2* (ASTER GDEM v2) e duas cenas dos sensores Rapideye. As séries temporais MODIS permitiram identificar as datas mais adequadas para a aquisição das cenas RapidEye, sendo escolhidas as datas de 28 de junho e 17 de outubro. Na etapa seguinte foi realizada a modelagem topográfica da área do PET, sendo obtidos dados sobre a declividade, orientação e altimetria. As variáveis topográficas e os parâmetros de iluminação das cenas Rapideye permitiram o cálculo do relevo sombreado (fator de iluminação). Por meio das classes de cada variável topográfica e do relevo sombreado foram amostrados os valores dos dados contidos em cada banda das cenas RapidEye e nos índices de vegetação. A partir das imagens Rapideye foram calculados quatro índices de vegetação como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Enhanced Vegetation Index* (EVI), *Red Edge Normalized Difference Vegetation Index* (RENDVI) e o *Red-edge Chlorophyll Index* (CI_{Red-Edge}). Os valores médios amostrados aleatoriamente foram analisados por meio de gráficos, análises estatísticas e relações com os dados obtidos no inventário florestal realizado em sete parcelas (20x100 m). Os resultados do inventário de campo permitiram identificar 62 espécies dominantes distribuídas nos três estratos arbóreos bem como a presença de descontínuidades e estratificações. A avaliação temporal da dinâmica da floresta do PET mostrou que os índices de vegetação do produto MOD13 apresentam os valores mais elevados no verão e mais baixos no inverno, de acordo com a deciduidade da floresta. Os resultados obtidos mostraram que além das variações fenológicas sazonais da floresta subtropical decídua, as condições de iluminação locais associadas ao relevo do PET contribuem para as variações no comportamento espectral dos alvos presentes. Devido às características apresentadas pelo relevo do PET, as variáveis topográficas que melhor descreveram as variações de iluminação presentes nas duas datas foram a orientação de vertentes e a declividade. Tanto os dados de reflectância, quanto os índices de vegetação foram condicionados pelas condições de iluminação nas duas datas, em especial na data de junho (maior quantidade de sombra e maior ângulo zenital solar). As bandas que apresentaram maior dependência da declividade, orientação de vertentes e do relevo sombreado foram as do vermelho e infravermelho próximo. O aumento da altitude provocou uma alteração positiva da reflectância das bandas do infravermelho próximo e da borda vermelha e uma diminuição da reflectância das bandas do visível. Os índices de vegetação que possuem fatores de normalização, como o NDVI e o RENDVI apresentaram-se menos sensíveis às condições topográficas, enquanto que os índices EVI e CI_{Red-edge} apresentaram maior sensibilidade às condições de iluminação e sombreado.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. Estudos florestais. Geometria de aquisição de dados. Relevo.

ABSTRACT

Master Degree Dissertation
Graduation Program in Geography
Federal University of Santa Maria

VARIATIONS OF REFLECTANCE AND VEGETATION INDICES AS A FUNCTION OF THE TOPOGRAPHIC MODELLING PARAMETERS IN THE PARQUE ESTADUAL DO TURVO, RS

AUTHOR: WILLIAM GAIDA

ADVISOR: FÁBIO MARCELO BREUNIG

Date and place of presentation: April 1st of 2015, Santa Maria

The process of land occupation and the agricultural expansion in the *Rio Grande do Sul* State contributed to the reduction of native forest cover as the deciduous subtropical forest. Initially this forest covered most of the northwest of the State and today it is restricted to the *Parque Estadual do Turvo* (PET) and the *Terra Indígena de Guarita*. Located in the Derrubadas municipality, the PET is the largest preserved area of deciduous subtropical forest of the State, with great environmental importance and an area for conduction of forest studies based on the use of remote sensing techniques as the vegetation indices. These indices are affected by external components that change the spectral responses of the imaged targets. Among the components that can cause this problem type, the relief can influence on the view-illumination conditions. In this sense, the objective of this study was evaluating the magnitude of the bidirectional reflectance variations and of the vegetation indices as a function of local topographical variations, with the use of high spatial resolution data of the Rapideye sensor. The applied methodology included the acquisition of MOD13Q1 product of the Moderate-resolution Imaging Espectroradiometer (MODIS) sensor, a digital elevation model of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - Global Digital Elevation Map version 2 (ASTER GDEM v2) and two scenes of Rapideye sensors. The MODIS time series allowed a temporal evaluation of forest dynamics and allowed to identify the more appropriate dates for the acquisition of Rapideye scenes. Rapideye data were acquired at June 28, 2012 and October 17, 2012. The next step was to perform the topographic modeling in order to extract the slope, aspect and altimetry. Based on the topographic variables and the Rapideye metadata the shaded relief was calculated for both scenes. By slicing topographic variables, the Rapideye per band reflectance and vegetation indices were evaluated for each class. Based on the Rapideye data, four vegetation indices were calculated: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RENDVI) and the Red-edge Chlorophyll Index (CI_{Red-Edge}). Randomly samples were averaged and analyzed through graphs, descriptive statistics and its relationship with forest survey in seven plots (20x100 m) was performed. The results of field inventory have identified 62 dominant species distributed in three strata and showed the presence of discontinuities within the forest. The vegetation indices have presented the highest values in summer and lower in winter, in agreement to the deciduous behavior of the emergent strata of the forest. The obtained results showed that beyond the seasonal phenological variations, the local illumination conditions associated to PET relief, contribute to explain the spectral response of the forest. The most important topographic variables that affect the spectral response of Rapideye band were the aspect and slope. Despite both the reflectance data and the vegetation indices were conditioned by the illumination conditions in the two dates, the June image was most affected (more shaded relief due to highest solar zenith angle). The bands that showed higher dependence on slope, aspect and illumination were the red and near infrared. The increased of the altimetry caused a positive alteration in reflectance of the near infrared and the red edge bands and a decrease in reflectance of the visible bands. Vegetation indices that have normalization factors, such as the NDVI and the RENDVI presented lower dependence on the topographical conditions, while the indices as EVI and CI_{Red-edge} showed higher sensitivity to illumination conditions and shading.

Keywords: Remote sensing. Forestry studies. Data acquisition geometry. Relief.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reflectância da vegetação na região do visível do espectro eletromagnético.	26
Figura 2 – Espectro de reflectância da vegetação na região do infravermelho próximo do espectro eletromagnético.	27
Figura 3 – Espectro de reflectância da vegetação na região do infravermelho médio do espectro eletromagnético.	28
Figura 4 – Região da borda do vermelho do espectro eletromagnético a partir de um espectro de vegetação.	42
Figura 5 – Mapa de localização do Parque Estadual do Turvo.	52
Figura 6 – Gráfico representativo das médias mensais de temperatura para o período de 2000 a 2012 para a área de estudo.	54
Figura 7 – Gráfico de acumulação mensal de chuvas para o período de 2000 a 2012 para a área de estudo.	55
Figura 8 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos do desenvolvimento do estudo.	58
Figura 9 – Mapa de localização das parcelas utilizadas no levantamento florestal do Parque Estadual do Turvo.	59
Figura 10 – Croqui demonstrativo de uma parcela de inventário florestal do trabalho de campo.	59
Figura 11 – Médias mensais acumuladas para as séries temporais dos índices NDVI (a) e EVI/MODIS (b) de 2000 a 2012.	69
Figura 12 – Efeito das variações de geometria de iluminação para a área de estudo destacadas pelas cenas Rapideye do dia 28 de junho de 2012 (a) e 17 de outubro de 2012 (b), em composição colorida falsa-cor, com as bandas 3 (630-685 nm), 4 (690-730 nm) e 5 (760-850 nm), sendo representadas respectivamente em vermelho, azul e verde.	73
Figura 13 – Mapa de declividade do Parque Estadual do Turvo, elaborado a partir do modelo digital de elevação ASTER GDEM 2.	75
Figura 14 – Mapa de orientação de vertentes do Parque Estadual do Turvo, elaborado a partir do modelo digital de elevação ASTER GDEM 2.	77
Figura 15 – Mapa altimétrico do Parque Estadual do Turvo, elaborado a partir do modelo digital de elevação ASTER GDEM 2.	79
Figura 16 – Mapa do fator topográfico de iluminação do Parque Estadual do Turvo elaborado para a data de 28 de junho de 2012.	81
Figura 17 – Mapa do fator topográfico de iluminação do Parque Estadual do Turvo, elaborado para a data de 17 de outubro de 2012.	82
Figura 18 – Espectros de reflectância das datas de 28 de junho de 2012 (a) e 17 de outubro de 2012 (b) das imagens RapidEye para as áreas iluminadas e sombreadas.	84
Figura 19 – Espacialização das variações da reflectância das bandas RapidEye para a floresta do PET em função das variações da geometria de iluminação solar para as datas de 28 de junho e 17 de outubro de 2012.	86

Figura 20 – Espacialização das variações dos índices de vegetação calculados para o PET em função da geometria de iluminação para as datas de 28 de junho e 17 de outubro de 2012....	90
Figura 21 – Variações da reflectância das bandas da cena RapidEye de 28 de junho de 2012 em função das variáveis topográficas de orientação de vertentes (a), declividade (b), altimetria (c) e relevo sombreado (d).....	94
Figura 22 – Variações das reflectâncias normalizadas em função das classes de menor reflectância, sendo a classe sul para a orientação de vertentes (a), a classe de 0° a 2° para a declividade (b), a classe de 120 a 160 metros para altimetria (c) e a classe de padrão de iluminação intermediário para o relevo sombreado (d) na data de 28 de junho de 2012.....	96
Figura 23 – Variações da reflectância das bandas da cena RapidEye de 17 de outubro de 2012 em função das variáveis topográficas de orientação de vertentes (a), declividade (b), altimetria (c) e relevo sombreado (d).	102
Figura 24 – Variações das reflectâncias normalizadas em função das classes de menor reflectância, sendo a classe sul para a orientação de vertentes (a), a classe de 0° a 2° para a declividade (b), a classe de 120 a 160 metros para altimetria (c) e a classe de padrão de iluminação intermediário para o relevo sombreado (d) na data de 17 de outubro de 2012... ..	104
Figura 25 – Gráficos de dispersão entre reflectância e relevo sombreado para as bandas do vermelho (a) e infravermelho próximo (b) para a data de junho e vermelho (c) e infravermelho próximo (d) para a data de outubro.	109
Figura 26 – Gráficos das variações do índice de vegetação NDVI em função das variáveis topográficas de orientação de vertentes (a), declividade (b), altimetria (c) e relevo sombreado (d) para as duas datas das cenas RapidEye.	110
Figura 27 – Gráficos das variações do índice de vegetação EVI em função das variáveis topográficas de orientação de vertentes (a), declividade (b), altimetria (c) e relevo sombreado (d) para as duas datas das cenas RapidEye.	114
Figura 28 – Gráficos das variações do índice de vegetação CIred-edge em função das variáveis topográficas de orientação de vertentes (a), declividade (b), altimetria (c) e relevo sombreado (d) para as duas datas das cenas RapidEye.....	117
Figura 29 – Gráficos das variações do índice de vegetação RENDVI em função das variáveis topográficas de orientação de vertentes (a), declividade (b), altimetria (c) e fator topográfico de iluminação (d) para as duas datas das cenas RapidEye.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados da cobertura das classes de declividade na área de estudo.....	76
Tabela 2 – Dados da cobertura das classes altimétrica na área de estudo.....	80
Tabela 3 – Dados da cobertura das classes de iluminação em função das datas das cenas RapidEye utilizadas na área de estudo.	83
Tabela 4 – Valores de reflectância médios das bandas RapidEye amostrados em função do fator topográfico de iluminação para a data de 28 de junho de 2012.....	100
Tabela 6 – Valores de reflectância médios das bandas RapidEye amostrados em função do fator topográfico de iluminação para a data de 17 de outubro de 2012.....	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características das bandas do sensor MODIS.	31
Quadro 2 – Características topográficas apresentadas pelas parcelas utilizadas no levantamento florestal do Parque Estadual do Turvo.	67
Quadro 3 – Dados da cobertura das classes de orientação de vertentes na área de estudo.	78

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI).....	37
Equação 2 – Índice de vegetação realçado (EVI).....	40
Equação 3 – Índice de vegetação por diferença normalizada da borda do vermelho (RENDVI).42	
Equação 4 – Índice de clorofila da borda do vermelho (CIRed-Edge)	43
Equação 5 – Relevo sombreado (cosseno do ângulo de incidência)	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APAR	<i>Absorbed Photosynthetically Active Radiation</i>
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
AVHRR	<i>Advanced High Resolution Radiometer</i>
AZS	Ângulo Zenital Solar
BRDF	Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional
CIRed-Edge	<i>Red-edge Chlorophyll Index</i>
CV	Coeficiente de variação
DAF	Distribuição angular de folhas
EOS	<i>Earth Observing System</i>
ERSDAC	<i>Earth Resources Data Analysis Center</i>
EUMeTRAIN	<i>European Meteorological International Training Project</i>
EVI	Enhanced Vegetation Index
FAPAR	<i>Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation</i>
FI	Fator topográfico de iluminação
GDEM	<i>Global Digital Elevation Map</i>
IAF	Índice de área foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LPDAAC	<i>Land Process Distributed Active Archive Center</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
METI	<i>Minister of Economy Trade and Industry</i>
MIR	<i>Middle Infrared Region</i>
MLME	Modelo Linear de Mistura Espectral
Mm	Milímetros
MODIS	<i>Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MODLAND	<i>Moderation-resolution Spectro Radiometer Land products</i>
MRT	<i>MODIS Reprojection Tools</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NIR	<i>Near Infrared Region</i>
Nm	Nanômetros
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>

NPP	<i>Net Primary Productivity</i>
PET	Parque Estadual do Turvo
REM	Radiação eletromagnética
RENDVI	<i>Red Edge Normalized Difference Vegetation Index</i>
SEMA/RS	Secretaria Estadual do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TIG	Terras Indígenas do Guarita
TIN	Terras Indígenas de Nonoai
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	21
2.1 Objetivo geral	21
2.2 Objetivos específicos	21
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
3.1 Fundamentos de sensoriamento remoto	22
3.2 Sensoriamento remoto aplicado ao estudo de ambientes florestais	23
3.3 A vegetação e sua interação com o espectro eletromagnético	25
3.4 O dossel vegetativo e sua interação com a radiação eletromagnética	28
3.5 A relação entre o dossel vegetativo e as imagens orbitais	29
3.6 O sensor MODIS e seus produtos destinados ao estudo da vegetação	29
3.6.1 O sensor MODIS e suas aplicações no estudo de áreas florestadas	32
3.7 Imagens Rapideye	33
3.8 Os índices de vegetação	35
3.8.1 O índice NDVI	37
3.8.1.1 O comportamento do NDVI em função das estações do ano	39
3.8.2 O índice EVI	40
3.8.3 Índices de vegetação com uso da borda vermelha do espectro eletromagnético	41
3.9 Os índices de vegetação e a interferência dos componentes físicos do relevo	43
3.10 O ângulo de iluminação solar e sua influência em dados de índice de vegetação	45
3.11 Modelos digitais de elevação	46
3.11.1 Modelo digital de elevação ASTER GDEM	47
3.12 Modelagem topográfica	49
3.13 Relevo sombreado	51
4 ÁREA DE ESTUDO	52
4.1 Caracterização física da área de estudo	53
4.2 Caracterização florística, fauna e flora	55
4.3 Importância do Parque Estadual do Turvo	56
5 METODOLOGIA	58
5.1 Caracterização estrutural e florística da área de estudo	58
5.2 Aquisição e pré-processamento dos dados de sensoriamento remoto	60
5.2.1 Dados do sensor MODIS	60

5.2.2 Dados da constelação RapidEye.....	61
5.2.3 Modelo digital de elevação ASTER GDEM 2	62
5.3 Variações sazonais dos índices de vegetação do sensor MODIS	62
5.4 Modelagem topográfica	63
5.5 Variações da reflectância e dos índices de vegetação do sensor RapidEye	65
5.6 Análise integrada dos resultados	65
6 RESULTADOS.....	66
6.1 Análise dos dados do inventário florestal	66
6.2 Análise dos dados de sensoriamento remoto	68
6.2.1 Dados do sensor MODIS	68
6.2.2 Dados dos sensores RapidEye	71
6.3 Análise das variáveis topográficas do Parque Estadual do Turvo	74
6.3.1 Declividade	74
6.3.2 Orientação de vertentes	76
6.3.3 Altimetria.....	78
6.3.4 Relevo sombreado	80
6.4 Análise da distribuição espacial dos dados de sensoriamento remoto sobre a área do Parque Estadual do Turvo	84
6.4.1 Distribuição espacial da reflectância das cenas RapidEye no Parque Estadual do Turvo	85
6.4.2 Distribuição espacial dos índices de vegetação na área de estudo	89
6.5 Análise dos dados de sensoriamento remoto em função dos parâmetros da modelagem topográfica.....	93
6.5.1 Dados de reflectância Rapideye em função dos parametros da modelagem topográfica	93
6.5.2 Análise de dispersão entre reflectância e relevo sombreado.....	107
6.5.3 Dados dos índices de vegetação em função dos parametros da modelagem topográfica....	109
6.6 Análise integrada dos dados de sensoriamento remoto em função dos dados da modelagem topográfica e inventário florestal.....	122
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	125
REFERÊNCIAS	127

1 INTRODUÇÃO

A colonização e posterior expansão agrícola no Rio Grande do Sul ocasionaram um contínuo processo de supressão da vegetação nativa. A derrubada de árvores inicialmente foi motivada pelo extrativismo da madeira para o estabelecimento de colônias agrícolas (ALBUQUERQUE, 1977). Em meados da década de 1950 a remoção da vegetação nativa foi intensificada, principalmente na metade norte do estado, para o estabelecimento dos cultivos comerciais impulsionados pela “frente de expansão da soja”. Em decorrência deste processo a floresta subtropical decídua foi um dos exemplares florestais mais atingidos pelos impactos do desmatamento (CONCEIÇÃO, 1986). Originalmente a floresta subtropical decídua cobria a maior parte da região do Alto Uruguai. Atualmente, este exemplar foi reduzido a pequenos fragmentos, distribuídos de forma esparsa, entre as áreas agrícolas ou em áreas de proteção como Parque Estadual do Turvo (PET) e as Terras Indígenas do Guarita (TIG) e de Nonoai (TIN) (SEMA/RS, 2005; SIGNORI *et al.*, 2012).

De acordo com Klein (1972) a floresta subtropical decídua ou floresta do Alto Uruguai caracteriza-se por apresentar uma grande variedade de espécies em sua maioria decíduais e semidecíduais. Outra característica visível sobre a floresta do Alto Uruguai é sua baixa quantidade de espécies arbóreas altas, que não chegam a formar uma cobertura contínua. No entanto, a porção mais densa do extrato arbóreo (abaixo das espécies dominantes) é constituída por espécies perenifólias que atingem alturas entre 15 e 25 metros em média (VACCARO; LONGHI, 1995).

O PET apresenta uma área de 17.491,4 hectares constituindo-se como o maior fragmento preservado de floresta subtropical decídua da região Sul do Brasil, sendo uma extensão da *Floresta de Misiones* da Argentina (BRACK *et al.*, 1985; GUADAGNIN, 1994; BULFE, 2008). Localizado no município gaúcho de Derrubadas, este parque foi à primeira unidade de conservação integral do estado do Rio Grande do Sul, criado pelo Decreto Estadual nº 2.312, de 11 de março de 1947 (SEMA/RS, 2005). De acordo com IBGE (1986) a unidade abriga 56% do total da área de floresta subtropical decídua ainda existente no estado. Apesar de sua importância para a biodiversidade, poucos estudos têm sido conduzidos para compreender a dinâmica da floresta nas últimas décadas. Nesse contexto, técnicas de sensoriamento remoto aliadas a Sistemas de Informações Geográficas (SIG) podem contribuir significativamente.

Na perspectiva de estudo de uma grande área de floresta (como por exemplo, o PET), o uso do sensoriamento remoto permite análises temporais e espaciais das feições da superfície

terrestre e o estudo da dinâmica das áreas florestais (CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2006). Além disso, o sensoriamento remoto disponibiliza dados que podem ser amplamente aplicados para os estudos fenológicos, o monitoramento de ocorrências de desmatamento, previsão de safras agrícolas (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; 2010), bem como o monitoramento de atributos biofísicos e bioquímicos da vegetação (ASNER, 1998). A possibilidade de trabalhar com séries temporais de dados de sensoriamento remoto para o estudo da vegetação, é fundamental para o entendimento de mudanças sazonais de florestas, uma vez que a floresta subtropical decídua apresenta variações sazonais em decorrência das estações do ano.

Entre os sensores que permitem o monitoramento em escala temporal adequado, destaca-se o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo da plataforma Terra. Esse sensor permite análises regulares da vegetação em nível global, regional e local, incluindo a avaliação de aspectos fenológicos da vegetação e a detecção de mudanças de uso e cobertura do solo (RISSO *et al.*, 2009). Além disto, o sensor MODIS possui diversos produtos voltados para diferentes tipos de análises dos processos globais, com ênfase no estudo do comportamento da vegetação. No aspecto de estudos florestais destaca-se o produto MOD13 (*Gridded Vegetation Indices* (NDVI & EVI)), o qual possui dois índices de vegetação, sendo estes o EVI (*Enhanced Vegetation Index* ou Índice de Vegetação Realçado) e o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* ou Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada), disponibilizados sobre a forma de composições de dezesseis dias, estes índices permitem o monitoramento da atividade fotossintética da vegetação, como também o acompanhamento do estágio fenológico, a detecção de mudanças, entre outros fatores permitindo a aquisição de dados consistentes sobre as condições da vegetação a nível global (HUETE *et al.*, 1999).

A alta resolução temporal do MODIS é um aspecto determinante em estudos fenológicos e pode ser utilizada para obter conhecimento aprofundado a respeito dos ciclos sazonais da vegetação (LIESENBERG *et al.*, 2007). Contudo, devido às limitações associadas a resolução espacial, esse sensor não captura as variações espectrais derivadas da influência das características geomorfológicas. Esse fato demanda imagens com melhor resolução espacial, a exemplo das imagens geradas pela constelação de satélites RapidEye (TYC *et al.*, 2005; KRAMER, 2012; RAPIDEYE A. G., 2012), que estão sendo utilizadas no Inventário Florestal Nacional.

No sentido da busca de dados com melhor detalhamento para áreas florestais e que permitam identificar determinadas influências que a características geomorfológicas da superfície terrestre podem exercer sobre os parâmetros espectrais, exige-se a utilização de imagens com média a alta resolução espacial. Neste aspecto as imagens obtidas por meio da constelação de satélites RapidEye são de grande importância por permitirem uma análise com

maior detalhamento das feições devido a sua resolução espacial nominal de 5 metros para as suas cinco bandas (azul, verde, vermelho, infravermelho próximo e borda vermelha (RAPIDEYE A. G., 2012). Outra característica destes satélites é a disponibilização de um grande número de imagens de um mesmo local devido à característica da constelação ser composta por cinco satélites idênticos e em mesma órbita, capazes de coletar imagens sobre grandes áreas, com alta capacidade de revisita e boa acurácia geométrica e radiométrica das imagens (FELIX *et al.*, 2009). Outro aspecto importante das imagens RapidEye para estudos florestais diz respeito às faixas espectrais cobertas, que, além das bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, estes sensores possuem a banda *Red-edge* (borda do vermelho) localizada na região do espectro eletromagnético entre 690 a 730 nm. Nesta região ocorre uma mudança abrupta na reflectância, em consequência da concentração da clorofila, o que permite a realização estudos sobre a vegetação com o uso destes sensores (FELIX *et al.*, 2009).

As feições espectrais da vegetação são originadas principalmente pelas diferentes concentrações de pigmentos fotossintéticos presentes na folha, pela estrutura interna das folhas e pela concentração de água (MARCUSSE *et al.*, 2010). Calculados a partir da reflectância de superfície, os índices de vegetação são amplamente utilizados para o monitoramento e estimativas biofísicas da vegetação, devido a sua facilidade de cálculo, redução dos efeitos externos e por ressaltarem algumas feições espectrais específicas. A vegetação caracteriza-se como um dos alvos mais complexos devido às variações das suas propriedades físico-químico-biológicas, a presença de múltiplos componentes refletores, a não uniformidade de estruturas, as características do substrato (EPIPHANIO *et al.*, 1996) e efeitos externos como a mistura espectral, geometria e iluminação e observação e as características topográficas da região.

Apesar do grande número de índices existentes, o NDVI (ROUSE *et al.*, 1973) e o EVI (HUETE *et al.*, 2002) são, em geral, os índices de vegetação mais utilizados para estudos temporais de ambientes florestais a partir de dados orbitais. O sensor MODIS/Terra permite o cálculo do NDVI e EVI com uma resolução espacial de até 250 metros, com um tempo de revisita quase diário, enquanto o sensor RapidEye permite o cálculo de ambos os índices, contudo, com uma resolução espacial de cinco metros. Quando modelos de transferência radiativa não podem ser utilizados para a elaboração de estimativas de Índice de Área Foliar (IAF) e a Produtividade Primária Bruta (*Net Primary Productivity* - NPP), são utilizados modelos empíricos que permitem estimar o IAF com base em índices de vegetação (TUCKER, 1979; JUSTICE *et al.*, 1985; TUCKER; SELLERS, 1986; GOWARD *et al.*, 1991). O IAF e o NPP são fundamentais para a quantificação e monitoramento e a determinação da taxa de fixação anual dos estoques de

carbono. Assim, compreender a dependência dos índices de vegetação das características geomorfológicas é importante para evitar interpretações errôneas.

Embora os índices de vegetação em sua maioria sejam normalizações que visam eliminar ou minimizar os efeitos externos, em áreas como a do PET que apresentam relevo modelado por dissecação fluvial (IBGE, 2009), os índices de vegetação podem sofrer influências de componentes topográficos. Estes componentes influenciam e alteram as respostas espectrais dos objetos imageados e consequentemente os produtos derivados. Destacam-se como efeitos externos ainda as condições atmosféricas e as geometrias de iluminação e de imageamento (NOVO, 2008). Dentre os componentes que podem acarretar este tipo de problema, o relevo apresenta-se como um dos que mais pode causar influências na condição do vigor vegetativo da vegetação (TEILLET; STAENZ, 1992; BURGESS; LEWIS, 1994).

O relevo representa um fator de elevada interferência na resposta espectral da vegetação pelo fato de influenciar na geometria de iluminação solar e observação, acarretando em variações do sombreamento (FORMAGGIO; EPIPHANIO, 1990; MENESES; ALMEIDA, 2012). Corrêa *et al.* (2013) concluem em seu estudo que quando comparados, os resultados obtidos para vertentes iluminadas e sombreadas são bastante distintos. Nas vertentes iluminadas os autores verificaram um aumento médio de 4% dos valores de NDVI em comparação com as vertentes não iluminadas. Este fato demonstra que as características topográficas podem causar modificações expressivas nas imagens, comprometendo as estimativas de parâmetros biofísicos e bioquímicos da vegetação. Corrêa *et al.* (2013) enfatizam que os parâmetros de iluminação de cena bem como a influência do relevo, quando não considerados em análises de vigor de fitomassa e produtividade vegetal, obtida por meio de produtos de sensoriamento remoto, induzem a resultados que não retratam os valores reais, prejudicando a veracidade dos dados estimados e comprometendo a acurácia dos modelos que utilizam esses dados como *input*.

Para corrigir ou mesmo amenizar os efeitos causados pelo relevo, alguns autores têm proposto o uso de modelos de normalização topográfica baseados na modelagem do comportamento não-lambertiano da superfície terrestre com uso de modelos como Minnaert (MINNAERT, 1941; SMITH *et al.*, 1980), correção C (TEILLET *et al.*, 1982), correção SCS+C (SOENEN *et al.*, 2005), entre outros. A utilização destes modelos necessita de uma modelagem prévia das condições locais de iluminação do terreno pelo sol, a qual requer o cálculo do cosseno do ângulo local de incidência solar ($\cos\theta_i$) em relação a normal de cada pixel contido na imagem a ser utilizada.

Estudos combinando produtos gerados pela constelação RapidEye, análise de séries temporais do MODIS e dados geomorfológicos são escassos, especialmente no que tange a ambientes subtropicais (como o PET) em que um outro parâmetro, representado pelo caráter decidual de algumas espécies, pode aumentar ainda mais a complexidade embutida nas imagens de satélite e produtos derivados. Assim, uma avaliação dessa complexidade frente aos parâmetros geomorfológicos representa um passo inicial para entender como os produtos de sensoriamento remoto são dependentes dos aspectos locais.

Considerando a forte dependência da reflectância da vegetação aos efeitos de iluminação associada as características topográficas locais, o trabalho levanta a hipótese de que esses efeitos topográficos causam variações significativas na reflectância espectral de dosséis de vegetação subtropical decídua e índices de vegetação. Especula-se que os princípios que regem o padrão anisotrópico da reflectância são distintos para as diferentes faixas espectrais e condições topográficas, considerando as variações sazonais como a perda de folhas da vegetação no inverno e uma grande amplitude de ângulo zenital de iluminação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a magnitude das variações da reflectância de superfície e dos índices de vegetação em função das variações topográficas locais utilizando dados de sensoriamento remoto orbital.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a dinâmica dos índices de vegetação no Parque Estadual do Turvo no período de 2000 a 2012 com dados do sensor MODIS;
- Elaborar a modelagem topográfica para a área do Parque Estadual do Turvo, com base em dados do modelo ASTER GDEM2;
- Estudar a influência dos parâmetros da modelagem topográfica no padrão de reflectância das bandas das cenas Rapideye, nos índices de vegetação NDVI, EVI e nos índices de vegetação com uso da banda da borda do vermelho RENDVI e Cired-edge.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Fundamentos de sensoriamento remoto

O termo sensoriamento remoto foi criado para designar o desenvolvimento de uma nova tecnologia de instrumentos capaz de obterem dados da superfície terrestre sem ter contato com a mesma, estando a distâncias remotas. De acordo com Meneses; Almeida (2012) a definição clássica de sensoriamento remoto pode ser entendida como uma técnica de obtenção de imagens dos objetos da superfície terrestre sem que haja um contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto. Os sensores são capazes de coletar energia proveniente do objeto, convertê-la em sinal passível de ser registrado e apresentá-lo em forma adequada à extração de informações (NOVO, 1992). Jensen (2009) conceitua o sensoriamento remoto como uma ferramenta que utiliza sensores para obter dados sobre a superfície e atmosfera terrestre, estes dados são captados por meio da luz visível e da radiação em diversos comprimentos de onda como o infravermelho e as micro-ondas. Estes sensores geralmente se encontram a bordo de satélites, que orbitam ao redor do planeta. Dessa forma, o Sensoriamento remoto trabalha essencialmente com a interação entre a radiação eletromagnética (REM) e o alvo, esta interação ao ser captada pelos sensores a bordo do satélite geram as imagens e outros tipos de dados não imageados.

Os sensores orbitais nas últimas décadas passaram a ser importantes fontes de dados para os mais diversos tipos de estudos, destacando-se a sua importância no estudo de ecossistemas, por permitirem a análise das condições deste por meio da garantia da disposição temporal de elementos de observação e da espacialização dos fenômenos que atuam sobre os alvos e suas causas decorrentes.

Sobre o uso dos sensores orbitais nos estudos científicos, Meirelles *et al.* (2004) destaca o uso dos primeiros sensores que disponibilizaram séries de dados. Há poucas décadas os produtos decorrentes de sensores de baixa resolução espacial e alta temporalidade, como o AVHRR (*Advanced High Resolution Radiometer*) (com resolução espacial de mil metros) eram amplamente utilizados na geração de índices de vegetação para análise da degradação ambiental, indicação de focos de calor decorrentes do processo de queima de vegetação (ABDON *et al.*, 1995) e até indicar o avanço das áreas de desflorestamento (MANTOVANI; AMARAL, 1995). No entanto, com a baixa resolução espacial era difícil obter uma definição dos fenômenos em áreas pequenas o que restringia o uso dos dados deste sensor para o estudo de grandes áreas apenas.

Com a entrada em operação do sensor MODIS ocorreu uma melhora na qualidade das imagens orbitais, pois este sensor a bordo dos satélites *Terra* e *Aqua* trouxe grandes melhorias no que diz respeito às correções atmosférica e geométrica, aperfeiçoando a qualidade dos dados obtidos. O sensor MODIS também proporcionou um significativo aumento na resolução espacial em relação às imagens do sensor AVHRR (MELO *et al.*, 2003). Um fator importante que caracteriza a escolha pelos dados obtidos por meio sensor MODIS em boa parte dos trabalhos científicos é disponibilidade gratuita e ininterrupta de imagens.

O grande número de dados disponibilizados pelos sensores orbitais chamou a atenção de muitos ramos da ciência que se dedicam ao estudo de fenômenos da superfície da Terra. Este fato fez com que muitos ramos da ciência empreguem os produtos do sensoriamento remoto em seus estudos, principalmente o uso de imagens orbitais. Desta forma, o sensoriamento remoto passou a ser utilizado para monitorar a extensão espacial, constituintes orgânicos e inorgânicos, temperatura da água em rios, lagos, reservatórios, mares e oceanos (JENSEN, 2009).

De acordo com Velasco *et al.* (2007) as imagens de satélite proporcionam uma visão sinóptica (de conjunto) e multitemporal (de dinâmica) de extensas áreas da superfície terrestre. Assim, as imagens de satélite da área permitem uma visão do todo, possibilitando a obtenção de informações que seriam inviáveis de serem adquiridas sem a utilização das mesmas. Desta forma, muitos dos dados contidos nas imagens de satélites foram sendo aperfeiçoados com o intuito de serem utilizados para a identificação das diferentes feições existentes na superfície da terra.

3.2 Sensoriamento remoto aplicado ao estudo de ambientes florestais

As técnicas de sensoriamento remoto são amplamente aplicadas na maioria dos estudos sobre a superfície terrestre e também em estudos florestais em virtude do grande número de informações que esta ferramenta disponibiliza. Diversos autores caracterizam o sensoriamento remoto como uma ferramenta em potencial para os mais diversos tipos de estudos relacionados com áreas florestais. Neste sentido, Franklin (2001) destaca que o sensoriamento remoto tanto no aspecto de obtenção de dados, quanto na técnica de análise das condições de florestas possui uma grande aplicabilidade para o estudo florestal, uma vez que o mesmo permite avaliar em diversas escalas os problemas referentes ao manejo de florestas. Treitz; Howarth (1999) destacam que o uso do sensoriamento remoto e suas tecnologias para fins de análise de aspectos físicos, estruturais e mapeamentos são muito utilizados em estudos florestais.

Além disto, o sensoriamento remoto multiespectral apresenta uma série de vantagens, como baixo custo por área específica; aspectos diacrônicos (alta frequência de repetitividade da tomada de imagens) e sincrônicos da captação das imagens; aspecto multiespectral das imagens; caráter digital dos dados adquiridos; e facilidade de integração com bases de dados geocodificados, cartográficos ou numéricos, através de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (AZEVEDO; MANGABEIRA, 2001).

O sensoriamento remoto também permite a realização de análises complexas por meio de técnicas de razões de bandas. Estas técnicas mostram-se altamente efetivas na análise da cobertura vegetal. A manipulação de valores de respostas espectral permite a obtenção de índices de vegetação que podem ser comparados com indicadores ecológicos da estrutura e funcionamento das florestas. Imagens resultantes do processamento digital que levam em conta estes índices facilitam a identificação das diferentes comunidades vegetais (VICENS *et al.*, 1998).

Em estudos referentes à dinâmica florestal, é comum a utilização de informações de dados remotos, obtidos por imagens de satélites, fotografias aéreas e imagens de radar. De acordo com Moreira (1984) os satélites da série Landsat aparecem em destaque, quando se objetiva o monitoramento dos recursos florestais no Brasil, uma vez que eles fornecem dados com características multiespectrais com resolução temporal de dezesseis dias a um custo irrisório quando comparado aos métodos alternativos. Essas características viabilizam o uso de dados Landsat, principalmente em estudos regionais, envolvendo grandes áreas.

As imagens obtidas por sensores a bordo de satélites orbitais têm demonstrado um grande potencial para monitorar ou detectar mudanças na cobertura florestal sobre grandes áreas geográficas. Vários algoritmos de detecção de mudanças têm sido desenvolvidos, sendo que a técnica da razão de bandas tem se destacado devido à sua simplicidade de implementação e eficiência (MUCHONEY; HAACK, 1994). Vogelmann; Rock (1986), estudando danos causados em florestas de *Pinus sp.* nas montanhas de Vermont, Estados Unidos, concluíram que a razão de bandas permitiu quantificar os níveis destes danos. Soares *et al.* (1998) utilizaram seis bandas do sensor *Thematic Mapper* a bordo do satélite Landsat-5, obtidas em 1989 e 1992, para avaliar mudanças em plantações de eucaliptos e outras coberturas terrestres localizadas no Vale do Rio Doce, Estado de Minas Gerais.

A realização de mapeamentos utilizando técnicas de sensoriamento remoto em áreas florestais começou no Brasil com a utilização de fotografias aéreas para regiões florestais de difícil acesso, primeiramente utilizando-se da fotointerpretação e da fotogrametria, tornando-se uma ferramenta imprescindível para a ciência florestal. Diferentes tecnologias de sensoriamento remoto têm sido utilizadas para o mapeamento, atualização de inventários florestais e avaliação

de danos florestais, por meio de fotografias aéreas e imagens digitais. A rápida evolução tecnológica de sensores remotos vem proporcionando a obtenção de dados digitais com uma resolução espacial cada vez maior, o que faz com que cada vez mais se opte pelo uso de técnicas de sensoriamento remoto para a realização de estudos florestais (SOUZA *et al.*, 2007).

3.3 A vegetação e sua interação com o espectro eletromagnético

No sensoriamento remoto, as características dos alvos estão fortemente ligadas a sua interação com o espectro eletromagnético. Deste modo, a interação da vegetação com o espectro eletromagnético caracteriza-se em função das condições ambientais e de seu estágio de desenvolvimento fenológico. Desta forma, as folhas são os órgãos mais importantes para a caracterização espectral da vegetação, por refletirem as condições da planta e por conterem substâncias que caracterizam o comportamento espectral como a clorofila, principal substância indicadora das condições fenológicas da vegetação.

De acordo com Jensen (2009) a reflectância espectral das folhas é influenciada pelos pigmentos foliares, os espalhamentos internos e o conteúdo interno de umidade, sendo estes os três elementos dominantes que influenciam na resposta da espectral da folha. Para Ponzoni (2002) o comportamento espectral de uma folha ocorre em função de sua composição, morfologia e estrutura interna. Desde que as características da folha são geneticamente controladas, existirão, portanto diferenças no comportamento espectral entre grupos geneticamente distintos. Curran (1989) enfatiza que os espectros de reflectância de todos os tipos de vegetação na região espectral entre 400 a 2400 nm são notavelmente semelhantes. Além disso, ao longo do espectro eletromagnético existem cinco características principais de absorção para a vegetação. Estas características de absorção ocorrem em função de eletro-transições sofridas pela clorofila na região do visível do espectro eletromagnético (400 nm a 700 nm) e da flexão e estiramento de hidroxilas (O-H) nas moléculas de água e outros compostos químicos contidos no mesófilo nos comprimentos de onda de 970 nm, 1200 nm, 1400 nm e 1940 nm (DANKS *et al.*, 1984; CURRAN, 1989).

A vegetação saudável apresenta uma alta absorção de energia eletromagnética na região do visível no espectro eletromagnético (400 nm a 700 nm), como é ilustrado na Figura 1, o que ocasiona uma baixa reflectância (de aproximadamente 10%) (SANTOS *et al.*, 2010). Isto ocorre em função desta energia ser capturada pela clorofila durante o processo de fotossíntese. No entanto, a absorção de energia ocorre de forma mais branda na região do

espectro correspondente a coloração da vegetação. Por outro lado, a vegetação apresenta uma alta reflectância na região do infravermelho próximo (de aproximadamente 40%), que ocorre em função da estrutura celular da planta (MORAES, 2002; SANTOS *et al.*, 2010).

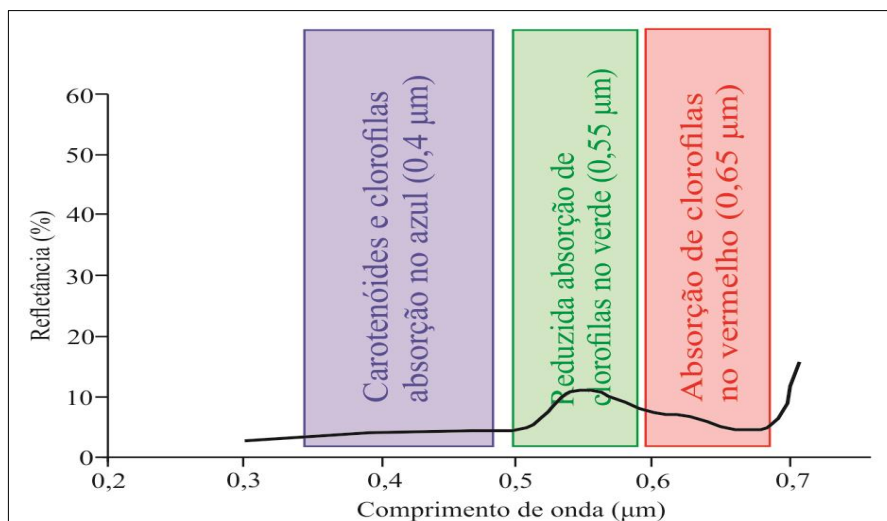


Figura 1 – Reflectância da vegetação na região do visível do espectro eletromagnético.
Fonte: Adaptado de EUMETRAIN, 2010.

De acordo com Ponzoni (2002) a vegetação apresenta comportamentos característicos para cada região do espectro eletromagnético. Na região do visível (400 nm a 700 nm) os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância espectral. Estes pigmentos, geralmente encontrados nos cloroplastos são: clorofila, carotenos, e xantofilas. A energia radiante interage com a estrutura foliar por absorção e por espalhamento, sendo absorvida seletivamente pela clorofila e convertida em calor ou fluorescência, e também convertida fotoquimicamente em energia estocada na forma de componentes orgânicos através da fotossíntese.

Na região do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (700 nm a 1300 nm) ocorre uma alta reflectância associada ao resultado da dispersão foliar (CURRAN, 1989). Além disto, nesta região, ocorre uma absorção pequena da radiação eletromagnética e um grande espalhamento interno na folha. A absorção da radiação pela água é geralmente baixa nessa região e a reflectância espectral quase constante (Figura 2). Gates *et al.* (1965) determinam que a reflectância espectral de folhas nessa região do espectro eletromagnético é o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. Fatores externos à folha, como

disponibilidade de água, por exemplo, podem causar alterações na relação água/ar no mesófilo, podendo alterar a reflectância de uma folha nesta região (PONZONI, 2002).

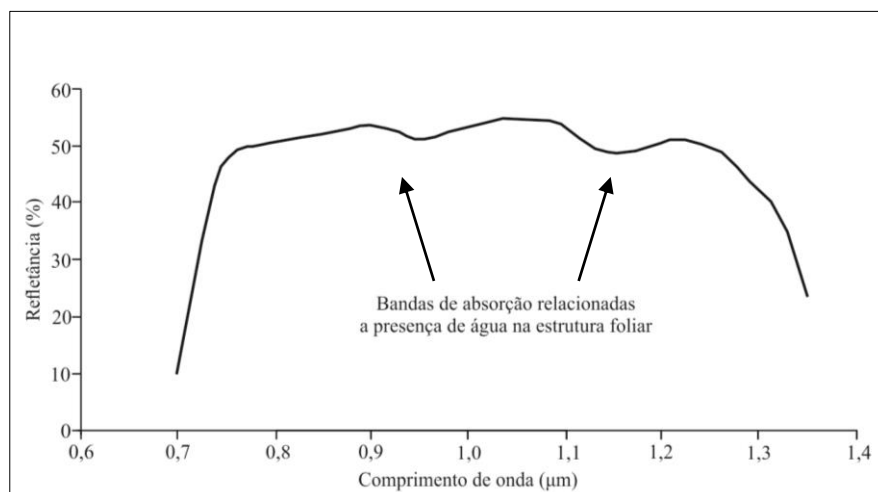


Figura 2 – Espectro de reflectância da vegetação na região do infravermelho próximo do espectro eletromagnético.
Fonte: Adaptado de EUMETRAIN, 2010.

Na região do infravermelho médio do espectro eletromagnético (1300 nm a 2600 nm) ocorrem duas bandas de absorção, devido ao conteúdo de água líquida presente na estrutura interna da folha como é ilustrado na Figura 3. Desta forma, quanto maior a presença de água na folha, menor será a sua reflectância nessa faixa do espectro (SANTOS *et al.*, 2010). A água absorve consideravelmente a REM incidente na região espectral compreendida entre 1300 nm a 2000 nm (PONZONI, 2002). Além da absorção pela água, outros constituintes bioquímicos podem influenciar na resposta espectral da vegetação nesta região do espectro eletromagnético como a celulose, lignina, proteínas, óleos, açúcar e amido (CURRAN, 1989).

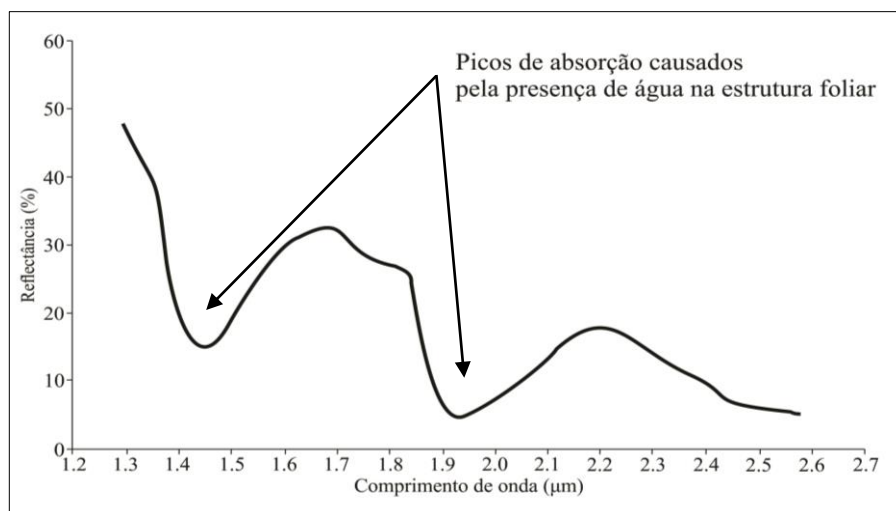


Figura 3 – Espectro de reflectância da vegetação na região do infravermelho médio do espectro eletromagnético. Fonte: Adaptado de EUMETRAIN, 2010.

3.4 O dossel vegetativo e sua interação com a radiação eletromagnética

Os alvos de vegetação caracterizam-se por compreender misturas de diferentes componentes, o que inclui principalmente as folhas, além de outras estruturas da planta, fundo e sombra. Estes componentes são orientados em diferentes ângulos em relação à fonte de radiação incidente, de modo que a irradiância neles varia. Além disso, a área projetada de cada componente iluminado depende do ângulo zenital, azimutal e de sua aparência. O conjunto das estruturas componentes da vegetação é chamado de dossel vegetativo (COLWELL, 1974).

Em relação à interação dos dosséis vegetativos com a radiação eletromagnética Ponzoni (2002) destaca que o comportamento dos dosséis pode se assemelhar ao comportamento espectral das folhas, uma vez que nas bandas do visível de uma imagem, os dosséis tendem a apresentar tonalidade escura devido à baixa reflectância da radiação eletromagnética causada pela ação dos pigmentos fotossintetizantes presentes nas folhas, mas na região do infravermelho próximo os dosséis passam a apresentar uma tonalidade clara em função da maior reflectância nesta região do espectro eletromagnético. Já na região do infravermelho médio os dosséis apresentam tons de cinza intermediários em relação às regiões do espectro do visível e infravermelho próximo.

No entanto, Moreira (2004) destaca que mesmo em dosséis homogêneos sempre pode haver outros tipos de vegetação e estas terem uma considerável participação na resposta

espectral do conjunto. Portanto, o padrão foliar não pode ser entendido como uma forma generalizada do dossel por não apresentar a mesma resposta espectral. No entanto, a resposta espectral de um dossel depende de uma série de fatores, sendo estes: as espécies ocorrentes, o índice de área foliar, a distribuição horizontal das folhas, a distribuição vertical, o ângulo de inserção foliar, o estágio de desenvolvimento vegetativo, o teor de água presente no dossel, entre outros fatores caracterizadores da resposta espectral (ALMEIDA, 2008).

3.5 A relação entre o dossel vegetativo e as imagens orbitais

Em imagens de alta resolução espacial, o sombreamento relacionado com o tamanho dos exemplares vegetais acarreta severa influência nos dados de reflectância (ST-ONGE; CAVAYAS, 1995). Neste aspecto, um pixel de uma imagem orbital vai caracterizar apenas uma pequena parte do dossel vegetativo, sendo o valor deste alvo no pixel associado a mistura de valores de sombra, sub-bosque e solo. A área de vegetação disposta em uma imagem de sensoriamento remoto é gerada pela luz e tons escuros criados pelo conjunto formado pelas copas individuais, caracterizando uma estimativa de densidade vegetal (ELDRIDGE; EDWARDS, 1993; ST-ONGE; CAVAYAS, 1997).

Desta forma, os níveis baixos de reflectância na região do visível, esperados para uma cobertura vegetal, não se devem exclusivamente a absorção dos pigmentos existentes nas folhas, mas também ao sombreamento projetado entre as folhas, as quais são dependentes da geometria de iluminação, da distribuição angular de folhas (DAF) e da rugosidade do topo do dossel. Desta forma, espera-se que a vegetação apresente-se escura em uma imagem referente à região do visível, clara em uma imagem referente a região do infravermelho próximo e novamente escura em uma imagem referente a região do infravermelho médio (PONZONI, 2002).

3.6 O sensor MODIS e seus produtos destinados ao estudo da vegetação

A crescente preocupação da comunidade científica quanto à ocorrência de alterações climáticas em decorrência das ações antrópicas e por meio da necessidade da busca de um melhor entendimento sobre as relações entre os sistemas e ciclos, surgiu a demanda por um sensor orbital

capaz de obter informações a respeito das dinâmicas dos ecossistemas. Neste sentido, os dados deveriam ser coletados diariamente e por um longo período de tempo pelo sensor, de maneira a obter series temporais de informações para cada região da superfície terrestre, oceanos e atmosfera (ANDERSON *et al.*, 2003). Desta forma, foi desenvolvido o sensor MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*), que está a bordo dos satélites *Terra* e *Aqua*.

Este sensor é o principal instrumento a bordo dos satélites EOS (*Earth Observation System*) *Terra* lançado em dezembro de 1999, com o horário de passagem às 10h30min da manhã e *Aqua* lançado em maio de 2002, com passagem às 13h30min da tarde (ANDERSON *et al.*, 2003; LATORRE *et al.*, 2003; SHIMABUKURO *et al.*, 2007). O sensor MODIS foi projetado para atender as exigências de três campos de estudos: atmosfera, oceano e terra, com bandas de resolução espectral e espacial selecionadas para estes objetivos e uma cobertura global quase diária a cada um ou dois dias (JUSTICE *et al.*, 2002).

Barker *et al.* (1992) considera como as principais características do sensor MODIS: a ampla cobertura espacial e espectral; continuidade nas tomadas de medidas nas regiões espectrais, que já estão sendo estimadas por outros satélites, vindo a complementar as informações, já adquiridas por estes, como o conjunto de dados adquiridos pelo AVHRR, usado para a meteorologia e monitoramento da temperatura da superfície do mar, gelo e vegetação e pelo *Coastal Zone Color Scanner (CZSC)*, usado para monitorar a biomassa oceânica e os seus padrões de circulação; é a primeira ferramenta dos da série de satélites EOS para condução de pesquisas sobre mudanças globais.

O sensor MODIS possuem 36 bandas espectrais. De acordo com Barker *et al.* (1992) as primeiras 19 bandas correspondem a porção refletida do espectro eletromagnético (entre 405 nm a 2155 nm), sendo que as bandas de 1 a 7 são destinadas para as aplicações terrestres, enquanto que as bandas de 8 a 16 destinam-se as observações oceânicas e as bandas 17 a 19 são direcionadas para medições atmosféricas. As demais bandas (com exceção da banda 26, que contém um faixa do espectro eletromagnético entre 1360 nm a 1390 nm) correspondem à porção termal do espectro, contendo a faixa entre 3660 nm a 14385 nm do espectro eletromagnético, como mostrado no Quadro 1.

Uso primário	Banda	Largura da banda (nm)	Resolução espacial (m)
Superfície terrestre/nuvens	1	620-670	250
	2	841-875	250
Propriedades da superfície/nuvens	3	459-479	500
	4	545-565	500
	5	1230-1250	500
	6	1628-1652	500
	7	2105-2155	500
Cor dos oceanos/fitoplâncton/bioquímica	8	405-420	1000
	9	438-448	1000
	10	483-493	1000
	11	526-536	1000
	12	546-556	1000
	13	662-672	1000
	14	673-683	1000
	15	743-753	1000
Vapor de água atmosférico	16	862-877	1000
	17	890-920	1000
	18	931-941	1000
Temperatura nuvens/superfície	19	915-965	1000
	20	3660-3840	1000
	21	3929-3989	1000
	22	3929-3989	1000
Temperatura atmosférica	23	4020-4048	1000
	24	4433-4498	1000
Cirrus	25	4482-4549	1000
	26	1360-1390	1000
Vapor de água	27	6535-6895	1000
	28	7175-7475	1000
	29	8400-8700	1000
Ozônio	30	9580-9880	1000
Temperatura nuvens/superfície	31	10780-11280	1000
	32	11770-12270	1000
Altitude topo de nuvens	33	13185-13485	1000
	34	13485-13785	1000
	35	13785-14085	1000
	36	14085-14385	1000

Quadro 1 – Características das bandas do sensor MODIS.
 Fonte: Adaptado Anderson *et al.* (2003).

Tanto as bandas, quanto os produtos do sensor MODIS são disponibilizadas gratuitamente pela NASA e possuem alta resolução temporal, que varia de 1 a 16 dias (JUSTICE *et al.*, 2002) que é um aspecto determinante em estudos fenológicos e pode ser utilizada para obter conhecimento aprofundado a respeito dos ciclos sazonais da vegetação (LIESENBERG *et al.*, 2007).

Um dos objetivos do programa dos satélites EOS é estudar o papel da vegetação terrestre nos processos globais de larga escala, visando compreender o funcionamento dos sistemas terrestres. Neste sentido, a compreensão da distribuição dos tipos de vegetação faz-se necessária, tal como suas propriedades e variações espaciais e temporais. Assim, o sensor MODIS foi projetado para possibilitar a geração de produtos associados a índices de vegetação

por meio da combinação de suas bandas com comprimentos de onda no vermelho e infravermelho próximo. Além dos índices de vegetação disponíveis, os produtos do sensor MODIS referentes a superfície terrestre permitem um monitoramento de longa duração, necessário para o entendimento de mudanças globais (JUSTICE *et al.*, 2002).

Os dados do sensor MODIS têm sido amplamente utilizados nos mais diversos tipos de estudos sobre a superfície terrestre devido a uma série de fatores dos quais se destacam: a disponibilidade de dados com correção dos efeitos atmosféricos; as séries de produtos obtidos por meio dos dados do sensor dos quais se destacam os índices de vegetação NDVI e EVI, os quais podem ser adquiridos com resolução espacial de até 250 metros, maior em relação aos demais sensores que disponibilizam este tipo de produto como o AVHRR. Além dos índices de vegetação o sensor MODIS possui diversos outros produtos voltados para as mais diversas aplicações no estudo de ecossistemas terrestres como o MODLAND (ANDERSON *et al.*, 2003).

3.6.1 O sensor MODIS e suas aplicações no estudo de áreas florestadas

O sensor MODIS possui uma grande gama de aplicações para os mais diversos tipos de estudos sobre a superfície terrestre. Os dados disponibilizados por este sensor permitem a realização de estudos sobre modelos climáticos globais (OLESON *et al.*, 2003; TIAN *et al.*, 2004), análise do uso e ocupação da terra e detecção de alterações (LUNETTA *et al.*, 2006; ZHANG *et al.*, 2008; GILL *et al.*, 2009), mapeamento de cultivos agrícolas (DORAISWAMY *et al.*, 2004; SAKAMOTO *et al.*, 2005), a avaliação da qualidade do ar (GUPTA; CHRISTOPHER, 2008), o monitoramento e avaliação da qualidade da água (HU *et al.*, 2004).

As características dos dados obtidos pelo sensor MODIS como a cobertura global, possibilitam a realização de estudos sobre os mais diversos aspectos da vegetação por meio de seus produtos como o MOD13. No aspecto de estudos florestais, os índices de vegetação deste sensor são empregados em diversos tipos de estudos incluindo análises temporais da dinâmica de florestas (HANSEN *et al.*, 2008; HILKER *et al.*, 2009), identificação de feições de vegetação, análise fenológica (ZHANG *et al.*, 2003; SAKAMOTO *et al.*, 2005) entre outros.

Lima *et al.* (2009) utilizaram dados do sensor MODIS combinados com um modelo linear de mistura espectral para mapear cicatrizes de queimadas na Amazônia brasileira. Neste estudo os autores utilizaram dados do produto do sensor MODIS destinado a reflectância de superfície (MOD09/TERRA), além das bandas 1, 2 e 6, as quais foram utilizadas para a

aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) criando-se imagens fração-sombra. Como resultados, os autores obtiveram respostas significativas que mostram que o uso de imagens fração-sombra provenientes de imagens de refletância diária do sensor MODIS se mostrou viável para o mapeamento de cicatrizes de queimadas na Amazônia brasileira. Além de ter bandas espectrais centradas em regiões propícias para a detecção de mudanças de cobertura, sua alta repetitividade de imageamento tende a atenuar o principal entrave ao emprego do sensoriamento ótico na Amazônia, que é a grande cobertura de nuvens.

Os dados do sensor MODIS possuem grande aplicabilidade na identificação de tipos de florestas. Em um estudo elaborado por Carvalho Junior *et al.* (2006) foram utilizadas técnicas de análise multitemporal de imagens MODIS para a identificação de um tipo de floresta. Seguindo a linha de estudos florestais, Zhang *et al.* (2003) verificaram etapas do desenvolvimento fenológico da vegetação utilizando uma série temporal de índices de vegetação obtidos do sensor MODIS. Soudani *et al.* (2008) identificaram as variações sazonais na fenologia da vegetação de um exemplar de floresta estacional decidual, utilizando índices de vegetação do sensor MODIS. Os mesmos autores concluíram com seu estudo que os produtos MODIS destinados ao estudo da vegetação apresentam grande eficiência para estudos destinados a estudos florestais.

3.7 Imagens Rapideye

O sensor *Rapideye Earth Imaging System* (REIS), lançado em 2008, tem oferecido uma grande quantidade de dados da superfície terrestre, permitindo aplicações em diversos campos como agricultura e silvicultura, nas áreas de energia, meio ambiente e exploração de recursos, para empresas de Cartografia e para órgãos e organizações governamentais (FELIX *et al.*, 2009). O Rapideye é composto por uma constelação de cinco satélites perfazendo o mesmo plano orbital, sendo cada um equipado com um sensor multiespectral composto de scanners de linha, com 12.000 pixels cada, capazes de capturar imagens em cinco bandas espectrais, com alcance de comprimento de onda entre 440 nm e 850 nm. Todos estes sensores são idênticos e possuem a mesma calibração, o que permite a aquisição de uma grande quantidade de imagens (FELIX *et al.*, 2009; RAPIDEYE A G, 2013).

Além da alta resolução temporal de aquisição de dados, a constelação Rapideye tem se destacado das demais plataformas orbitais pela sua capacidade de aquisição de dados de alta

resolução espacial, o que permite identificar alterações em áreas florestais, danos causados por desastres naturais, permite também a previsão de colheitas, inspeção de licenciamentos ambientais e a produção de mapas atualizados até das áreas mais remotas do mundo, sendo capaz de coletarem aproximadamente quatro milhões de quilômetros quadrados de dados por dia com resolução espacial de 5 metros resultando em imagens corrigidas com precisão de detalhes compatível com escala 1:25.000 (FELIX *et al.*, 2009). Outra característica dos sensores Rapideye é o seu tempo de revisita que pode ser diário (fora do nadir) ou a cada cinco dias (no nadir).

Quanto aos dados disponibilizados, os sensores Rapideye disponibilizam imagens com resolução espacial de cinco metros e resolução radiométrica de 12 bits (KRAMER, 2012). Cada imagem possui cinco bandas no espectro eletromagnético, sendo a banda azul (440-510 nm), banda verde (520-590 nm), banda vermelho (630-685 nm), banda da borda do vermelho (*red edge*) (690-730 nm) e uma banda no infravermelho próximo (760-850 nm).

Os dados são disponibilizados em dois tipos de produtos: o *Rapideye Basic* (nível 1B) e o *Rapideye Ortho* (nível 3A). O primeiro consiste em um produto em nível de sensor, com mínimo de processamento, sendo destinado para clientes que desejam corrigir geometricamente o produto ou processá-lo para diferentes finalidades. Este produto apresenta apenas correção radiométrica, disponibilizando imagens quase que diretamente do sensor, sem correções de distorções geométricas e sem projeção cartográfica, com resolução espacial de 6,5 metros (RAPIDEYE A G, 2013). O segundo produto, *Rapideye Ortho*, apresenta um nível maior de processamento, sendo ortorretificado e corrigido para radiância. Este produto é destinado para diversas aplicações que exigem um refinamento nos dados como exatidão no georreferenciamento e projeção cartográfica. Este produto possui correção geométrica obtida com o uso de modelos digitais de elevação com 30 e 90 metros de resolução espacial, além da utilização de pontos de controle precisos (Rapideye A G, 2013).

Diversos estudos nos mais diferentes campos de utilização do sensoriamento remoto têm utilizado dados da constelação Rapideye. Vuolo *et al.* (2010) utilizaram dados Rapideye para estimar variáveis biofísicas de dosséis vegetativos de cultivos agrícolas no sul da Itália. Os autores concluíram que o sensor RapidEye fornece dados úteis para derivar variáveis biofísicas para aplicações operacionais no setor agrícola, dentre estas aplicações pode-se destacar a modelagem da necessidade de água em cultivos a partir do índice de área foliar. Outros autores como Oliveira *et al.* (2013) utilizaram dados da constelação Rapideye para classificação de uso e cobertura da terra para o mapeamento de fragmentos florestais. Campos *et al.* (2013) realizaram uma classificação orientada a objeto para mapeamento do uso e cobertura do solo do

município de Rio Acima, em Minas Gerais, na qual, a utilização das imagens RapidEye foi de grande importância na descrição da dinâmica ambiental da região de estudo.

3.8 Os índices de vegetação

Os dados obtidos por meio do sensoriamento remoto têm sendo extensamente utilizados no monitoramento da vegetação. Dentro desta perspectiva destacam-se os índices de vegetação. A eficiência destes índices se fundamenta de acordo com Fontana *et al.* (1998) no fato de que a produção primária de uma comunidade vegetal possui uma estreita relação com a energia solar que esta absorve, definindo o desenvolvimento desta comunidade.

Os índices de vegetação representam uma técnica de grande potencial para o monitoramento das condições da vegetação na área do sensoriamento remoto. De acordo com Jensen (2009) os índices de vegetação se configuram como medidas radiométricas adimensionais, que indicam a atividade da vegetação verde. Barbosa (2006) conceitua os índices de vegetação como modelos matemáticos desenvolvidos para avaliar a cobertura vegetal e relacionam a assinatura espectral e os parâmetros mensuráveis no campo tanto quantitativamente quanto qualitativamente. Estes índices são elaborados a partir de razões de valores espectrais, produzindo um valor único que indica a quantidade ou o vigor vegetativo dentro de um pixel (CAMPBELL; WYNNE, 2011).

Em função do comportamento espectral dos alvos vegetativos para o cálculo dos índices de vegetação se estipula a relação inversa entre a refletância da vegetação nas regiões do vermelho e infravermelho do espectro eletromagnético. Assim, devido a absorção no vermelho ser maior pela clorofila e ocorrer uma forte reflexão da radiação na região do infravermelho próximo, a relação entre o infravermelho/vermelho será elevada em plantas em fase de desenvolvimento vegetativo ou em regiões com grande cobertura vegetal (CAMPBELL; WYNNE, 2011). Por outro lado, em superfícies com pouca ou nenhuma cobertura vegetal, solo exposto ou ainda em superfícies com vegetação com grande stress hídrico, não ocorrerá uma resposta espectral significativa na faixa entre o vermelho e o infravermelho próximo (CAMPBELL; WYNNE, 2011).

Os primeiros estudos com o uso dos índices de vegetação voltaram-se a aplicabilidade destes a fim de verificar a sua eficiência. Nestes estudos preliminares foram constatados que os índices encontram-se intimamente relacionados com a característica biológica dos vegetais.

Desta forma, verificou-se também que os índices de vegetação apresentam valores distintos para cada etapa do desenvolvimento fenológico dos vegetais, permitindo identificar as fases do desenvolvimento inclusive de áreas de cultivo agrícola. Muitos outros estudos comparam a eficácia dos índices de vegetação quando ao monitoramento remoto de cultivos agrícolas, sendo os índices em sua maioria eficazes no monitoramento da produtividade de culturas específicas, incluindo suas flutuações sazonais e anuais decorrentes de condições climáticas ou stress hídrico.

Os índices de vegetação também são empregados nos estudos referentes a classificação de áreas, sendo também utilizados em estudos de forma qualitativa, auxiliando em mapeamentos na distinção entre áreas com cobertura de vegetação das áreas de ocorrências de outras feições. Também são empregados na distinção de tipos e densidades de vegetação e no monitoramento de variações sazonais e sua distribuição.

Os índices de vegetação possibilitam identificar mudanças fenológicas da vegetação causadas pela influência de agentes externos como fenômenos climáticos. Jacóbsen *et al.* (2004) analisaram por meio de um índice de vegetação obtido por meio do sensor AVHRR os efeitos associados ao *El Niño* e *La Niña* na vegetação do Estado do Rio Grande do Sul. Com este estudo, os autores concluem que o índice de vegetação é sensível a alterações na biofísica da vegetação causadas por ocorrência de fenômenos climáticos. Desta forma, os índices de vegetação têm se mostrado eficientes na identificação de efeitos causados na vegetação associados às variações de precipitação e temperatura.

Muitos outros autores em seus trabalhos têm destacado a relevância dos índices de vegetação no desenvolvimento de trabalhos científicos. Assad *et al.* (1996) destaca em seu trabalho alguns outros desenvolvidos por outros autores com o uso dos índices de vegetação como as pesquisas de monitoramento de florestas tropicais, incluindo o estudo das áreas de desmatamento (CHEN; SHIMABUKURO, 1991; AMARAL, 1992); monitoramentos e averiguação da dinâmica da vegetação (MALINGREAU; BELWARD, 1992; BATISTA *et al.*, 1993); estudos sobre a determinação e previsões de períodos de seca (HENRICKSEN; DURKIN, 1986; TURCKER *et al.*, 1991); monitoramento de queimadas (PEREIRA *et al.*, 1990); estudos de correlação entre o NDVI com dados pluviométricos (ASSAD *et al.*, 1988; LIU *et al.*, 1991).

Os índices de vegetação têm-se mostrado, de maneira geral, eficientes como ferramentas para a detecção e análise da vegetação e suas feições. De acordo com Breunig (2012), um índice de vegetação ideal deveria minimizar a influência dos fatores externos não desejados e maximizar a resposta dos alvos vegetativos. No entanto, os valores destes índices podem sofrer influências de fatores externos como os efeitos direcionais das folhas, as

diferenças de direção e espaçamento entre os cultivares agrícolas e a influência nos valores causada pela degradação atmosférica e substrato.

3.8.1 O índice NDVI

O índice de vegetação da diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI) proposto por ROUSE *et al.* (1973) é uma relação entre medidas espectrais de duas bandas, a do infravermelho próximo (800-1100 nm) e a do vermelho (600-700 nm), obtido por meio da Equação 1:

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{red})}{(\rho_{NIR} + \rho_{red})} \quad (1)$$

Onde: ρ_{NIR} representa a banda correspondente à região do infravermelho próximo do espectro eletromagnético; ρ_{red} representa a banda correspondente à região do vermelho do espectro eletromagnético.

Este índice de vegetação visa eliminar diferenças sazonais do ângulo do Sol e minimiza os efeitos da atenuação atmosférica, observados para dados multitemporais. Este índice de vegetação baseia-se na diferença de absorção dos tecidos fotossinteticamente ativos nos comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (JULIEN *et al.*, 2011; GU *et al.*, 2012). O NDVI permite a análise dos diferentes tipos de cobertura vegetal, aos quais é possível identificar inclusive o período de desenvolvimento fenológico dos vegetais (CLERICI *et al.*, 2012).

Os valores obtidos com o NDVI são contidos em uma mesma escala de valores, entre -1 e 1. Deste modo, a presença da vegetação está associada aos valores positivos. De acordo com Ponzoni; Shimabukuro (2007) os valores máximos de NDVI apresentam-se no entorno de 0,80 estando associados a vegetação vigorosa. Os materiais que refletem mais intensamente na porção do vermelho em comparação com o infravermelho próximo como nuvens, água e neve, apresentam valores negativos. Os solos expostos e rochas apresentam valores próximos de zero (RIZZI, 2004). No entanto, existe uma peculiaridade atribuída ao NDVI que diz

respeito a sua rápida saturação, o que o torna insensível ao aumento da biomassa vegetal a partir de determinado estágio de desenvolvimento.

O NDVI é muito utilizado em diversos tipos de estudos para estimativas de índices de área foliar (IAF) (TUCKER, 1979), radiação fotossinteticamente ativa absorvida (*absorbed photosynthetically active radiation* - APAR) (KUMAR; MONTEITH, 1981), a biomassa da vegetação (SELLERS, 1987; ANDERSON *et al.*, 1993; DONG *et al.*, 2003), a produção primária bruta (*net primary production* - NPP) (GOWARD *et al.*, 1985), o teor de umidade da vegetação (PALTRIDGE; BARBER, 1988), a biomassa verde (BARET; GUYOT, 1991) e a fração de absorção de radiação fotossinteticamente ativa (*fraction of absorbed photosynthetically active radiation* - FAPAR) (BRAGHIÈRE; YAMASOE, 2011). Desta forma, o NDVI é utilizado para a detecção de mudanças em larga escala dos processos relativos aos ecossistemas (BRASWELL *et al.*, 1997; MYNENI *et al.*, 2001).

Costa *et al.* (2003) também destaca alguns trabalhos desenvolvidos com o uso de índices de vegetação por diferença normalizada, obtidos meio do sensor AVHRR/NOAA como o estudo da variabilidade temporal do NDVI em regiões semiáridas na África (NICHOLSON; FARRAR, 1994); diferenciação dos tipos de vegetação da Terra (HUETE *et al.*, 1997); monitoramento da dinâmica da vegetação da Amazônia, Pantanal, Serrado e vegetação do nordeste do Brasil (ALMEIDA, 1997; BRAGA, 2000; ABDON *et al.*, 1995); avaliação da relação entre variáveis estruturais e fitofisionomias do bioma cerrado e valores de NDVI (GIRALDELLI; PARANHOS FILHO, 2006).

De acordo com Lucas; Schuler (2007) é possível acompanhar as variações fenológicas da cultura da cana-de-açúcar com imagens do NDVI/NOAA devido à alta resolução temporal, embora a resolução espacial seja baixa. Também foi possível identificar que anomalias na precipitação não exercem em curto prazo grande influência no comportamento da cultura da cana-de-açúcar. Não foi possível, no entanto, verificar as diferenças fenológicas no início da cultura devido, possivelmente, ao volume reduzido de folhas nos cultivares.

O NDVI obtido por meio de dados do sensor MODIS produto MOD13 é sensível à presença de clorofila e outros pigmentos responsáveis pela absorção da radiação solar na banda do vermelho (RISSO *et al.*, 2009). Devido a esta característica destaca-se a importância das folhas dos vegetais na obtenção dos dados relacionados com a reflectância espectral da radiação eletromagnética devido à presença de clorofila (ANDERSON, 2004). O NDVI/MODIS é um dos índices de vegetação mais utilizados no mundo, devido algumas propriedades que permitem que este índice atenuar grande parte dos erros associados a calibração, ruídos e mudanças nas condições de irradiância causadas por mudanças no ângulo

solar, além de atenuar erros decorrentes da topografia, cobertura de nuvens, sombras e condições atmosféricas (HUETE *et al.*, 1999).

O NDVI/MODIS vem sendo muito utilizado como ferramenta para o monitoramento da vegetação, permitindo a construção de séries temporais e perfis de atividade vegetativa. A utilização de perfis temporais de NDVI permite identificar características sazonais como o desenvolvimento fenológico (JUNGES; FONTANA, 2011), possibilitando com isto, a identificação de períodos de crescimento, picos de máximo desenvolvimento vegetativo, volume foliar.

3.8.1.1 O comportamento do NDVI em função das estações do ano

O NDVI é um indicador da densidade de biomassa verde e está relacionado com parâmetros de crescimento e desenvolvimento das plantas. Nas regiões de clima temperado, onde os invernos são mais pronunciados, a queda da temperatura faz com que muitas espécies vegetais reduzam o metabolismo, reduzindo com isto, o processo de produção de clorofilas. No entanto, no período das estações mais quentes (primavera e verão), a vegetação acelera os processos fenológicos aumentando de forma significativa a produção de clorofilas. Desta forma se tem o estágio fenológico de maior desenvolvimento vegetativo.

De acordo com Wang *et al.* (2001), os fatores climáticos, a precipitação e a temperatura influenciam nos padrões temporais e espaciais do NDVI. Os autores concluíram em seu estudo, que a precipitação e o NDVI covariam na mesma direção. O mesmo ocorre com a relação entre o NDVI e as temperaturas mínimas e médias. Desta forma, os resultados obtidos por Wang *et al.* (2001), mostram que os fatores indicativos das variações de NDVI ao longo das estações do ano está diretamente ligado a precipitação e a períodos com grande variação de temperatura.

Em um estudo realizado por Rizzi; Fonseca (2001), o qual compreendeu a análise da variação espacial e temporal do NDVI no Estado do Rio Grande do Sul por meio de imagens do sensor AVHRR, os autores obtiveram como resultado o mapeamento das variações do NDVI durante as estações do ano. Desta forma, para o outono foi verificada uma diminuição dos valores do NDVI em todo o Estado em decorrência da diminuição da temperatura e consequente redução da atividade fotossintética da vegetação. Em decorrência da grande área agrícola do Estado, está também influencia nos valores baixos do índice de vegetação, devido no outono ser o fim dos ciclos das culturas de arroz, soja e milho, as quais tentem em seu período de maturação reduzir a atividade fotossintética, e perder o seu dossel.

3.8.2 O índice EVI

O Índice de Vegetação Realçado (*Enhanced Vegetation Index* - EVI) foi desenvolvido pela *MODIS Land Discipline Group*, para ser um índice de vegetação para uso com os dados do sensor MODIS (JENSEN, 2009). Com a finalidade de aumentar a resposta para a sensibilidade da vegetação, o índice utiliza medições nas bandas das regiões do vermelho e infravermelho do espectro eletromagnético e também na banda azul da região do visível, com o objetivo de corrigir efeitos adicionais ocasionados pela dispersão de aerossóis.

O objetivo do EVI é otimizar a resposta da vegetação verde, procurando melhorar a sensibilidade para as variações estruturais e arquitetônicas do dossel vegetativo, e reduzir as influências atmosféricas e do solo (HUETE *et al.*, 2002). Assim como NDVI, os valores de EVI estão contidos em uma escala de valores, entre -1 e 1. Sendo determinado pela equação 2:

$$EVI = G * \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{red})}{(\rho_{NIR} + C_1 * \rho_{red} - C_2 * \rho_{blue} + L)} \quad (2)$$

De acordo com Jensen (2009) o EVI é um NDVI modificado, que contém um fator de ajustamento para correção do efeito dos solos (L), e dois coeficientes (C_1 e C_2), que descrevem o uso da banda azul para a correção da banda vermelha em função do espalhamento atmosférico causado pelos aerossóis. Os coeficientes de sua equação (C_1 , C_2 e L) são determinados por valores empíricos os quais assumem 6,0, 7,5 e 1,0 respectivamente. G é o fator de ganho, o qual se atribui valor de 2,5 (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; HUETE *et al.*, 1997).

Embora o NDVI seja o índice de vegetação mais utilizado em estudos da vegetação, estudos utilizando o EVI têm demonstrado que este índice de vegetação apresenta grande relação com o IAF, a biomassa, cobertura do dossel e a fração de radiação fotossinteticamente absorvida (GAO *et al.*, 2000). Desta forma, este índice tem se mostrado eficiente para o monitoramento sazonal e demais variações da estrutura da vegetação (HUETE *et al.*, 2002).

O algoritmo utilizado na elaboração do EVI tem melhorado significativamente a sensibilidade para as regiões de grande biomassa, permitindo uma melhora no desempenho do monitoramento da vegetação através da diminuição da influência do sinal proveniente do

substrato abaixo do dossel vegetativo e da redução dos efeitos atmosféricos com o uso da banda do azul (HUETE *et al.*, 1997; HUETE; JUSTICE, 1999; HUETE *et al.*, 2002).

Este índice também é muito empregado em estudos referentes às estimativas de produção agrícola. Gusso *et al.* (2009) realizaram um estudo com o uso do índice EVI com o objetivo de estimar a área cultivada com soja no Rio Grande do Sul. Os autores concluíram que o uso de séries temporais EVI/MODIS obtidas a partir de dados do satélite Terra, têm resolução espacial e temporal satisfatória para produzir resultados numéricos de interesse para a estimativa da área plantada com soja. Outro estudo envolvendo estimativas de safra com o uso do EVI foi realizado por Risso *et al.* (2009), no qual foi verificada a potencialidade dos índices de vegetação EVI e NDVI dos produtos MODIS na separabilidade espectral de áreas de soja, este estudo mostrou que o EVI se mostrou mais eficiente que o índice NDVI para a separação de alvos no período de máximo desenvolvimento da soja.

3.8.3 Índices de vegetação com uso da borda vermelha do espectro eletromagnético

A borda do vermelho é uma região na zona de transição entre a região do vermelho e a do infravermelho próximo no espectro eletromagnético ficando próxima de 700 nm (GITELSON *et al.*, 1996) como é ilustrado na Figura 4. Esta região marca a fronteira entre a absorção pela clorofila na região do visível vermelho e o espalhamento causado pela estrutura das folhas na região do infravermelho próximo (NIR). Esta região de transição, devido as suas características, vem sendo muito utilizada na composição de diversos índices de vegetação. Além disso, a posição da borda vermelha é utilizada para estimar o teor de clorofila das folhas ou de um dossel.

Muitos estudos têm indicado que a alta resolução espectral na região da borda do vermelho pode ser utilizada para detectar áreas vestigiais de vegetação, na qual a cobertura vegetal encontra-se consideravelmente esparsa ou restrita a pequenas porções da área (ELVIDGE; CHEN, 1995). De acordo com Collins (1978), o principal aspecto da borda do vermelho é a sua grande absorção no comprimento de onda em que ocorrem as absorções de pigmentos de clorofila, na região de transição entre o vermelho e o infravermelho do espectro eletromagnético.

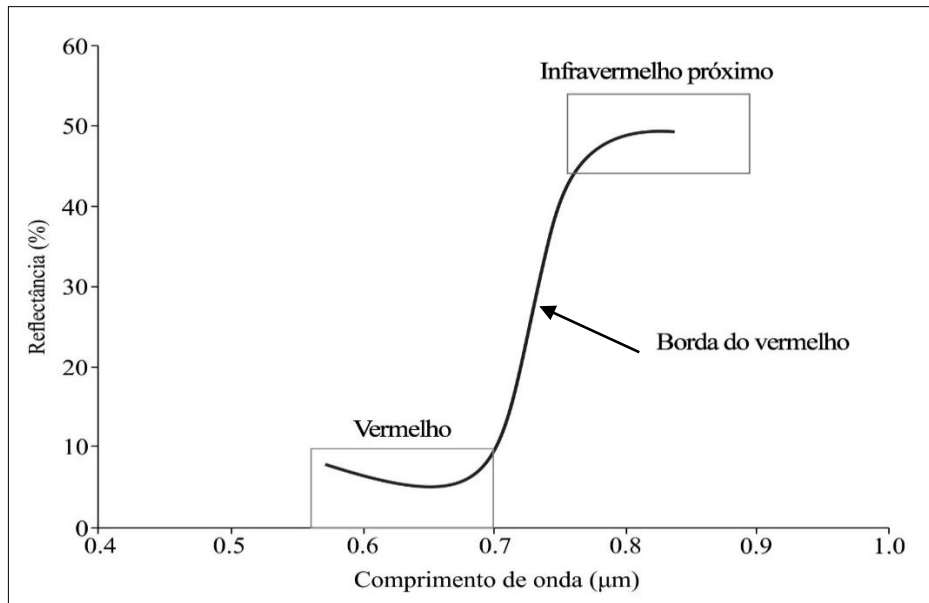


Figura 4 – Região da borda do vermelho do espectro eletromagnético a partir de um espectro de vegetação.
Fonte: Adaptado de EUMETRAIN, 2010.

Devido à resposta que está banda possui em relação a reflectância da vegetação, passou a ser utilizada na composição de alguns índices de vegetação, permitindo uma melhor análise do teor de clorofila da vegetação. Desta forma, a borda do vermelho é utilizada na composição de diversos índices de vegetação como: *Red-edge Normalized Difference Vegetation Index*, *Modified Red-edge Simple Ratio Index*, *Modified Red-edge Normalized Difference Vegetation Index*, *Vogelmann Red-edge Index 1*, *Vogelmann Red-edge Index 2*, *Vogelmann Red-edge Index 3* e *Red-edge Position Index* (EXELIS, 2013). Dentre estes, se destacam o *Red-edge Normalized Difference Vegetation Index* e o *Red-edge Chlorophyll Index* (GITELSON *et al.*, 2005).

O Índice de vegetação por diferença normalizada da borda do vermelho (*Red-edge Normalized Difference Vegetation Index* - *RENDVI*), representado na Equação 3 foi desenvolvido por Gitelson; Merzlyak (1995) com o objetivo de desenvolver um índice mais sensível a concentração de clorofila que o próprio NDVI. Desta forma, o *RENDVI* pode servir como indicador de estresse, senescência e doenças na vegetação. Estas ocorrências em longo prazo resultam em uma perda de teor de clorofila, alterando significativamente os valores do índice.

$$RENDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{red-edge})}{(\rho_{NIR} + \rho_{red-edge})} \quad (3)$$

Onde: ρ_{NIR} a banda correspondente a região do infravermelho próximo do espectro eletromagnético; $\rho_{red-edge}$ representa a banda correspondente a região da borda do vermelho do espectro eletromagnético.

O RENDVI consiste em uma modificação do Índice de vegetação por diferença normalizada, na qual são utilizadas medidas de reflectância ao longo da borda do vermelho (EXELIS, 2013). A utilização da borda do vermelho permite uma análise mais complexa do teor de clorofila, uma vez que a banda do vermelho é limitada por diversos fatores que interagem na resposta da reflectância (ANDRIEU; BARET, 1993; HUETE *et al.*, 1994).

Gitelson *et al.* (2005) propôs um modelo de índice de clorofila utilizando a borda do vermelho, o *Red-edge Chlorophyll Index* (Equação 4), com uma técnica baseada em um modelo de regressão linear *versus* o total de clorofila contido no dossel vegetativo.

$$CI_{red-edge} = \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{red-edge}} \right) - 1 \quad (4)$$

Onde: ρ_{NIR} representa a banda correspondente à região do infravermelho próximo do espectro eletromagnético; $\rho_{red-edge}$ representa a banda correspondente à região da borda do vermelho do espectro eletromagnético.

Com o uso deste índice, Gitelson *et al.* (2005) encontraram relações estreitas entre o índice de clorofila da borda do vermelho e a clorofila do dossel vegetativo em cultivos agrícolas. Outra importante aplicação do índice de clorofila da borda do vermelho é a identificação da produtividade primária bruta. De acordo com Gitelson *et al.* (2006) estimativas precisas da produtividade primária bruta de cultivos agrícolas foram observados com erro quadrático médio estimado de menos de 0,3 mg m² s⁻¹.

3.9 Os índices de vegetação e a interferência dos componentes físicos do relevo

No processo de obtenção de dados por meio de sensoriamento remoto existem diversos fatores que podem influenciar na precisão dos dados a serem coletados. O relevo

caracteriza-se neste contexto como sendo um dos fatores que influenciam na qualidade dos dados e, sobretudo, na resposta espectral dos alvos imageados.

A influência causada pelo relevo nos dados de sensoriamento remoto pode ser entendida por meio do efeito topográfico. Este efeito pode ser definido como a variação na luminosidade que acompanha uma mudança de orientação a partir de um eixo horizontal a uma superfície inclinada, em resposta a uma mudança na fonte de luz e sensor de posição. Neste sentido, o efeito topográfico inclui dois aspectos: o efeito direto e o efeito indireto. O primeiro refere-se a mudança de luminosidade devido a mudanças de área-alvo (por pixel) observados por um sensor pelo fator de $1/\cos$. (vista da superfície por ângulo normal). Sendo também induzida pelas mudanças de área-alvo perpendicular a direção solar, que determina a área efetiva irradiada pela radiação solar, também pelo fator de $1/\cos$ (MATSUSHITA *et al.*, 2007).

O efeito topográfico caracteriza-se como um fator ambiental que contribui para a existência de ruídos em índices de vegetação, especialmente em regiões montanhosas (SMITH *et al.*, 1980; MEYER *et al.*, 1993; TROTTER, 1998; DYMOND; SHEPHERD, 1999). Os efeitos topográficos na região do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético podem ser eliminados ou reduzidos quando os índices de vegetação são expressos em razões de bandas, como no caso do NDVI (LEE; KAUFMAN, 1986).

No entanto, contrário ao índice NDVI, o índice EVI possui um termo constante, o fator de ajuste do solo (L) em sua equação. Esta constante permite a inclusão de um termo sem formato de proporção de banda. Desta forma, o efeito topográfico sobre o EVI não pode ser atenuado de forma simples como pode ser feito com o índice NDVI (MATSUSHITA *et al.*, 2007).

Referindo-se a influência que o relevo exerce na iluminação de objetos, Jackson; Pinter Jr. (1986) destacam em seu estudo que as variações de iluminação solar quando analisadas em diferentes arquiteturas de dosséis vegetais constitui um parâmetro que altera os valores de reflectância de espécies que apresentam semelhanças quanto à reflectância de folhas individuais, índice de área foliar verde e fitomassa total seca. Neste aspecto, Novo (2008) também destaca que a influência das geometrias de iluminação causa efeitos significativos na resposta dos dados de sensoriamento remoto.

O sombreamento causado pelo relevo interfere nos índices de vegetação de modo a resultar em valores baixos na resposta do índice, mesmo em áreas com grande densidade de vegetação arbórea. Este tipo de influência causada pelo relevo ainda acarreta na mistura das respostas espectrais da sombra e da vegetação interferindo nas respostas espectrais de alvos idênticos (FORMAGGIO; EPIPHANIO, 1990; MENESES, 2012).

Sobre a influência do sombreamento Corrêa *et al.* (2013) em um estudo, no qual foi analisada a influência dos parâmetros de iluminação de cena e sombreamento do relevo em dados de índice de vegetação, os autores constataram que os parâmetros de iluminação e a influência do relevo, quando desconsiderados principalmente em análises de vigor vegetativo e produtividade vegetal induzem a resultados que não retratam os valores reais dos dados levantados. Os autores concluem que a combinação de regiões de elevada declividade e amplitude altimétrica, juntamente com imagens orbitais com médios a baixos valores de azimute e elevação solar, fornecem dados espectrais diversos de alvos idênticos em uma mesma cena.

3.10 O ângulo de iluminação solar e sua influência em dados de índice de vegetação

As imagens dos sensores remotos são obtidas por meio do registro da reflectância dos alvos. Para isto faz-se necessária uma fonte de radiação eletromagnética, o Sol, o qual possui grande importância para o sensoriamento remoto. A reflectância que é registrada pelos sensores remotos depende, basicamente, da configuração geométrica da visada do sensor e da iluminação solar, sendo regida pela Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional (BRDF) (LIESENBERG, 2005; MOURA, 2012).

No entanto, variações na geometria de aquisição de dados interferem na quantidade de energia captada pelo sensor. Também se deve considerar que muitos alvos da superfície terrestre, principalmente os alvos naturais como a vegetação que apresentam variado grau de anisotropia, possuindo um comportamento não lambertiano (MOURA, 2012).

De acordo com Weyermann *et al.* (2013) o efeito da anisotropia tende a causar incerteza nos dados devido à influência negativa sobre a precisão dos dados de espectroscopia. A anisotropia consiste em uma propriedade intrínseca de superfícies naturais em dispersar a radiação de forma desigual em todas as direções, sendo este efeito impulsionado principalmente pelas propriedades estruturais de dosséis vegetativos. Diversos estudos apontam que a reflectância anisotrópica é comum à maioria dos tipos de superfícies da Terra (DEERING *et al.*, 1994).

As superfícies naturais não apresentam comportamento lambertiano, pois a radiância espectral varia em função dos ângulos zenitais e azimutais de visada e iluminação apresentando desta forma, padrões de reflectância anisotrópicos (MIESCH *et al.*, 2002), nas quais a radiância solar espectral proveniente de uma superfície varia em função dos ângulos zenitais e azimutais de iluminação e observação, sendo dependentes das propriedades físicas, químicas e biológicas

da superfície (MORAES *et al.*, 2011) Essa característica de anisotropia, principalmente na região do espectro solar devem ser levadas em consideração, já que o sensoriamento remoto é baseado nas medidas de radiação eletromagnética refletida ou emitida pelas superfícies. Além disso, a reflectância é função tanto da radiância incidente como da refletida.

Moraes *et al.* (2011) ressaltam a importância de se considerar os efeitos anisotrópicos nas imagens de sensores orbitais multiangulares frente a necessidade de uma melhor compreensão das características da superfície imageada. A desconsideração do fator de anisotropia no processamento de imagens de sensores orbitais pode refletir em alteração na precisão dos produtos. Esta alteração pode estar associada ao método de correção atmosférica (VERMOTE *et al.*, 2002) e ao aumento do tamanho do pixel em função ao ângulo de visada do sensor (VAN LEEUWEN *et al.*, 1999).

Liesenber *et al.* (2007) ressalta que a reflectância espectral de superfícies naturais é influenciada pelo comprimento de onda e pelo ângulo de visada. Essa característica de anisotropia deve ser considerada na avaliação dos dados extraídos de imagens de satélites com capacidade de imageamento multiangular que possibilitam analisar a variabilidade da resposta espectral dos alvos em função da anisotropia de superfície, permitindo a extração de informações sobre a cobertura terrestre com mais precisão do que somente com informações ao nadir (LIESENBERG, 2005).

3.11 Modelos digitais de elevação

Os modelos digitais de elevação (MDE) obtidos por meio dos sensores orbitais têm representado uma alternativa interessante frente à carência de levantamentos topográficos, sobretudo no Brasil, onde boa parte da Cartografia de base não abrange todo o território nacional ou possui mapeamentos de base em escalas demasiadamente generalizadas para utilização da informação topográfica (VALERIANO, 2005). Neste sentido, os modelos digitais de elevação representam uma alternativa viável a aquisição de dados geomorfológicos em decorrência de sua cobertura a nível global e grande resolução espacial.

Entre os modelos mais utilizados destaca-se o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Map version 2* (ASTER GDEM 2). Além deste modelo digital de elevação, outras fontes de dados estão disponíveis, como as cartas topográficas, o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e produtos derivados como o

TOPODATA (VALERIANO *et al.* 2006). De acordo com Valeriano (2005) a utilização dos modelos digitais de elevação está vinculada principalmente a obtenção de dados sobre variáveis altimétricas que são derivadas da altimetria como a declividade, orientação de vertentes e curvatura. Sobre os dados obtidos por meio dos modelos digitais de elevação GILES; FRANKLIN (1998) destacam a importância dos MDE como fontes de informação sobre as características da superfície terrestre.

Modelos digitais de elevação têm sido muito utilizados em estudos biogeográficos, principalmente nos estudos com ênfase em ecologia da paisagem e conservação de biomas (MEISEL; TUNER, 1998) devido o relevo influenciar de forma significativa na distribuição de espécies vegetais. Muitos atributos relativos às formas de relevo como rugosidade, localização em relação a fundos e vales ou topos são importantes para a fauna de determinado local, devido à influência destes fatores no microclima, além do relevo muitas vezes servir como proteção para determinadas formações vegetais contra a ação antrópica (FRANKLIN, 1987).

3.11.1 Modelo digital de elevação ASTER GDEM

O modelo digital de elevação GDEM (*Global Digital Elevation Model*) é obtido por meio de pares estereoscópicos de imagens do sensor ASTER (*Advance Space Borne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), a bordo do satélite *Terra*. Este produto foi desenvolvido a partir de um consórcio desenvolvido entre a NASA, o Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (*Minister of Economy, Trade and Industry – METI*), o Centro de Análise de Dados e Recursos Terrestres (*Earth Resources Data Analysis Center – ERSDAC*) e o Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey – USGS*), com objetivo de desenvolver um modelo digital de elevação de cobertura global e com livre acesso, sendo disponibilizado em sua primeira versão a partir de junho de 2009 (ABRAMS *et al.*, 1999; RODRIGUES *et al.*, 2010).

Para a obtenção dos dados de elevação da superfície terrestre, o sensor ASTER opera no modo estereoscópico com as bandas 3N (nadir) e 3B (backward) correspondentes a faixa do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (0,78 μm a 0,86 μm) (YAMAGUCHI *et al.*, 1999; SOUZA; MATRICARDI, 2013). As bandas formam um par estéreo que é transformado em uma imagem única ou *tiles*. Cada *tile* recobre uma área de 60 quilômetros quadrados. O modelo digital de elevação GDEM1 é formado por aproximadamente 1,2 milhões de imagens ASTER e

apresenta acurácia vertical entre 10 a 25 metros (MEYER *et al.*, 2011). O modelo ASTER GDEM recobre a superfície terrestre entre as latitudes de 83°N e 83°S com resolução espacial de 30 metros.

A segunda versão do modelo ASTER GDEM foi desenvolvida em outubro de 2011 e apresenta significativas correções em relação ao GDEM versão um, como o acréscimo de uma menor correlação de Kernel (5X5 contra 9X9 do GDEM versão 1) visando uma melhor resolução espacial, além de um melhor mascaramento de corpos de água. Também foi removido neste novo modelo uma tendência geral negativa de cinco metros contida na primeira versão. Este novo modelo apresenta as mesmas características das estruturas de *tile* e grade de cobertura da primeira versão, sendo acrescentadas mais de 260.000 cenas com o objetivo de melhorar a cobertura global (MEYER *et al.*, 2011; GESCH *et al.*, 2011).

GESCH *et al.* (2011) mencionam que os resultados dos testes de validação com o modelo GDEM versão 2 permitiram o estabelecimento de algumas diferenças significativas com o modelo anterior (GDEM 1), das quais as mais significativas podem ser mencionadas como o erro quadrático médio (RMSE) medido para o GDEM versão 2 é de 8,68 metros, enquanto que o RMSE do modelo GDEM versão 1 é de 9,34 metros. Ao ser analisada a precisão vertical por meio da média de erro, que indica se um modelo digital de elevação apresenta deslocamento a partir do nível do solo foi encontrado para o GDEM versão 2 um erro médio de -0,20 metros, o que torna esta versão mais confiável em relação a primeira, a qual apresenta um erro médio de -3,69 metros. GESCH *et al.* (2011) concluem que ao analisar a precisão vertical considerando os efeitos dos diversos tipos de cobertura, o modelo GDEM versão 2 apresenta uma elevação positiva na presença de recursos acima do solo (dosséis vegetativos e construções) devido as características óticas do sensor ASTER envolvidas na elaboração do modelo.

No entanto, muitos especialistas apontam que o produto ainda pode conter anomalias e artefatos, causando imprecisões nos valores altimétricos podendo ser significativos para áreas relativamente pequenas. Embora exista a ocorrência de anomalias, estas são de característica pontual, não ocorrendo em toda a extensão os dados e ainda de acordo com a escala de estudo podem não acarretar diferenças significativas o que viabiliza a utilização deste modelo para o estudo de grandes áreas.

Embora existam diversos modelos digitais de elevação disponíveis de forma gratuita, o modelo ASTER GDEM apresenta algumas vantagens no seu uso como a representação de quase toda a superfície terrestre, enquanto a maioria dos modelos obtidos por meio de radar, como o SRTM, apresenta um nível de cobertura da superfície em torno de 80%. Outro aspecto positivo na escolha do ASTER GDEM é a sua resolução espacial que permite a construção de um produto com 30 metros de resolução espacial de forma direta, sem a necessidade de

interpolação de dados. Também diferente do SRTM, no modelo ASTER-GDEM não existem os chamados “voids” (pixels com ausência de informações), pelo fato de estes produtos serem obtidos por processo estereoscópico (ABRAMS *et al.*, 1999). Porém, como as imagens ASTER são imagens óticas e não de radar há a desvantagem de poder haver algumas falhas de correlação causadas por coberturas de nuvens nas imagens de entrada (RODRIGUES *et al.*, 2010).

3.12 Modelagem topográfica

A modelagem topográfica apresenta muitas aplicações em estudos hidrológicos, geomorfológicos e também biológicos (MOORE *et al.*, 1991). Esta técnica é comumente utilizada em estudos hidrológicos para identificação de redes de drenagem e delimitação de bacias hidrográficas e modelagem hidrológica (BEVEN; MOORE, 1993), com resultados que podem ser inclusos em modelos ecológicos ou climáticos globais (BEVEN, 1995). A modelagem topográfica tem sido utilizada para análises diversas de terrenos objetivando a previsão de zonas de erosão e deposição de materiais decorrentes do escoamento superficial (MOORE *et al.*, 1988).

Outro aspecto que envolve técnicas de modelagem topográfica refere-se a estudos sobre uso da terra, cobertura vegetal e mapeamento da vegetação (FLEMING, 1988; ELMES *et al.*, 1991), além de uma grande utilização voltada para a agricultura de precisão (TOMER *et al.*, 1995). Em um estudo elaborado por Carvalho; Latrubesse (2004) com uso de modelagem topográfica com base em dados IFSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*), os autores obtiveram como resultados da modelagem topográfica uma série de dados a respeito da geomorfologia de sua área de estudo como, por exemplo, feições estruturais, identificação de geoformas, perfis longitudinais, rede de drenagem, declividade, hipsometria, perspectivas, entre outros. Os autores ainda concluem que em virtude da escala espacial a modelagem topográfica obtida por meio de modelos digitais de elevação é mais eficiente e precisa do que a obtida por meio de cartas topográficas.

As técnicas de modelagem topográfica possibilitam uma visão em macro escala do relevo o que permite a elaboração de uma série de produtos baseados nas diversas variáveis topográficas como declividade, altimetria, orientação de vertentes, entre outras, permitindo a análise e a interpretação de grandes áreas (CARVALHO; LATRUBESSE, 2004).

A declividade é uma variável topográfica que se baseia na proporção entre os desníveis e suas respectivas distâncias horizontais, podendo ser expressa em graus ou em porcentagem.

Para Evans (1980) a declividade é definida por um plano tangente a uma superfície de um determinado ponto e é especificado em termos da taxa máxima de alteração da altitude. Franklin (1987) relaciona a declividade com a direção de fluxo do escoamento superficial.

A estimativa da declividade pode ser elaborada tanto a partir de isolinhas, quanto por modelos digitais de elevação. A diferença entre os dois tipos de dados na forma em que o processamento será feito. No caso de isolinhas, em que os desníveis entre as curvas de nível são constantes (Δz , a equidistância vertical), a declividade é estimada através a medição das distâncias horizontais (D_h), que constituem o único elemento variável. Em contraposição, em um MDE as distâncias são constantes determinadas pela resolução espacial e pelas posições relativas da janela móvel, enquanto que os desníveis constituem o elemento variável (VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010). Nesse último caso, o usuário terá um produto com continuidade espacial.

A orientação de vertentes é uma variável topográfica que permite estimar a direção que as vertentes do terreno apontam. Fleming; Hoffer (1979) descrevem a orientação de vertentes como uma classificação da declividade em relação a sua orientação nas direções da bússola. Franklin (1987) define a orientação de vertentes como o componente direcional da inclinação, sendo conceituada como a direção dos declives.

Com relação a esta orientação ao longo do dia e no decorrer do ano (para o hemisfério sul), as vertentes voltadas para norte, nordeste e noroeste estão expostas a uma maior incidência direta de radiação solar e, conseqüentemente, são áreas com menor umidade natural. Já as áreas orientadas para o sul, sudeste e sudoeste recebem menor incidência de radiação solar e retêm ao longo do dia e do ano uma quantidade maior de umidade no solo e nos materiais não consolidados superficiais (VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010).

De acordo com Valeriano; Albuquerque (2010) a elaboração da orientação de vertentes por meio da utilização de isolinhas é definida pela direção transversal às curvas de nível e no sentido descendente, acompanhando o fluxo do escoamento superficial. Desta forma, o encadeamento das direções ao longo das vertentes é conhecido como linha de fluxo. Já nos modelos digitais de elevação os métodos praticados de estimativa da orientação por processamento destes modelos se fundamentam em operações trigonométricas sobre os componentes ortogonais da declividade.

3.13 Relevo sombreado

A topografia é um fator determinante das condições de incidência de radiação solar sobre a superfície terrestre (DUBAYAH; RICH, 1995). Neste sentido, para a análise das condições de iluminação e seus efeitos sobre determinada porção da superfície faz-se necessário o entendimento das características topográficas locais. Os fatores topográficos de iluminação calculados a partir de modelos digitais de elevação permitem a identificação de locais que, no momento da passagem do satélite, apresentam condições de iluminação idênticas, possibilitando classificar a superfície de acordo com as condições de iluminação apresentadas em um determinado momento (VALERIANO, 2006; CANAVESI *et al.*, 2010).

Os efeitos de sombreamento podem ser verificados por meio do relevo sombreado calculado a partir do cosseno do ângulo de incidência solar ($\cos i$) (DUBAYAH; RICH, 1995), sendo gerado a partir de um modelo digital de elevação com inserção de parâmetros referentes aos ângulos de elevação solar e azimuth de uma determinada data e horário. O relevo sombreado pode obtido por meio do cosseno do ângulo de incidência, de acordo com a Equação 5 (SELLERS, 1965):

$$\cos i = \cos\theta_s * \cos\theta_t + \sin\theta_s * \cos\theta_t * \cos(\varphi_s - \varphi_t) \quad (5)$$

Onde: θ_s é o ângulo zenital solar; θ_t é a declividade da imagem; φ_s é o azimuth solar; φ_t o ângulo azimuthal da imagem.

O cálculo do $\cos i$ tem-se a geração de um dado contínuo da superfície em escala de cinza, no qual os valores próximos a zero (tons escuros) indicam condições de baixa incidência de radiação solar direta ou sombreamento, enquanto que os valores próximos a 1,0 (tons de cinza claro) indicam superfícies nas quais a incidência da radiação solar ocorre de forma direta. Além de seu uso como classificador das condições de iluminação o $\cos i$ é utilizado como dado em modelos não-Lambertianos de correção topográfica como o modelo de Minnaert (MINNAERT, 1941) e a Correção-C (TEILLET *et al.*, 1982).

4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho, o Parque Estadual do Turvo, está localizada no município de Derrubadas, na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas 27°07' a 27°16' latitude sul e 53°48' a 54°04' longitude oeste (SEMA/RS, 2005) localizada junto ao rio Uruguai, perfazendo limites ao norte com o Estado de Santa Catarina (município de Itapiranga) e a província argentina de Misiones, a leste com o rio Parizinho e a oeste com o rio Turvo, ao sul o parque perfaz limites com propriedades rurais do município de Derrubadas (VASCONCELOS *et al.*, 1992) e com os rios Calixto e Bonifácio (SEMA/RS, 2005) como é ilustrado pela Figura 5.

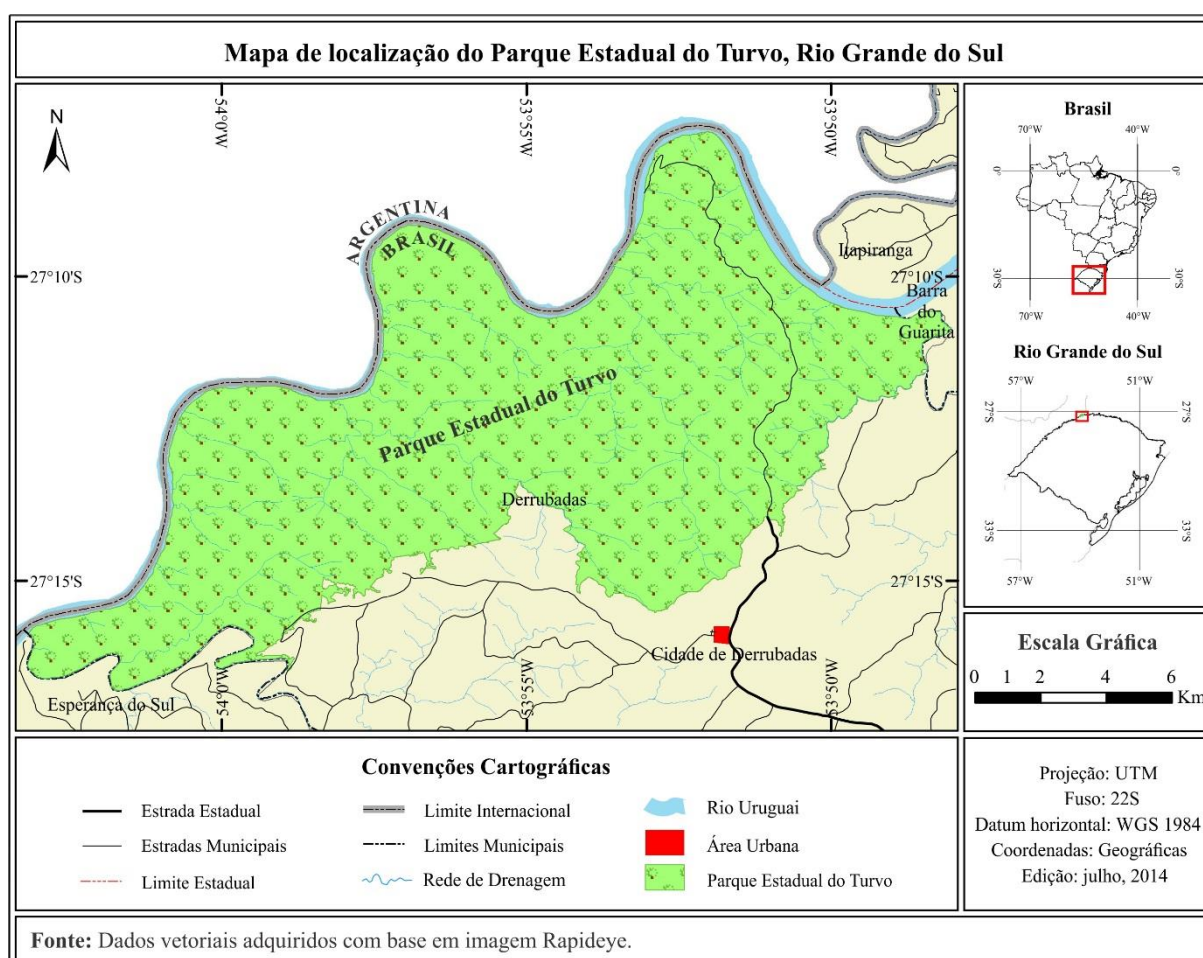


Figura 1 – Mapa de localização do Parque Estadual do Turvo.

4.1 Caracterização física da área de estudo

De acordo com SEMA/RS (2005) o Parque Estadual do Turvo está inserido na Região Hidrográfica do Uruguai, sendo drenado pelo rio Uruguai e seus afluentes da margem esquerda ao longo do limite norte da área do parque, os quais constituem quatro bacias hidrográficas distintas, sendo o rio Parizinho, o arroio Mairosa, o arroio Calixto e o rio Turvo. Além dos cursos d'água formadores das bacias hidrográficas existentes no parque, existem ainda formações de pequenas lagoas formadas pela acumulação da água da chuva sobre terrenos planos e elevados dos divisores de água.

No aspecto geomorfológico, o Parque Estadual do Turvo apresenta relevo modelado por dissecação fluvial, com presença de vales profundos, situados sobre derrames basálticos da Formação Serra Geral, tendo como característica a distinção de classes de solos nas distintas fases do relevo (GUADAGNIN, 1994). A área do Parque está inserida na Unidade Geomorfológica denominada Planalto de Santo Ângelo, integrante da Região Geomorfológica Planalto das Missões que pertence ao Domínio Morfoestrutural das Bacias e Coberturas Sedimentares. Regionalmente, apresenta os modelados de dissecação homogênea e diferencial e na área do Parque o modelado é de dissecação diferencial com forte controle estrutural e aprofundamento dos vales que variam de 55 a 140 metros (SEMA/RS, 2005).

Em relação ao clima, a área de estudo apresenta clima subtropical do tipo Cfa (classificação de Köppen) (GUADAGNIN, 1994), onde as temperaturas médias do mês mais quente (janeiro) são superiores a 22° C e no mês mais frio (julho) a temperatura oscila entre - 3° C a 18° C (SEMA/RS, 2005). A Figura 6 apresenta as médias de temperatura mensais para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2012, com dados da estação meteorológica de Iraí.

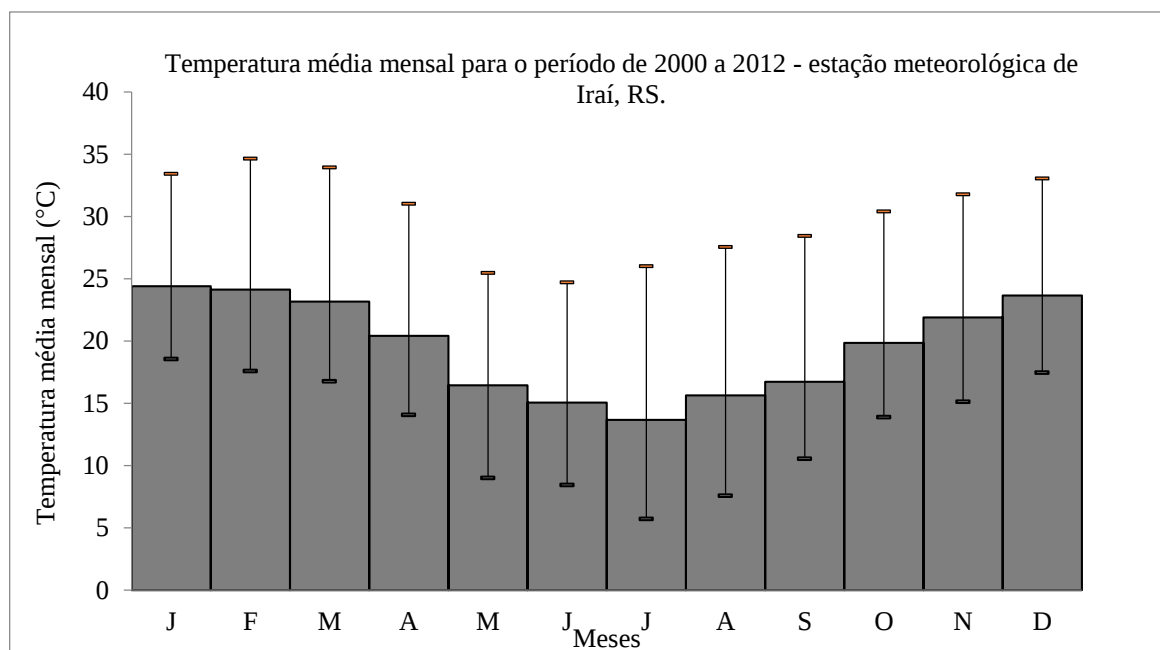


Figura 2 – Gráfico representativo das médias mensais de temperatura para o período de 2000 a 2012 para a área de estudo. Os valores médios mensais mínimos e máximos são indicados no gráfico.

Fonte: dados processados do INMET.

No aspecto de distribuição de chuvas estas ocorrem ao longo de todo o ano, embora ocorram meses com índices de precipitação mais elevados como abril, maio, junho e outubro com precipitações médias superiores a 165 mm (SEMA/RS,2005), e também meses nos quais as precipitações médias são significativamente inferiores como fevereiro, julho, agosto e dezembro, com médias de precipitação inferiores a 115 mm (SEMA/RS, 2005). Ao todo a área de estudo apresenta uma média anual pluviométrica de 1665 mm (SEMA/RS, 2005). Neste sentido, a Figura 7 apresenta as médias pluviométricas mensais para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2012, com dados da estação meteorológica de Iraí.

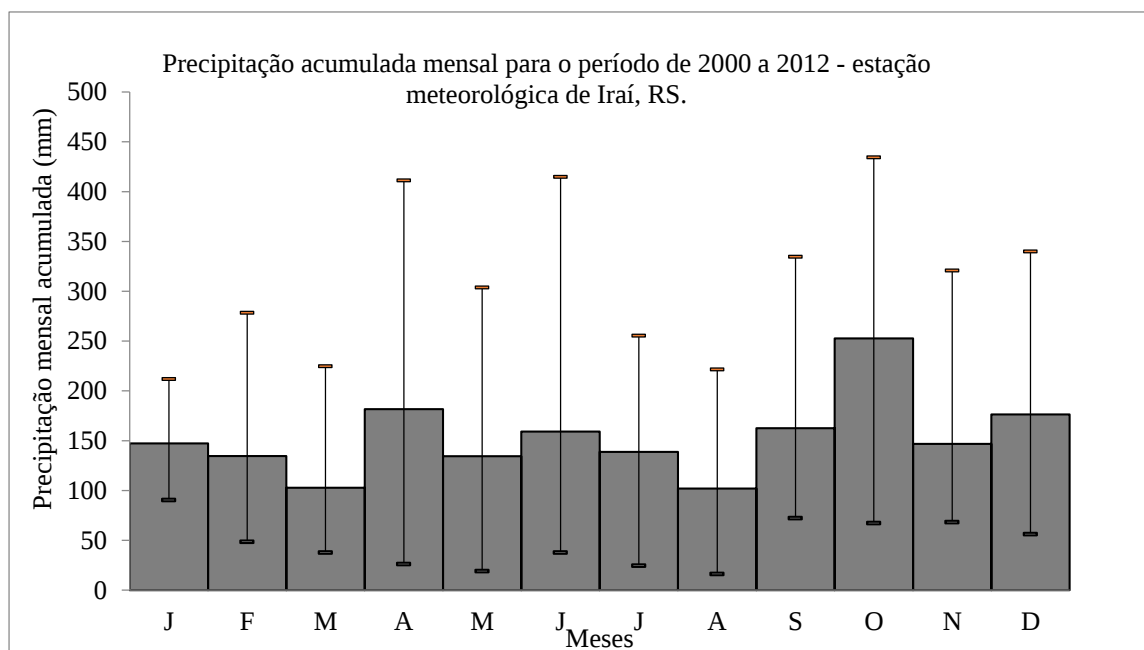


Figura 3 – Gráfico de acumulação mensal de chuvas para o período de 2000 a 2012 para a área de estudo. Os valores mínimos e máximos são indicados no gráfico.

Fonte: dados processados do INMET.

4.2 Caracterização florística, fauna e flora

De acordo com Klein (1972), a floresta existente no Parque Estadual do Turvo caracteriza-se principalmente por apresentar uma grande ocorrência de espécies exclusivas de floresta subtropical, número relativamente pequeno de espécies arbóreas altas e quase ausência de epífitas. Quanto à estrutura florística podem ser distinguidos três estratos arbóreos, um estrato arbustivo e um estrato herbáceo. No estrato arbóreo superior predominam exemplares em média de 20 metros de altura, alguns indivíduos, no entanto, podem chegar a 30 metros, embora estes exemplares não formem cobertura contínua (KLEIN, 1972). Esta porção do estrato é composta por exemplares como a grápia (*Apuleia leiocarpa* (Vogel) J. F. Macbr.), a canjerana (*Cabralea canjerana* (Vell.) Mart.), a canafístola (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.), o cedro (*Cedrella fissilis* Vellozo) e o louro (*Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. ex Steud.), a maioria destas espécies é decidual e acabam perdendo suas folhas no inverno.

O estrato arbóreo médio é constituído por exemplares com altura entre 10 a 20 metros, apresenta uma maior densidade de exemplares em comparação com o estrato arbóreo

superior, sendo a maioria das espécies perenifólias, tendo como exemplares o jerivá (*Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Glassman), a carne de vaca (*Styrax leprosus* Hook. & Arn.), o camboatá branco (*Matayba elaeagnoides* Radlk.) e canela de diversos gêneros como *Calyptantes*, *Plinia* e *Eugenia*.

Quanto ao estrato arbóreo do sub-bosque, este apresenta uma grande densidade de exemplares, sendo constituído por espécies de pequeno porte e arbustos, apresentando também cipós, bambus, trepadeiras e epífitas. Neste estrato, existe a ocorrência significativa de exemplares como o cincho (*Sorocea bonplandii* (Baill) W. C. Burger), urtigão (*Urera baccifera* (L.) Gaudich. Ex. Wedd.), ingá (*Inga marginata* Willd.) e laranjeira do mato (*Gymnanthes concolor* Spreng.).

Na área do parque também podem ser encontradas formações de banhados, vassourais e matas secundárias com alturas de até 10m, pequenas extensões de campos rupestres sobre afloramentos de basalto e vegetação reófila em trechos do rio Uruguai (DIAS *et al.*, 1992).

O parque, no aspecto de área de preservação, constitui-se como habitat para um elevado número de espécies, muitas destas ameaçadas de extinção e existentes apenas no parque no Rio Grande do Sul. De acordo com a SEMA/RS (2005) nos levantamentos realizados no PET foram identificadas mais de 700 espécies vegetais, aproximadamente 290 espécies de aves, mais de 30 espécies de mamíferos de médio e grande porte, na qual se destacam as espécies ameaçadas de extinção como o *Puma concolor* e o *Leopardus pardalis* (Kasper *et al.*, 2007). Além disto, são encontradas no parque diversas espécies endêmicas do bioma Mata Atlântica, que apresenta uma grande variedade de exemplares de anfíbios como a rã-das-pedras (*Limnomedusa macroglossa*) e o sapo-marteleiro (*Hyla faber*).

Também são encontradas diversas espécies de reptéis representados por exemplares de serpentes encontradas também em outras porções da Mata Atlântica, como a jararaca (*Bothrops jararaca*), a cobra-de-capim (*Liophis aff. poecilogyrus*) e a falsa-cotiara (*Xenodon neuwiedii*). Além dos exemplares comuns ao bioma, existe um exemplar de serpente, a jararacuçu (*Bothrops jararacussu*), que é encontrada apenas nos limites do parque no Rio Grande do Sul (SEMA/RS, 2005).

4.3 Importância do Parque Estadual do Turvo

O Parque Estadual do Turvo configura-se como uma área de preservação, na qual caracteriza-se como um dos últimos remanescentes conservados da floresta subtropical

decídua (IRGANG, 1980). Esta área representa o maior fragmento deste tipo de floresta no Estado do Rio Grande do Sul, possuindo relevância também nacional, no aspecto de ser uma significativa amostra da Floresta Estacional Decidual (IBGE, 1986).

No contexto científico, o Parque Estadual do Turvo possui grande importância para a realização de trabalhos que buscam compreender a dinâmica deste tipo de floresta. No âmbito dos estudos florestais o parque desempenha um papel importante tanto no que diz respeito à presença de espécies arbóreas que ocorrem somente neste tipo de floresta como também a sua extensão com cobertura florestal, fator que permite o desenvolvimento de estudos com o uso de técnicas de sensoriamento remoto.

5 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi desenvolvida seguindo uma série de etapas ilustradas no fluxograma da Figura 8, as quais contemplaram a caracterização estrutural e florística da área de estudo, a aquisição e pré-processamento dos dados de sensoriamento remoto, a análise das variações sazonais dos índices de vegetação do sensor MODIS, a modelagem topográfica do PET, análise das variações da reflectância e dos índices de vegetação elaborados a partir das cenas Rapideye e a análise integrada dos resultados.

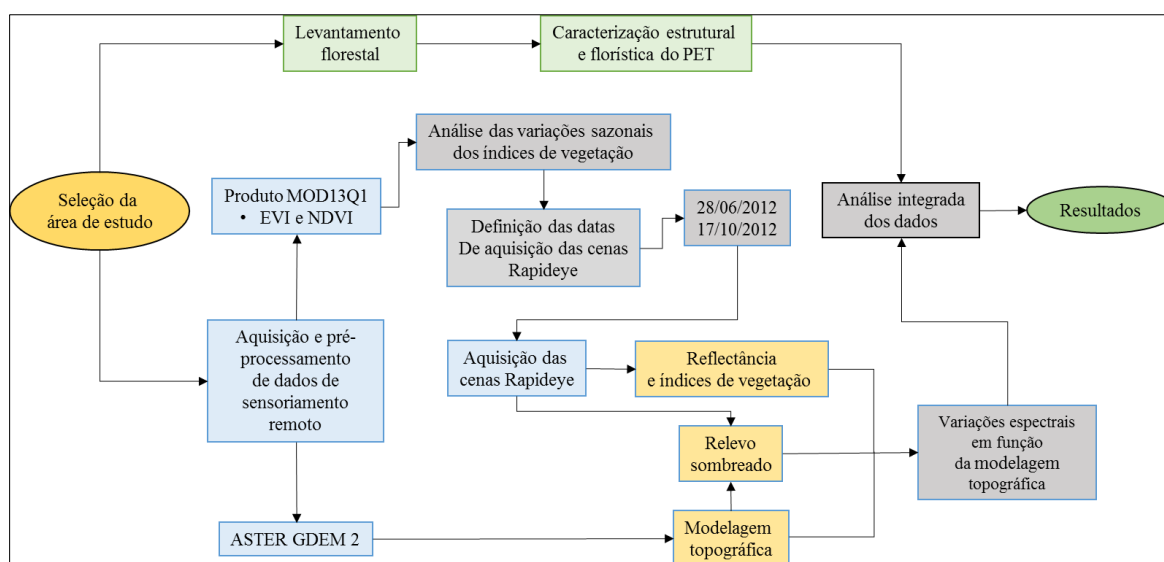


Figura 1 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos do desenvolvimento do estudo.

5.1 Caracterização estrutural e florística da área de estudo

A caracterização estrutural e florística da área de estudo foi realizada com o objetivo de se obter dados *in loco* referentes a arquitetura do dossel vegetativo e o índice de área foliar, sendo analisados os tipos de exemplares que compõem o dossel por meio de um breve inventário florestal das espécies dominantes. O trabalho de campo foi realizado entre os dias 11 e 14 de setembro de 2013 realizando-se o levantamento dos exemplares contidos em sete parcelas distribuídas ao longo de uma estrada que corta o parque (Figura 9), cada parcela possui as

dimensões de 100 metros de comprimento por 20 metros de largura, sendo subdivididas em 20 subparcelas de 10 metros de comprimento por 10 metros de largura como ilustrado na Figura 10.



Figura 2 – Mapa de localização das parcelas utilizadas no levantamento florestal do Parque Estadual do Turvo.

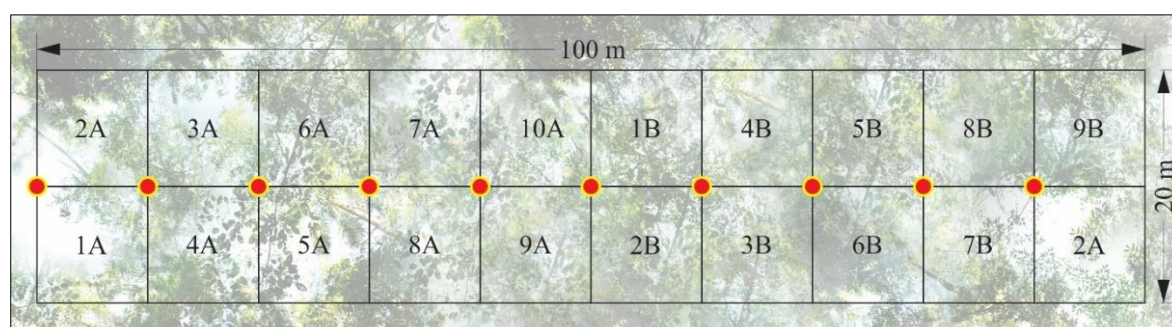


Figura 3 – Croqui demonstrativo de uma parcela de inventário florestal do trabalho de campo.

Para o inventário das espécies dominantes foi estabelecido à amostragem de exemplares com diâmetro na altura do peito (DAP) maior que 10 centímetros objetivando contemplar apenas espécies que fazem parte do dossel, sendo coletadas destas as seguintes informações: espécie, diâmetro na altura do peito, altura total, condições da copa e fuste, e a posição de cada árvore

dentro das subparcelas. Os dados obtidos por meio do levantamento foram organizados em planilhas contendo as características dos exemplares para análise da arquitetura do dossel servindo de auxílio para a interpretação das informações obtidas por meio das cenas Rapideye e dos índices de vegetação. Os dados coletados por meio do inventário das espécies dominantes permitiram a elaboração de um perfil simplificado da caracterização estrutural e florística do dossel vegetativo.

De forma complementar foram adquiridas fotografias hemisféricas nas parcelas para o cálculo do índice de área foliar – IAF (vide Figura 10), ao longo das sete parcelas distribuídas no PET. O IAF foi calculado utilizando o aplicativo Hemiview (DELTA-T DEVICES, 1998).

5.2 Aquisição e pré-processamento dos dados de sensoriamento remoto

5.2.1 Dados do sensor MODIS

Para a identificação das características sazonais da vegetação foram adquiridas duas séries temporais de 2000 (início da operação da plataforma *Terra*) a 2012 dos índices NDVI e EVI do produto MOD13Q1 (*Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m*). Estas séries temporais foram adquiridas por meio de *download* na página do *Land Process Distributed Active Archive Center* (LPDAAC-NASA), disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool>. Os dados do produto MOD13 foram reprocessados utilizando o algoritmo *MODIS Reprojection Tools* (MRT) (DWYER; SCHMIDT, 2006), de forma a converter os dados para coordenadas planares (UTM, WGS 84). Na sequência os dados foram ordenados temporalmente e processados no aplicativo ENVI-IDL (EXELIS, 2013).

A partir do produto MOD13Q1, os índices de vegetação EVI e NDVI foram avaliados por meio da média do valor de cada índice obtido para toda a área do parque (por data). Esses dados foram processados em um pacote estatístico, no qual foram elaborados dois gráficos contendo os valores médios mensais acumulados das séries temporais para cada mês do ano para os dois índices avaliados. Em relação aos produtos de qualidade, não foi realizada nenhuma filtragem *a priori*, com exceção da análise do desvio padrão.

5.2.2 Dados da constelação RapidEye

Os dados da constelação RapidEye foram adquiridos para as datas de 28 de junho de 2012 (data com maior dependência de sombreamento) e 17 de outubro de 2012 (menor dependência de sombreamento em relação a data anterior). A variação do sombreamento se deve a mudanças do ângulo zenital de iluminação ocorridas ao longo do ano. Os dados foram adquiridos sob ângulos de visada próximos ao nadir (3° e $-8,45^\circ$, respectivamente). Cabendo destacar que no período entre as duas datas ocorreu uma grande variação do ângulo de iluminação solar, o que juntamente com a disponibilidade dos dados justificou a escolha destas datas de imagens para o estudo.

As cenas RapidEye foram adquiridas de forma pré-processadas em nível 3A (*RapidEye Ortho Product – Radiometric, sensor and geometric corrections applied to the data*) com correções geométrica e ortorectificação. Nestas imagens, os erros de correção geométrica variam entre 6 a 32 metros conforme a precisão do modelo digital de elevação utilizado no processo de ortorectificação (SRTM, ou um modelo fornecido pelo usuário).

Em virtude dos efeitos da variação de iluminação influenciarem diretamente na reflectância dos alvos fez-se necessário a conversão dos números digitais dos pixels de cada banda das cenas Rapideye em valores de reflectância de superfície. Para obtenção dos valores de reflectância de superfície fez-se necessária a correção atmosférica das imagens RapidEye com utilização do modelo FLAASH presente no aplicativo ENVI 5.0 (EXCELIS, 2014). Para a correção atmosférica foram adotados os parâmetros da aquisição do Rapideye, coordenadas centrais do PET, visibilidade de 50 km, modelo de aerossol rural e continental.

A partir da reflectância das cenas Rapideye foram elaborados quatro índices de vegetação, sendo o NDVI e o EVI, mais dois índices com uso da banda da borda do vermelho: o RENDVI e o CIred-edge. Para a elaboração destes índices foram utilizadas as bandas do azul, vermelho, borda do vermelho e infravermelho próximo, sendo os índices de vegetação calculados para as duas datas avaliadas por meio das Equações 1 (NDVI), 2 (EVI), 3 (RENDVI) e 4 (CIred-edge).

5.2.3 Modelo digital de elevação ASTER GDEM 2

O modelo digital de elevação ASTER GDEM 2 foi adquirido a partir do repositório do *Earth Remote Sensing Data Analysis Center* (ERSDAC) disponível no endereço: <www.gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp>. Após a aquisição das cenas que recobrem a área do PET foi elaborado um mosaico destas, não sendo realizados pré-processamentos em relação a transformação dos valores dos pixels. Na sequência, o mosaico elaborado foi recortado de acordo com a área das duas cenas Rapideye por meio da ferramenta *Masking* do aplicativo ENVI 5.0.

5.3 Variações sazonais dos índices de vegetação do sensor MODIS

As séries temporais dos índices de vegetação do sensor MODIS foram utilizadas para a análise do comportamento sazonal da vegetação no decorrer das estações do ano e ao longo das mudanças do ângulo solar. O critério utilizado para a seleção das cenas do produto MOD13Q1 levou em consideração as séries temporais de dados com informações disponíveis para todos os meses do ano, sendo adquiridas duas séries temporais para o período entre 2000 e 2012. Desta forma, as respostas dos índices de vegetação foram verificadas nos períodos de inverno e verão da série temporal, devido estes períodos permitirem a análise da resposta da vegetação em função das variações do ângulo solar que influenciam no maior ou menor sombreamento da vegetação. Outro fator analisado foi à comparação dos índices de área foliar do sensor MODIS e do realizado em campo, verificando-se a correlação destes e ainda as possíveis variações deste índice ao longo da série temporal.

Os dados do sensor MODIS foram agrupados por meio de duas séries temporais, sendo que uma contendo os dados do índice EVI e outra os dados do índice NDVI. Após a importação destes dados para o ambiente do aplicativo ENVI 5.0 foram destacados apenas os pixels contidos no interior da área do parque utilizando-se para isto uma região de interesse (*Region of Interest* – ROI) definida a 500 metros do limite do parque em direção ao seu interior, com o objetivo de reduzir a contaminação dos valores dos pixels pelas áreas ao redor do parque que apresentam extensivo uso agrícola ou corpos hídricos como os rios que delimitam o PET. Os dados que foram obtidos nesta etapa compreendem as médias dos valores dos índices de vegetação EVI e NDVI para a área de estudo.

Com as médias dos valores dos índices de vegetação obtidos foram criados dois gráficos contendo as variações sazonais dos produtos MODIS para a série temporal definida (item 6.2.1). As etapas desenvolvidas neste item serviram para identificar o período de maior e menor resposta da vegetação. Estes períodos serviram para orientar a escolha das datas para a aquisição das imagens RapidEye.

5.4 Modelagem topográfica

Por meio do modelo digital de elevação ASTER-GDEM versão 2 foram gerados os dados referentes à declividade, orientação de vertentes e altimetria. Estes dados foram utilizados para avaliação da reflectância e índices de vegetação em vertentes com orientação no sentido da iluminação solar (maior disponibilidade de radiação), de vertentes com orientação contrária a da iluminação solar (menor disponibilidade de radiação) e áreas de topos planos (onde se espera uma disponibilidade mediana de radiação).

Para cada variável topográfica foram gerados dados contínuos em escala de cinza contendo as informações para cada parâmetro topográfico. A partir destes dados foi realizado o processo de classificação de acordo com as características de cada parâmetro topográfico por meio da ferramenta *Density Slice* do aplicativo ENVI 5.0. Desta forma, a orientação de vertentes foi classificada de acordo com as seguintes classes: Norte ($0^\circ - 22,5^\circ$; $337,5^\circ - 360^\circ$), Nordeste ($22,5^\circ - 67,5^\circ$), Leste ($67,5^\circ - 112,5^\circ$), Sudeste ($112,5^\circ - 157,5^\circ$), Sul ($157,5^\circ - 202,5^\circ$), Sudoeste ($202,5^\circ - 247,5^\circ$), Oeste ($247,5^\circ - 292,5^\circ$) e Noroeste ($292,5^\circ - 337,5^\circ$). A classificação da variável topográfica declividade foi elaborada seguindo a classificação baseada nas definições de Granell-Pérez (2001), na qual foram utilizadas sete classes: $0^\circ - 2^\circ$, $2^\circ - 5^\circ$, $5^\circ - 15^\circ$, $15^\circ - 25^\circ$, $25^\circ - 35^\circ$, $35^\circ - 45^\circ$ e $> 45^\circ$. A altimetria do PET foi classificada de acordo com as seguintes classes: 120 m – 160 m, 160 m – 200 m, 200 m – 240 m, 240 m – 280 m, 280 m – 320 m, 320 m – 360 m, 360 m – 400 m, 400 m – 440 m e 440 m – 480 m.

Após a elaboração da modelagem topográfica foi calculado o cosseno do ângulo de incidência – o relevo sombreado – para as duas datas correspondentes as cenas RapidEye por meio da Equação 5. Para a elaboração do relevo sombreado foram utilizados os ângulos de elevação e azimuth solar do momento da aquisição de cada cena RapidEye (em decorrência do uso das imagens RapidEye para a análise da influência do sombreamento foram utilizados os parâmetros de geometria de iluminação correspondente a cada cena RapidEye). Devido à

necessidade de um mosaico de duas imagens RapidEye para o recobrimento da área de estudo foram escolhidas as duas imagens 2226503 correspondentes as datas de 28 de junho e 17 de outubro de 2012 por compreender a área em que foi realizado o trabalho de campo. Para a cena de 28 de junho de 2012 foram obtidas as seguintes informações: o ângulo azimutal solar de $16,3677^\circ$ e o ângulo de elevação solar de $37,9291^\circ$, enquanto que para a cena de 17 de outubro de 2012 o ângulo azimutal solar de $22,3126^\circ$ e o ângulo de elevação solar de $71,2537^\circ$.

O relevo sombreado foi elaborado no aplicativo ENVI 5.0. No módulo *Topographic modeling* destinado à análise topográfica, o relevo sombreado foi calculado a partir do modelo ASTER GDEM 2 com a inserção dos parâmetros de elevação solar e azimute na ferramenta *Topo model parameters – shaded relief*. Após este processo foi gerada uma imagem em escala de cinza contendo uma variação de valores entre 0 e 1, na qual os valores próximos a zero indicam condições de sombreamento, enquanto que valores próximos a 1 são indicativos de áreas iluminadas. Este processo foi realizado para cada uma das datas das cenas RapidEye. Cada imagem gerada foi posteriormente classificada por meio da ferramenta *Density Slice*.

Com a elaboração do relevo sombreado, as áreas do PET foram classificadas de acordo com três condições de iluminação do relevo: iluminado, intermediário e sombreado. Sendo a condição de relevo iluminado representativa das áreas que apresentam incidência direta de radiação solar, a condição intermediária de iluminação compreende as áreas dispostas entre as áreas iluminadas e sombreadas compostas principalmente por áreas onde não ocorre a incidência de radiação solar de forma direta, mas que não apresentam sombreamento significativo ou apresentam relevo plano, enquanto que a condição de relevo sombreado abrange as áreas em que não ocorre incidência de radiação solar por apresentarem orientação contrária a geometria de iluminação. As três classes de iluminação foram definidas com base no fatiamento de valores dos produtos gerados por meio de um ajuste por histograma, sendo definidas as seguintes classes: iluminado (0,87 – 1), intermediário (0,78 – 0,87) e sombreado (0 – 0,78).

Devido algumas classes de parâmetros topográficos apresentarem um número muito grande de pixels e pretendendo-se evitar áreas com contaminação nos valores causados pelas bordas de classes diferentes fez-se necessária a realização de amostragem, na qual foram amostrados 1000 pixels para cada classe das variáveis topográficas. A partir dos valores amostrados foram calculadas as estatísticas descritivas em função das variáveis topográficas permitindo verificar o comportamento das bandas RapidEye e dos índices de vegetação elaborados em função de cada classe dos parâmetros topográficos.

5.5 Variações da reflectância e dos índices de vegetação do sensor RapidEye

A modelagem topográfica permitiu a classificação do PET em diversas áreas de acordo com as suas características topográficas apresentando cada uma, características próprias de iluminação resultantes da soma de fatores condicionantes da geometria de iluminação e do efeito topográfico gerado por cada feição do relevo.

Cada classe foi transformada em regiões de interesse (ROI) com uso do aplicativo ENVI 5.0. Por meio dos ROIs gerados foram obtidos os valores de reflectância de cada banda das duas cenas Rapideye e dos índices de vegetação elaborados para cada classe de cada variável topográfica.

Visando minimizar efeitos da influência de áreas de borda e devido à grande variação de tamanho das classes realizou-se a amostragem de 1000 pixels de cada classe de cada variável topográfica. Destes foram extraídos os valores médios amostrais por meio da média dos pixels amostrados para cada classe, sendo estes valores organizados em gráficos.

A partir dos gráficos dos valores médios amostrados de cada classe de interesse foram realizadas avaliações quantitativas (estatísticas) e qualitativas (baseadas nas análises gráficas) para avaliar o efeito das condições de iluminação sobre os dados espectrais e índices de vegetação. Uma atenção especial foi dada aos índices de vegetação da borda do vermelho, considerando que a presença dessa faixa espectral é inovadora em sensores multiespectrais de média e alta resolução espacial.

5.6 Análise integrada dos resultados

A análise integrada dos resultados foi desenvolvida a partir dos dados obtidos por meio da caracterização estrutural e florística do PET e dos resultados da análise das variações espectrais em função da modelagem topográfica, sendo elaborada uma relação de forma qualitativa entre os resultados obtidos, na qual foram analisados as características topográficas apresentadas em cada parcela e suas características espectrais apresentadas buscando um melhor entendimento dos dados obtidos por meio de sensoriamento remoto.

6 RESULTADOS

6.1 Análise dos dados do inventário florestal

O levantamento florestal realizado no PET, em sete parcelas distribuídas no entorno da estrada para o Salto do Yucumã (PET) permitiu verificar quais são e a espacialização das espécies arbóreas que compõem o dossel vegetativo. Permitindo ainda avaliar se as características do relevo apresentavam alguma influência sobre a distribuição das espécies.

Com o levantamento de espécies realizado foram obtidos resultados semelhantes aos encontrados em estudos anteriores realizados sobre as características da vegetação do PET (RUSCHEL *et al.*, 2005; RUSCHEL *et al.*, 2007; BREUNIG *et al.*, 2015). Em campo foram verificados a existência de estratificações e descontinuidades no dossel vegetativo contidas nas parcelas amostradas. Sobre estas características, Klein (1972) descreve a ocorrência de uma segmentação do dossel vegetativo do PET em três estratos arbóreos e também um estrato arbustivo e outro herbáceo. De acordo com o levantamento florestal realizado pela SEMA/RS (2005) os três estratos arbóreos diagnosticados consistem em: um estrato emergente ou dominante, com exemplares cuja altura pode superar os 30 metros, um estrato superior, com espécies que atingem alturas entre 20 e 25 metros, e um estrato de arvoretas, com exemplares de até 15 metros de altura.

O estrato emergente ou dominante não constitui uma cobertura contínua, sendo constituído em sua maior parte por árvores emergentes e com características decíduais ou semidecíduais. Enquanto que o estrato superior é denso e contínuo e o estrato das arvoretas apresenta espécies com ocorrência generalizada (SEMA/RS, 2005).

No levantamento florestal realizado, de todas as espécies verificadas nas sete parcelas, a grande maioria pertencia ao estrato de arvoretas, o que compreende 77,13% das espécies, enquanto 21,26% das espécies pertenciam ao estrato superior e apenas 1,61% pertencia ao estrato dominante. Os estratos de arvoretas e superior foram verificados em todas as sete parcelas, enquanto que espécies com maior altura características do estrato dominante foram verificadas em apenas 3 parcelas, sendo estas 1, 3 e 7 (Figura 8).

Analisando a quantidade de exemplares por parcela foi possível verificar que não houve relação entre as características topográficas com a distribuição da quantidade de espécies, embora seja destacado que a parcela 7 apresentou uma maior quantidade de

exemplares distribuídos entre os três estratos em relação as outras parcelas, sendo que 20,61% dos exemplares verificados estão localizados nesta parcela. Esta parcela foi a que apresentou as características mais distintas entre as demais parcelas apresentando a menor elevação (entre 200 e 240 metros, a maior declividade (entre 25° e 35°) e orientada na direção noroeste, como apresentado no Quadro 2, sendo a parcela mais próxima ao Rio Uruguai.

Variáveis topográficas	Parcela 01	Parcela 02	Parcela 03	Parcela 04	Parcela 05	Parcela 06	Parcela 07
Altimetria	400 - 440	440 - 480	400 - 440	320 - 360	280 - 320	280 - 320	200 - 240
Declividade	5° - 15°	5° - 15°	5° - 15°	5° - 15°	2° - 5°	15° - 25°	25° - 35°
Orientação	Norte	Sudoeste	Noroeste	Oeste	Oeste	Sul	Noroeste

Quadro 1 – Características topográficas apresentadas pelas parcelas utilizadas no levantamento florestal do Parque Estadual do Turvo.

Embora esta parcela apresente característica de distribuição de espécies dominantes distinta das demais, com grande ocorrência de exemplares de grande porte, os dados obtidos no levantamento não permitiram avaliar se esta ocorrência está presente em todas as áreas com características topográficas semelhantes ou quais os condicionantes desta característica de distribuição de espécies.

Quanto aos exemplares verificados no levantamento florestal foram identificadas mais de 62 espécies dominantes distribuídas nos três estratos arbóreos que compõe o dossel vegetativo da Floresta Subtropical Decídua. O estrato de arvoretas foi o que mais apresentou exemplares, entre os quais se destacam: Açoita-Cavalo (*Luehea divaricata* Mart. & Zucc.), Aguaí-da-Serra (*Chrysophyllum gonocarpum* (Mart. & Eichler ex Miq.) Engl.), Aguaí-Leiteiro, (*Chrysophyllum marginatum* (Hook. & Arn.) Radlk.), Branquilha (*Sebastiania commersoniana* (Baill.) L.B. Sm. & Downs), Camboatá-Branco (*Matayba elaeagnoides* Radlk.), Camboatá-Vermelho (*Cupania vernalis* Cambess.), Canela-Amarela (*Nectandra lanceolata* Nees), Canela-Preta (*Nectandra megapotamica* (Spreng.) Mez), Canjerana (*Cabralea canjerana* (Vell.) Mart.), Catingá (*Trichilia claussenii* D. DC.), Chal-Chal (*Allophylus edulis* (St. Hil.) Radlk.), Cincho (*Sorocea bonplandii* (Baill) W. C. Burger), Embirão (*Tetrorchidium rubrivenium* Poepp. & Endl.), Farinha-Seca (*Lonchocarpus muehlbergianus* Hassl.), Guabiroba (*Campomanesia xanthocarpa* O. Berg), Guamirim (*Calyptanthus triconus* D.Legrand), Ingá (*Inga marginata* Willd.), Louro-Mole (*Cordia*

ecalyculata Vell.) e Tanheiro (*Alchornea triplinervia* (Spreng.) M. Arg.). No estrato superior que compreende as sete parcelas foram encontrados os seguintes exemplares: Aguaí-da-Serra (*Chrysophyllum gonocarpum* (Mart. & Eichler ex Miq.) Engl.), Angico-Branco (*Albizia edwallii* (Hoehne) Barneby & J.Grimes), Camboatá-Vermelho (*Cupania vernalis* Cambess.), Canafístula (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.), Canela-de-Veadó (*Helietta apiculata* Benth.), Canela-Preta (*Nectandra megapotamica* (Spreng.) Mez), Canjerana (*Cabralea canjerana* (Vell.) Mart.), Cedro (*Cedrella fissilis* Vellozo), Coqueiro (*Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Glassman), Farinha-Seca (*Lonchocarpus muehlbergianus* Hassl.), Grápia (*Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F.Macbr.), Guatambú (*Balfourodendron riedelianum* Engler), Louro (*Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. ex Steud.), Tajuva (*Maclura tinctoria* (L.) Don ex Steud.).

O estrato dominante foi o que apresentou menor ocorrência de exemplares, sendo que das sete parcelas, apenas as parcelas 1, 3 e 7 apresentaram exemplares arbóreos classificados como pertencentes ao estrato emergente ou dominante. Quanto aos exemplares arbóreos foram identificados o Angico Branco (*Albizia edwallii* (Hoehne) Barneby & J.Grimes), o Angico Vermelho (*Parapiptadenia rígida* (Benth.) Brenan), a Farinha Seca (*Lonchocarpus muehlbergianus* Hassl.), o Guatambu (*Balfourodendron riedelianum* Engler), o Louro (*Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. ex Steud.), a Maria Preta (*Diatenopteryx sorbifolia* Radlkofer) e a Timbaúva (*Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong).

6.2 Análise dos dados de sensoriamento remoto

6.2.1 Dados do sensor MODIS

As séries temporais dos índices de vegetação do sensor MODIS permitiram identificar a dinâmica sazonal da floresta subtropical decídua para o período entre 2000 e 2012. Desta forma, a análise dos dados mostrou a ocorrência de mudanças no comportamento espectral da vegetação que ocorrem em função das variações fenológicas que a floresta apresenta em relação as estações do ano, sendo verificadas duas condições distintas,, sendo a primeira um cenário de grande atividade fenológica da vegetação verificado em períodos de maior temperatura (primavera e verão) e a segunda condição apresenta um decréscimo significativo

da atividade fenológica da vegetação verificado pelo o decréscimo acentuado dos índices de vegetação, estando associado ao período de menores temperaturas (outono e inverno).

Os dados obtidos por meio do produto MOD13Q1 foram organizados em um gráfico contendo os valores mensais acumulados dos índices de vegetação NDVI e EVI para o período entre 2000 e 2012, conforme as Figuras 11a e 11b. O NDVI apresentou cenários distintos para a floresta subtropical decídua ao longo das estações do ano. Nos meses de janeiro e fevereiro, período de verão e máximo desenvolvimento fenológico da vegetação foram verificados valores de NDVI muito próximos a 0,90, devido ao período de grande atividade fenológica da vegetação (relacionado a maiores valores de índice de área foliar – IAF), no qual o dossel vegetativo encontra-se denso, sem consideráveis interferências do substrato (BREUNIG *et al.*, 2015).

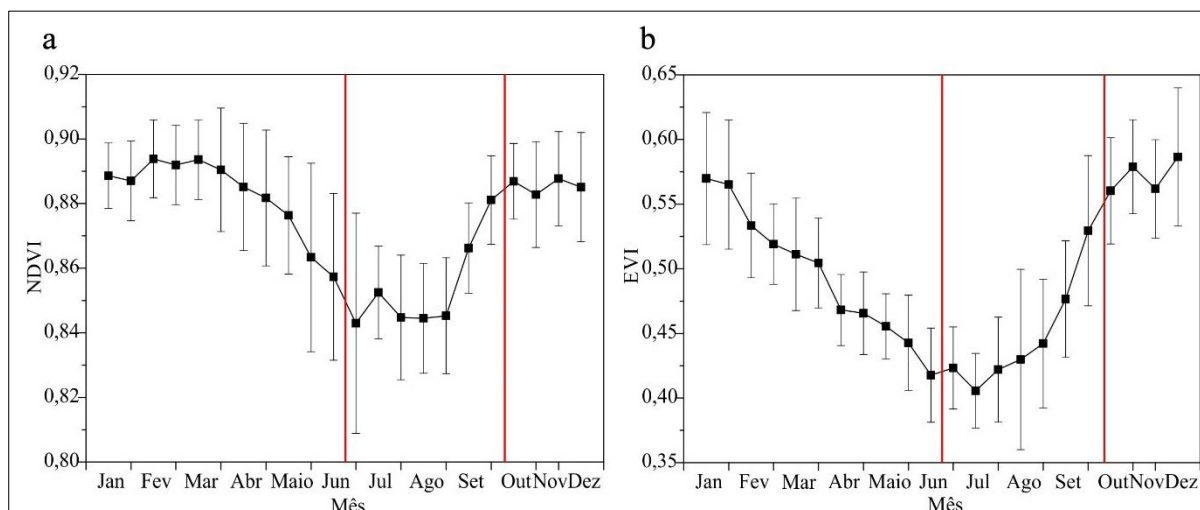


Figura 1 – Médias mensais acumuladas para as séries temporais dos índices NDVI (a) e EVI/MODIS (b) de 2000 a 2012. As linhas vermelhas indicam as datas escolhidas para a aquisição das cenas RapidEye.

Um acréscimo nos valores do NDVI, nos meses de fevereiro e março foi identificado em decorrência da resposta da vegetação ao período do verão, o que tornou os valores do índice de vegetação mais elevados no fim deste período. No entanto, a partir do mês de março identificou-se um decréscimo nos valores de NDVI em decorrência da estação de outono, que apresenta temperaturas mais baixas e menor fotoperíodo em relação ao verão, o que interfere na produção de clorofilas.

No outono, em decorrência da redução da atividade fenológica e da produção de clorofilas, muitas espécies presentes no PET (como por exemplo a Grápia) apresentam

coloração avermelhada ou queda de folhas e consequentemente levando a uma redução da densidade do dossel vegetativo (redução do IAF). Desta forma, com os dados expressos no gráfico identificou-se nos meses frios, uma mudança significativa na resposta do índice NDVI, o qual apresentou uma redução nos valores acumulados médios indicando uma queda na produção de pigmentos interferindo diretamente no desenvolvimento fenológico que tende a ser reduzido neste período. Os menores valores foram identificados durante os meses de inverno e no início da primavera ocorreu uma retomada do verdejamento (brotamento).

Os dados acumulados do índice EVI do produto MOD13 para o período entre 2000 e 2012 (Figura 11b) permitiram identificar uma maior variação dos valores em decorrência deste índice apresentar uma significativa ligação com a atividade fotossintética da vegetação e menor correspondência às estruturas foliares. Neste sentido, no EVI foi identificada uma redução nos valores a partir do mês de janeiro em decorrência do declínio da produção de clorofila com o fim do período de desenvolvimento de novas folhas, ficando mais acentuado do fim do mês de março até o mês de junho durante o outono e inverno quando houve uma significativa redução da atividade fotossintética da maioria das espécies presentes no PET.

Nos meses de inverno, os valores de EVI permaneceram baixos, próximos a 0,4, em decorrência da reduzida produção de clorofilas pelos exemplares devido ao aspecto de senescência sazonal causada pela baixa temperatura e menor intensidade de luz que diminui a taxa fotossintética. Na primavera, período de retomada da atividade fotossintética e de aumento do período fotossintético diário, os valores do índice EVI elevaram-se de acordo com a produção fotossintética das espécies.

Os dados acumulados do índice EVI do produto MOD13 para o período entre 2000 e 2012 (Figura 11b) permitiram identificar uma maior variação dos valores em decorrência deste índice apresentar uma significativa ligação com a atividade fotossintética da vegetação e menor correspondência às estruturas foliares. Neste sentido, no EVI foi identificada uma redução nos valores a partir do mês de janeiro em decorrência do declínio da produção de clorofila com o fim do período de desenvolvimento de novas folhas, ficando mais acentuado do fim do mês de março até o mês de junho durante o outono e inverno quando houve uma significativa redução da atividade fotossintética da maioria das espécies presentes no PET.

Nos meses de inverno, os valores de EVI permaneceram baixos, próximos a 0,4, em decorrência da reduzida produção de clorofilas pelos exemplares devido ao aspecto de senescência sazonal causada pela baixa temperatura e menor intensidade de luz que diminui a taxa fotossintética. Na primavera, período de retomada da atividade fotossintética e de

aumento do período fotossintético diário, os valores do índice EVI elevaram-se de acordo com a produção fotossintética das espécies.

A amplitude entre os valores máximos e mínimos acumulados mostrou que as medidas do índice NDVI apresentaram uma variação de 5,09%, na qual o valor máximo encontrado foi de 0,8939 para a média acumulada do mês de fevereiro, enquanto que o valor mínimo foi de 0,8430, encontrado nos valores médios acumulados do mês de junho. Por outro lado, a amplitude das medidas acumuladas de EVI foi de 18,09%, sendo o valor acumulado médio máximo deste índice de 0,5865 no mês de dezembro e o mínimo de 0,4056 registrado no mês de julho.

Em síntese, foi verificado que o NDVI apresenta maior correspondência com as estações do ano, refletindo as variações de temperatura, enquanto que o EVI apresenta maior sensibilidade a modificações do dossel florestal.

Analizando o gráfico dos valores acumulados de NDVI (Figura 11a) foi possível identificar um acréscimo de 4,39% em relação as duas datas escolhidas para aquisição das cenas RapidEye (identificadas pelas linhas verticais vermelhas nas Figuras 11a e 11b). Os valores acumulados de EVI mostraram um acréscimo de 13,71% entre as duas datas das cenas RapidEye. Estas amplitudes podem estar associadas a um acréscimo nos valores de reflectância da vegetação causado pelas variações do ângulo zenital solar e também aos diferentes estados de desenvolvimento vegetativo dos exemplares florestais.

6.2.2 Dados dos sensores RapidEye

Por meio dos dados das cenas RapidEye foi possível identificar uma significativa mudança no padrão de resposta espectral em relação a geometria de iluminação do PET ao longo das duas datas avaliadas. A cena RapidEye adquirida para a data de 28 de junho de 2012 (representada na Figura 12a) mostrou um maior efeito de sombreamento sobre o relevo tornando mais perceptível as formas de relevo do PET, enquanto que a cena de 17 de outubro de 2012 mostrou um menor sombreamento da área do PET (Figura 12b) o que faz com que poucas formas de relevo possam ser vistas, caracterizando um dossel mais isotrópico.

A variação da área sombreada entre as datas das duas cenas está relacionada a forte amplitude de variação sazonal de ângulo zenital solar (AZS) encontrada na região sul do Brasil, cujos valores máximos superam 30° (BREUNIG *et al.*, 2015). Associado ao forte efeito da variação do AZS, os efeitos topográficos de sombreamento causados pelo relevo movimentado do

PET acentuam as variações locais de iluminação. Neste sentido, em relação as duas datas houve uma redução no AZS de 52° para 19° , o que acarreta em uma redução no sombreamento entre as duas cenas como pode ser visto nas Figuras 12a e 12b (NOAA-ESRL, 2015). Essa amplitude permite visualizar com muito mais facilidade os vales e encostras iluminadas na Figura 12a em relação a 12b. Nessa última, como o AZS é menor, uma maior homogeneidade da iluminação faz com que não sejam destacados os componentes geomorfológicos.

Para compreender como essas variações de iluminação oscilam ao longo do ano, inicialmente é necessário executar uma modelagem topográfica completa da área de estudo e na sequência, com a sobreposição dos dados espectrais aos distintos componentes da modelagem topográfica, será possível avaliar a magnitude da influência de cada componente na resposta espectral da floresta para os dois períodos do ano estudados.

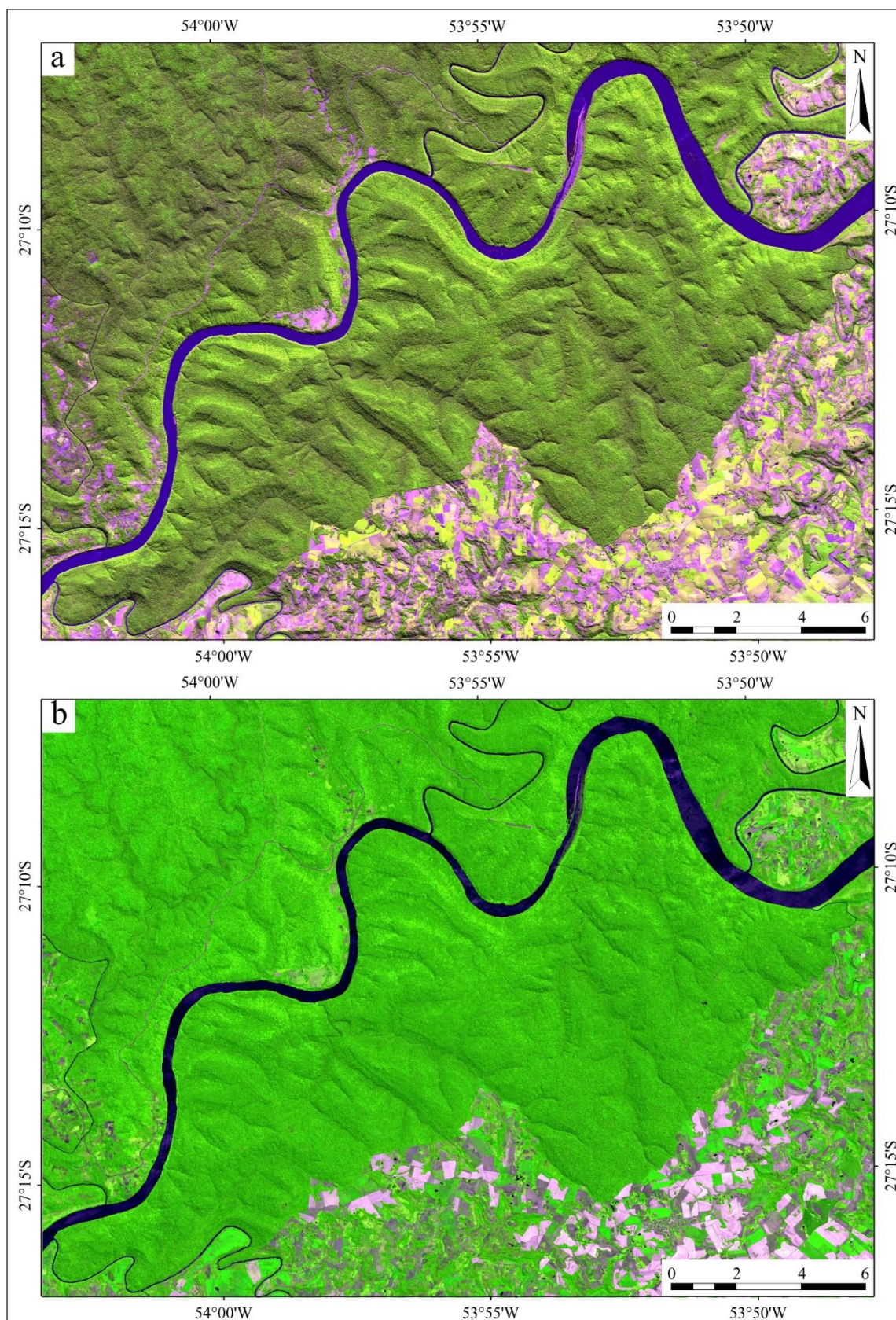


Figura 2 – Efeito das variações de geometria de iluminação para a área de estudo destacadas pelas cenas Rapideye do dia 28 de junho de 2012 (a) e 17 de outubro de 2012 (b), em composição colorida falsa-cor, com as bandas 3 (630-685 nm), 4 (690-730 nm) e 5 (760-850 nm), sendo representadas respectivamente em vermelho, azul e verde.

6.3 Análise das variáveis topográficas do Parque Estadual do Turvo

A modelagem topográfica permitiu a aquisição de dados das principais feições do relevo do PET permitindo a análise da relação do efeito topográfico com os parâmetros locais de iluminação do PET e a sua influência nos dados de reflectância de superfície e índices de vegetação. Por meio da modelagem topográfica foram elaboradas as variáveis correspondentes a declividade, orientação de vertentes, altimetria e relevo sombreado e a partir da classificação destas fez-se possível a realização da análise de qual o condicionamento exercido pelo relevo sobre os parâmetros de iluminação locais.

6.3.1 Declividade

A análise dos dados de declividade no Parque Estadual do Turvo (especializados no mapa da Figura 13) mostrou que de forma geral o PET apresenta relevo plano a suavemente ondulado, com declividades em torno de 2 a 5 graus, esta classe de declividade corresponde a 49,33% do PET. As áreas com esta característica estão localizadas principalmente em topos de morros e próximas a alguns setores do Rio Uruguai.

Declividades variando de 5 a 15 graus marcam as áreas intermediárias entre as encostas com maiores declividades e topos de morros, indicando áreas com relevo ondulado, que constituem 28,45% da área do parque. De maneira geral, 77,8% dos 169,64 km² da área de estudo, tem declividades variando de 2 a 15 graus, com características do relevo variando de plano a ondulado. Os 22,2% restantes marcam áreas com declividades de 0 a 2 graus com 10,65% e de 15 a 25 graus com 8,37%.

As áreas de altas declividades, com mais de 45 graus, perfazem no total 2,26% e declividades variando de 25 até 45 graus, somam 0,97% do total da área do parque conforme a Tabela 2. As áreas com maior gradiente de declividade estão associadas a borda dos topos e a rede de drenagem, na qual constituem extensos vales ao longo da porção central do Parque.

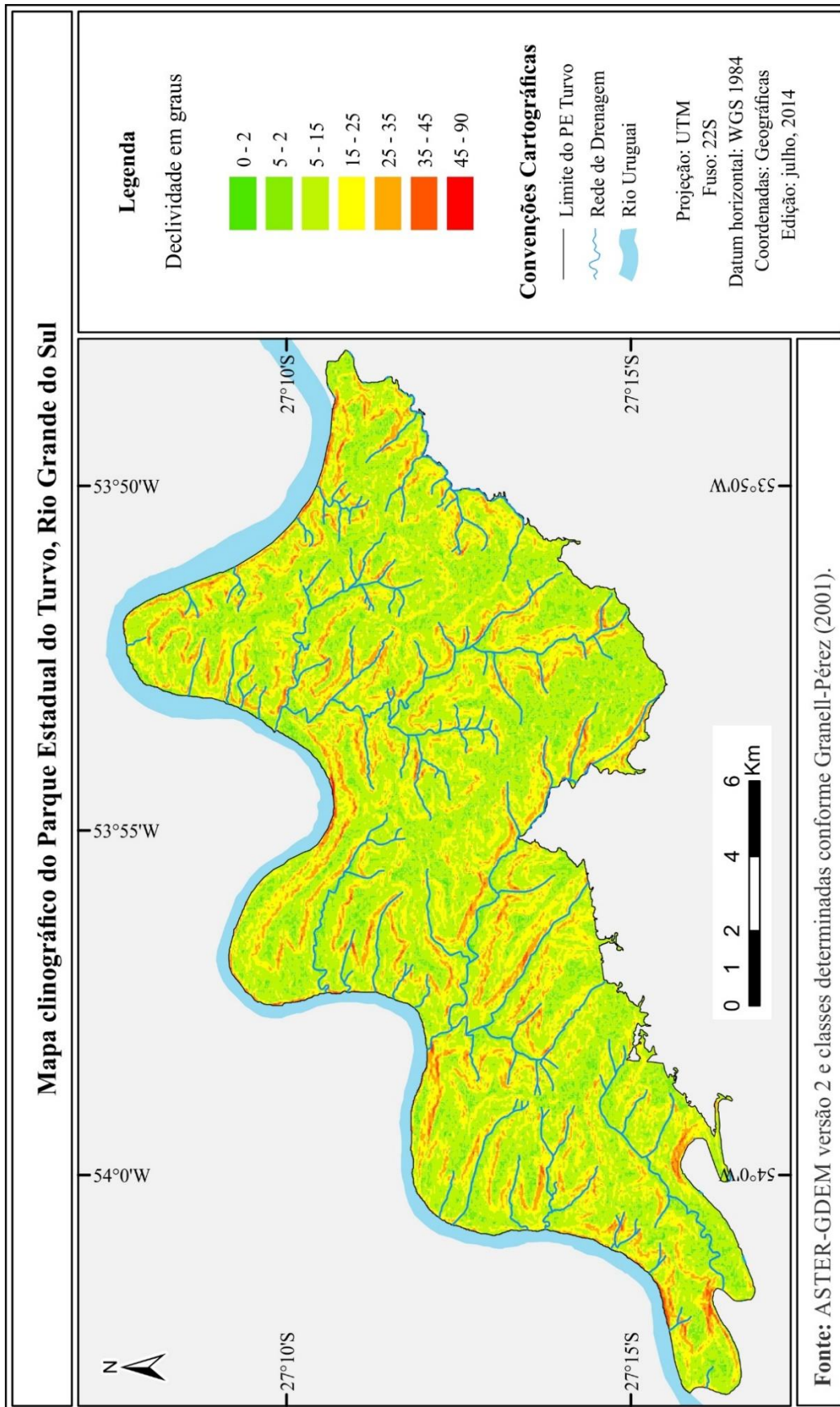


Figura 3 – Mapa de declividade do Parque Estadual do Turvo, elaborado a partir do modelo digital de elevação ASTER GDEM 2.

Tabela 1 – Dados da cobertura das classes de declividade na área de estudo.

Classes declividade	Área (km²)	Área (%)
0 – 2	18,05	10,65
2 – 5	83,62	49,33
5 – 15	48,24	28,45
15 – 25	14,15	8,37
25 – 35	1,58	0,93
35 – 45	0,04	0,04
> 45	3,84	2,26
Total	169,64	100

6.3.2 Orientação de vertentes

Os dados de orientação de vertentes obtidos por meio da modelagem topográfica da área de estudo (especializados no mapa da Figura 14) permitiram identificar que não existem grandes predomínios de direções de orientação, ocorrendo uma distribuição homogênea em todas as direções em toda área do PET. Considerando-se as oito direções de orientação de vertentes foi verificado que as faces com orientadas na direção Norte ocupam uma área correspondente a 19,55% da área de estudo, já as vertentes orientadas a Leste apresentam menor área ocupada, o que compreende 7,68% da área de estudo. Estas duas direções, em função da geometria de iluminação apresentam maior incidência de radiação solar.

Considerando a trajetória do sol em um dia (no sentido Leste para Oeste) no Hemisfério Meridional, os percentuais de área ocupada pelas vertentes Leste, Nordeste, Norte, Noroeste e Oeste (que recebem maior influência da radiação solar) correspondem 64,29% da área total do parque (Quadro 2). Este resultado indica que a maioria da área do parque recebe incidência direta de radiação solar, principalmente nas vertentes voltadas para o Norte, Noroeste e Nordeste, em decorrência do ângulo solar. As vertentes direcionadas a Sudoeste, Sul e Sudeste, somam 35,72% da área do parque, e são as vertentes com menor incidência de radiação solar.

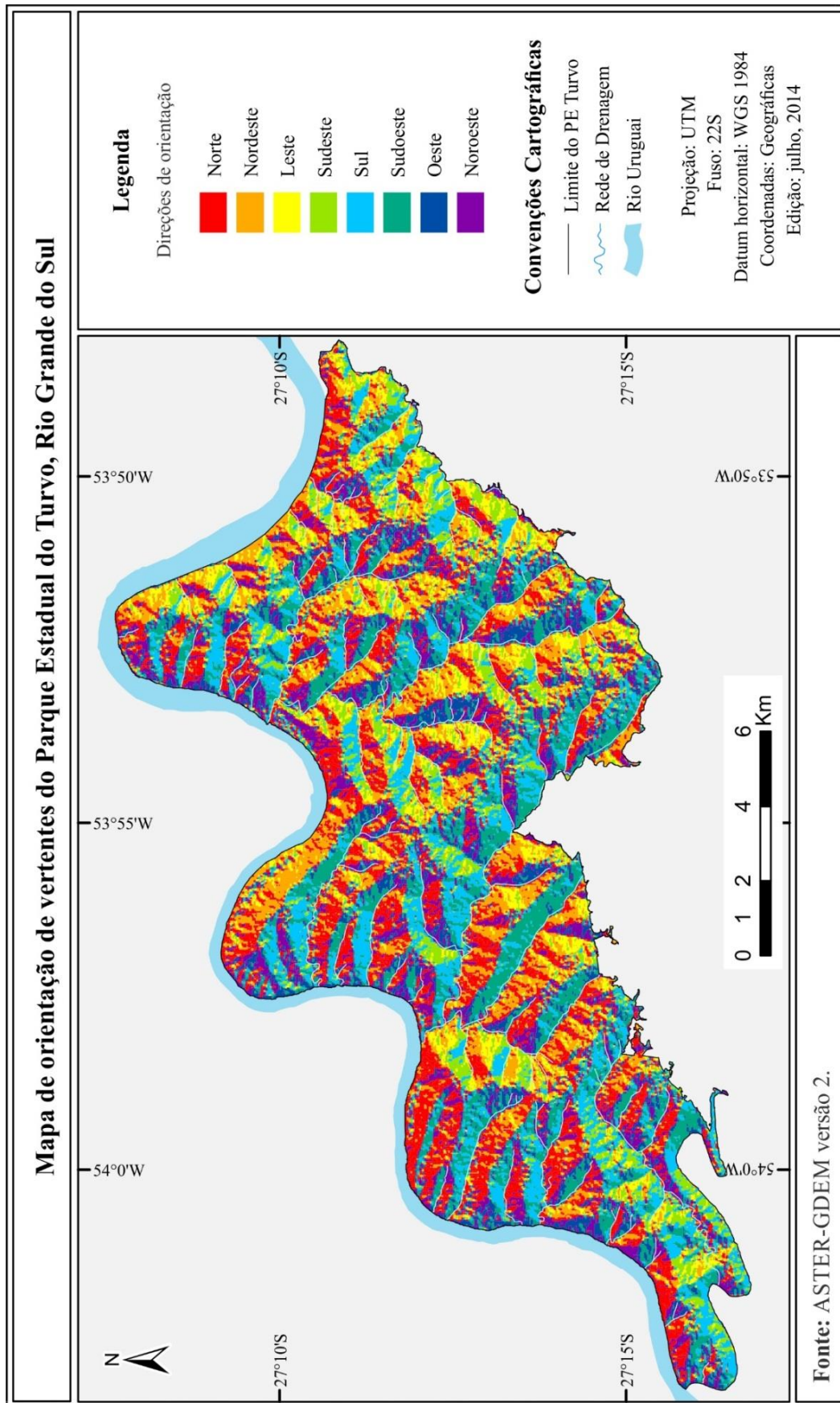


Figura 4 – Mapa de orientação de vertentes do Parque Estadual do Turvo, elaborado a partir do modelo digital de elevação ASTER GDEM 2.

Orientações das vertentes	Área (km ²)	Área (%)	Soma dos percentuais da área das vertentes
Leste	13,54	7,98	Leste, Nordeste, Norte, Noroeste, Oeste = 64,29%
Nordeste	23,9	14,09	
Norte	33,17	19,55	
Noroeste	21,66	12,77	
Oeste	16,79	9,90	
Sudoeste	24,1	14,21	Oeste, Sudoeste, Sul = 35,72%
Sul	22,3	13,15	
Sudeste	14,18	8,36	
Total	169,64	100	100

Quadro 2 – Dados da cobertura das classes de orientação de vertentes na área de estudo.

6.3.3 Altimetria

No aspecto da altimetria, o PET apresenta uma amplitude altimétrica de 360 metros, apresentando uma cota mínima de 120 metros e máxima de 480, conforme as classes utilizadas com amplitude de 40 metros cada, como ilustrado na Figura 15.

As análises dos dados de altimetria indicaram que as maiores cotas altimétricas ocupam apenas 0,67% dos 169,64 km² de área do parque, como mostrado na Tabela 3. Estas representadas pela classe de 400 a 480 metros de altitude localizam-se principalmente nos interflúvios dos arroios Calixto, Salto Grande e em um dos afluentes do Arroio Parizinho. Ao longo da margem do rio Uruguai pertencente ao parque, encontra-se as cotas de menores altitudes (120 a 160 metros) correspondendo a 1,8% da área total. Nas margens dos cursos de água que cortam a área do parque, encontram-se altitudes de 160 a 200 metros correspondendo a 11,13% da área. Estas cotas também podem ser verificadas nas proximidades do Rio Uruguai e Rio Turvo (limite Sudoeste do parque). A classe altimétrica com maior área ocupada, 280 a 320 metros, corresponde a 18,86% do total da área de estudo. Considerando as quatro classes altimétricas com as maiores áreas ocupadas, 63,67% da área do Parque Estadual do Turvo têm altitudes variando de 200 a 360 metros.

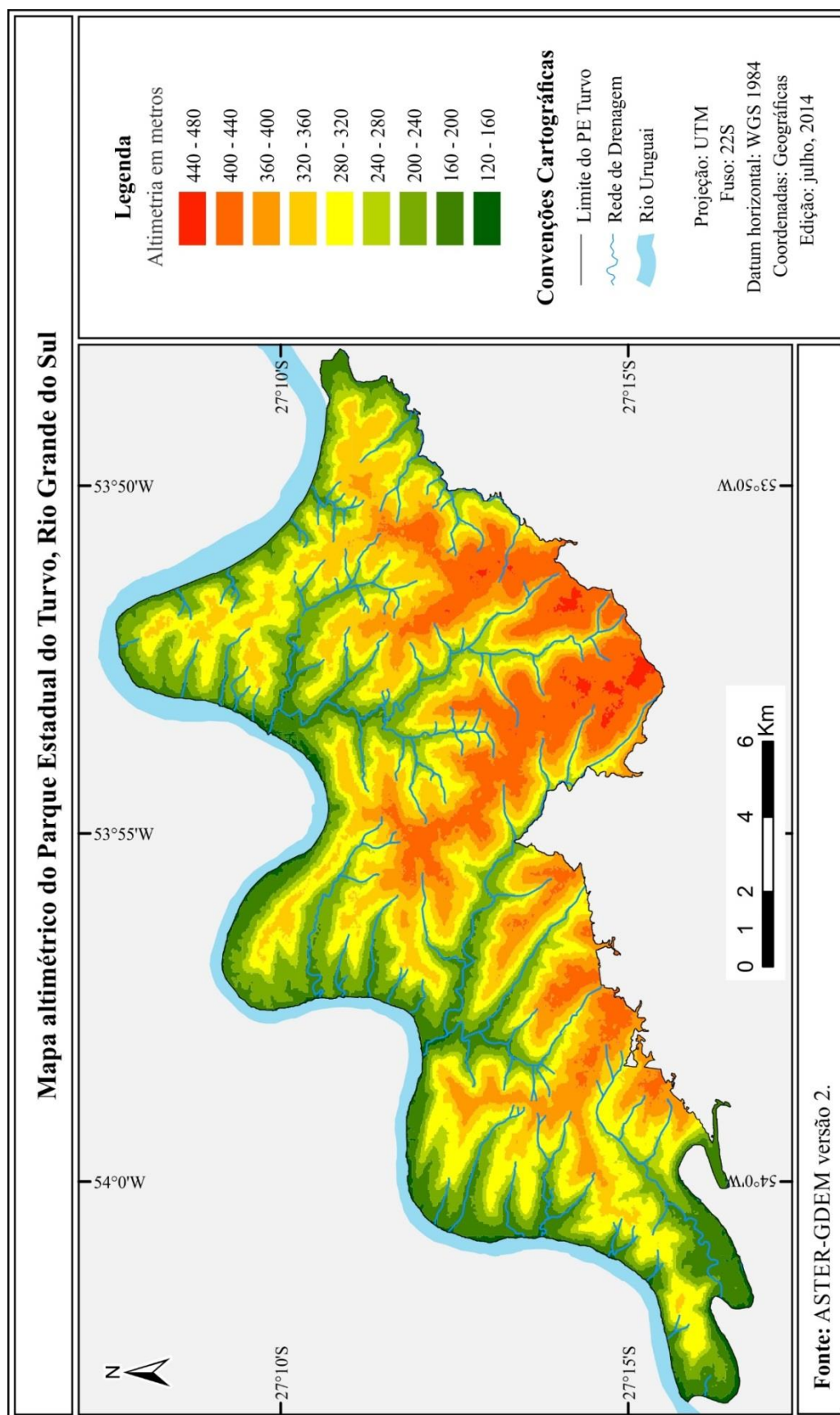


Figura 5 – Mapa altimétrico do Parque Estadual do Turvo, elaborado a partir do modelo digital de elevação ASTER GDEM 2.

Tabela 2 – Dados da cobertura das classes altimétrica na área de estudo.

Classes altimétricas (m)	Área (km²)	Área (%)
120 - 160	3,05	1,80
160 - 200	18,87	11,13
200 - 240	25,98	15,30
240 - 280	20,92	12,31
280 - 320	31,98	18,86
320 - 360	29,16	17,19
360 - 400	19,10	11,26
400 - 440	19,45	11,47
440 - 480	1,14	0,67
Total	169,4	100

6.3.4 Relevo sombreado

Ao contrário dos demais dados obtidos diretamente por meio da modelagem topográfica do PET com uso do modelo digital de elevação ASTER GDEM 2, o relevo sombreado foi elaborado em função dos parâmetros da geometria de iluminação das duas cenas RapidEye utilizadas no estudo. Neste sentido, os dados adquiridos por meio do relevo sombreado mostraram o efeito das condições de iluminação e sua variação em função das mudanças ocorridas na geometria de iluminação entre as duas datas analisadas, sendo verificado nas Figuras 16 e 17 as condições de iluminação para as datas de junho e outubro respectivamente.

A análise do relevo sombreado mostrou uma significativa variação nas condições de iluminação entre as duas datas. Na data de junho foi verificado um predomínio de áreas em condições intermediárias de iluminação, sendo verificada uma maior área ocupada por condições de sombreamento em relação a data de outubro, quando houve uma significativa redução do sombreamento e das condições intermediárias e maior predomínio de áreas iluminadas.

As mudanças ocorridas entre as duas datas estão diretamente ligadas a variação da elevação solar (ou aumento do ângulo zenital solar), sendo que na data de junho, o baixo ângulo de elevação solar de 37,93° associado as características do relevo movimentado do PET conduz a um cenário de ocorrência de grandes áreas sombreadas associadas a vertentes orientadas nas direções sudeste, sul e sudoeste, opostas a direção de incidência da radiação solar. Nesta data foi verificado que as áreas iluminadas ocorrem sob condições diretas de incidência de radiação solar, em áreas com orientação de vertentes nas direções noroeste, norte e nordeste, ocorrendo em áreas planas e de elevada declividade.

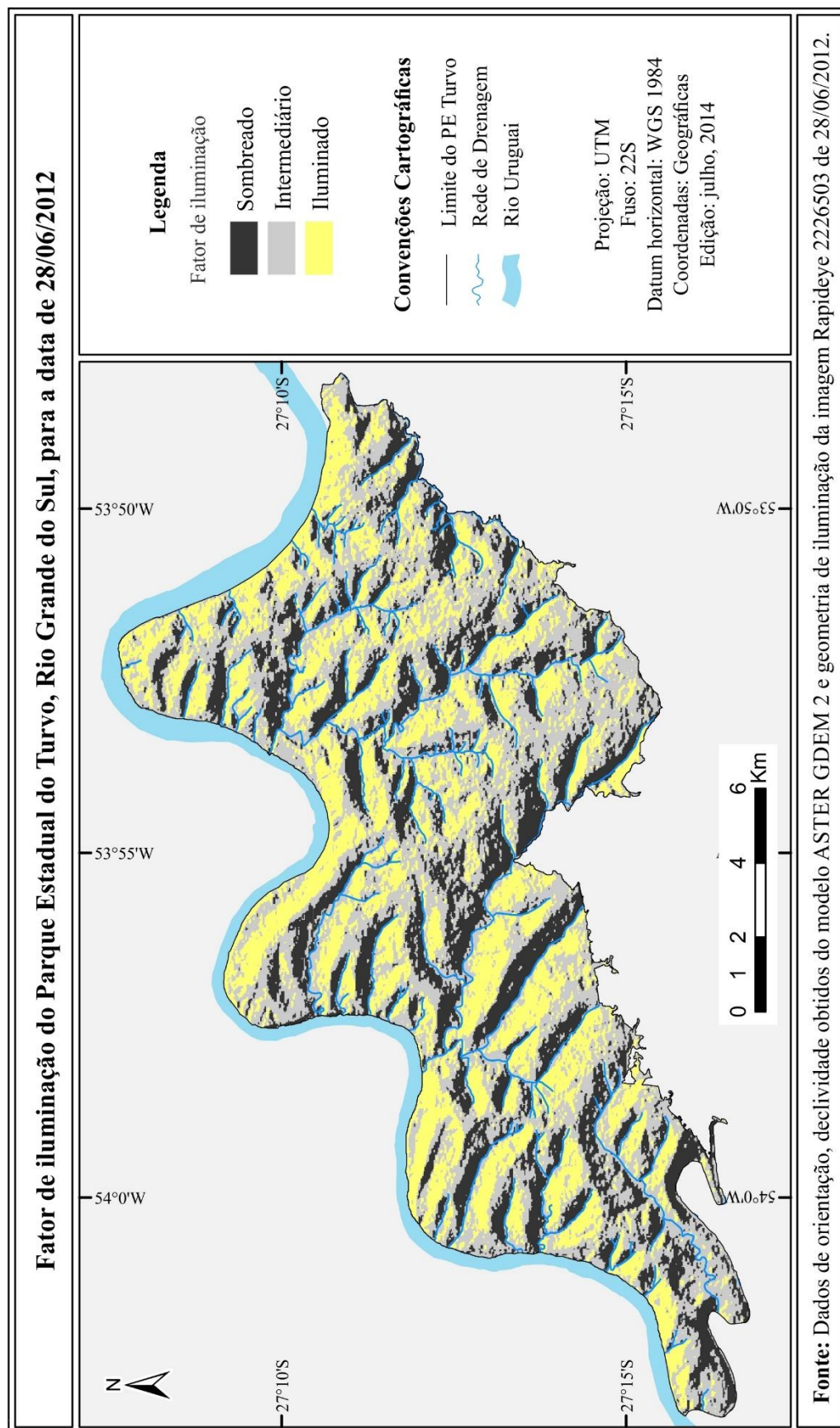


Figura 6 – Mapa do fator topográfico de iluminação do Parque Estadual do Turvo elaborado para a data de 28 de junho de 2012.

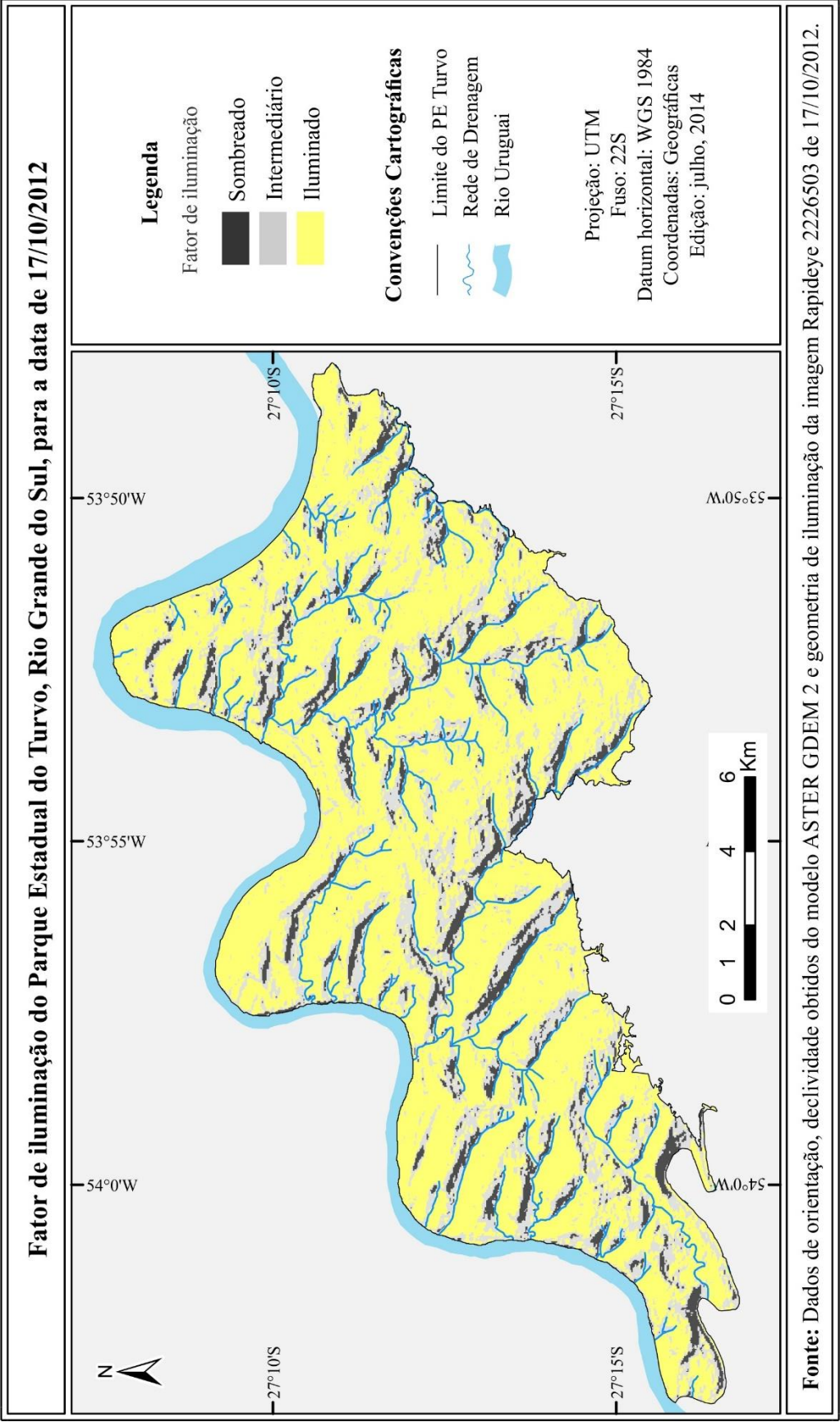


Figura 7 – Mapa do fator topográfico de iluminação do Parque Estadual do Turvo, elaborado para a data de 17 de outubro de 2012.

De acordo com a Tabela 4 as áreas iluminadas correspondem a um total de 31,63% da área do PET. As áreas com característica de iluminação intermediária ocorreram em regiões com baixa declividade e orientadas principalmente nas direções leste, sudeste, sudoeste e oeste.

Tabela 3 – Dados da cobertura das classes de iluminação em função das datas das cenas RapidEye utilizadas na área de estudo.

Condições de iluminação	28/06/2012		17/10/2012	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Iluminado	53,66	31,63	117,53	69,61
Intermediário	74,41	43,86	37,59	22,26
Sombreado	41,59	24,51	13,72	8,13

Entre as duas datas ocorreu um acréscimo no ângulo de elevação solar, no qual o ângulo verificado na data de outubro foi de 71,25°. Esta variação na elevação solar proporcionou uma mudança nas condições de iluminação, o que pode ser verificado no aumento significado das áreas iluminadas que passaram a ocupar 69,61% da área do PET, ocorrendo uma redução nas áreas intermediárias e sombreadas.

As áreas sombreadas, na data de outubro restringiram-se as encostas de vales com orientação oposta as condições de incidência de radiação solar, porém houve uma redução nestas áreas em aproximadamente 16,38. Boa parte das áreas que na data anterior apresentaram sombreamento, com a mudança da elevação solar passaram a apresentar valores de iluminação intermediária. Estas áreas restringiram-se as encostas de vales e áreas planas de topos de morros. No entanto, as áreas classificadas como intermediárias também apresentaram uma redução de área de 21,6%, correspondendo a 22,26% da área do PET.

As variações ocorridas entre as duas datas avaliadas estão diretamente ligadas a dois fatores principais: o primeiro compreende a variação do ângulo zenital solar (AZS) entre as duas datas, que foi de 33° de diferença entre as duas datas, fazendo com que a geometria de iluminação para a data de junho seja mais controlada pelas condições de sombreamento, enquanto que para a data de outubro, a redução no AZS permita uma maior distribuição da iluminação sobre a área de estudo. O segundo fator responsável pelas variações nos dados das condições de iluminação corresponde as características topográficas do PET. As principais características levadas em conta na análise do relevo sombreado correspondem as variáveis topográficas de orientação de vertentes e de declividade. Neste sentido, as áreas classificadas

como sombreadas nas duas datas estão diretamente ligadas a faces com orientação dispostas nas direções contrárias a direção de incidência solar e adjacentes a áreas com grandes declives.

Dada essa variação intra-anual significativa da iluminação, uma avaliação detalhada dos produtos de sensoriamento remoto pode auxiliar no entendimento da resposta espectral da floresta do PET ao longo do ano.

6.4 Análise da distribuição espacial dos dados de sensoriamento remoto sobre a área do Parque Estadual do Turvo

Os dados de reflectância das bandas Rapideye apresentaram grandes diferenças em relação as condições de iluminação presentes no PET. Além da variação da reflectância em função das condições de iluminação, os espectros de reflectância analisados apresentaram variações em relação as duas datas analisadas, como verificado nos gráficos da Figura 18.

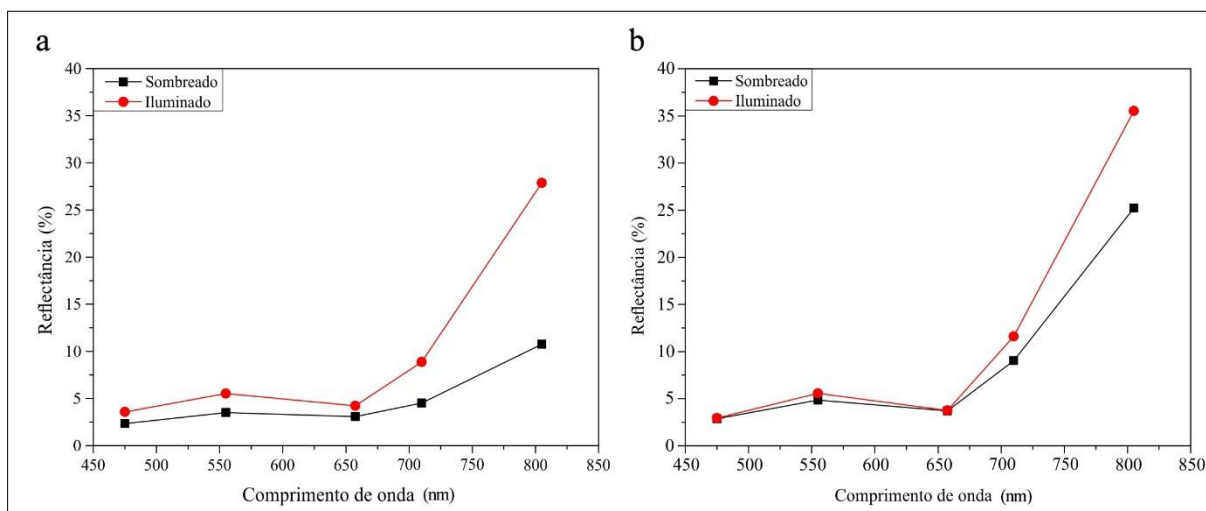


Figura 8 – Espectros de reflectância das datas de 28 de junho de 2012 (a) e 17 de outubro de 2012 (b) das imagens RapidEye para as áreas iluminadas e sombreadas. Foram amostrados 1000 pixels aleatoriamente de cada classe para o compute de cada espectro médio.

De acordo com a análise dos gráficos foi identificado que na data de junho (Figura 18a) os valores das áreas iluminadas mostraram-se mais elevados em relação aos valores de reflectância verificados nas áreas sombreadas, sendo que nos comprimentos de ondas relativos a região do

visível do espectro eletromagnético, os valores permaneceram baixos com pouca variação para os dois tipos de condições de iluminação analisados. A partir dos 650 nm foi verificado um acréscimo nos valores de reflectância, sendo maior para as áreas iluminadas, devido nesta região do espectro eletromagnético a vegetação apresentar maior reflectância, correspondente nas cenas Rapideye as bandas da borda do vermelho e do infravermelho próximo.

Para a data de outubro (Figura 18b) foi verificada a mesma tendência nos valores de reflectância, porém com maior acréscimo nos valores de reflectância a partir dos 650 nm, o que indica que a mudança da geometria de iluminação entre as datas interviu nas condições de iluminação, bem como o efeito do brotamento de folhas (espécies emergentes decíduas). A redução ocorrida no ângulo zenital solar entre as duas datas proporcionou maior incidência de radiação solar na data de outubro, sendo verificada uma maior reflectância nesta data, principalmente sobre as áreas iluminadas.

6.4.1 Distribuição espacial da reflectância das cenas RapidEye no Parque Estadual do Turvo

A distribuição espacial dos dados de reflectância das bandas das duas cenas analisadas mostrou diferenças significativas entre as variações dos maiores e menores valores entre as duas datas. Os dados de reflectância da cena com data de junho apresentaram variações que permitiram a identificação visual das formas de relevo presentes no PET como mostra a Figura 19.

Valores indicativos de baixa reflectância foram encontrados nas áreas com baixo gradiente altimétrico, as quais apresentam sombreamento causado pelas áreas adjacentes com maior elevação ou por estarem orientadas em direções opostas as que apresentam maior iluminação, enquanto que os valores mais elevados de reflectância foram identificados em áreas com elevada altimetria (pode levar a diferenças nas características da vegetação e indiretamente afeta os produtos espectrais) e menor sombreamento. Por outro lado, a distribuição espacial dos valores de reflectância das bandas RapidEye com data de outubro apresentaram menores amplitudes em relação as bandas da data anterior.

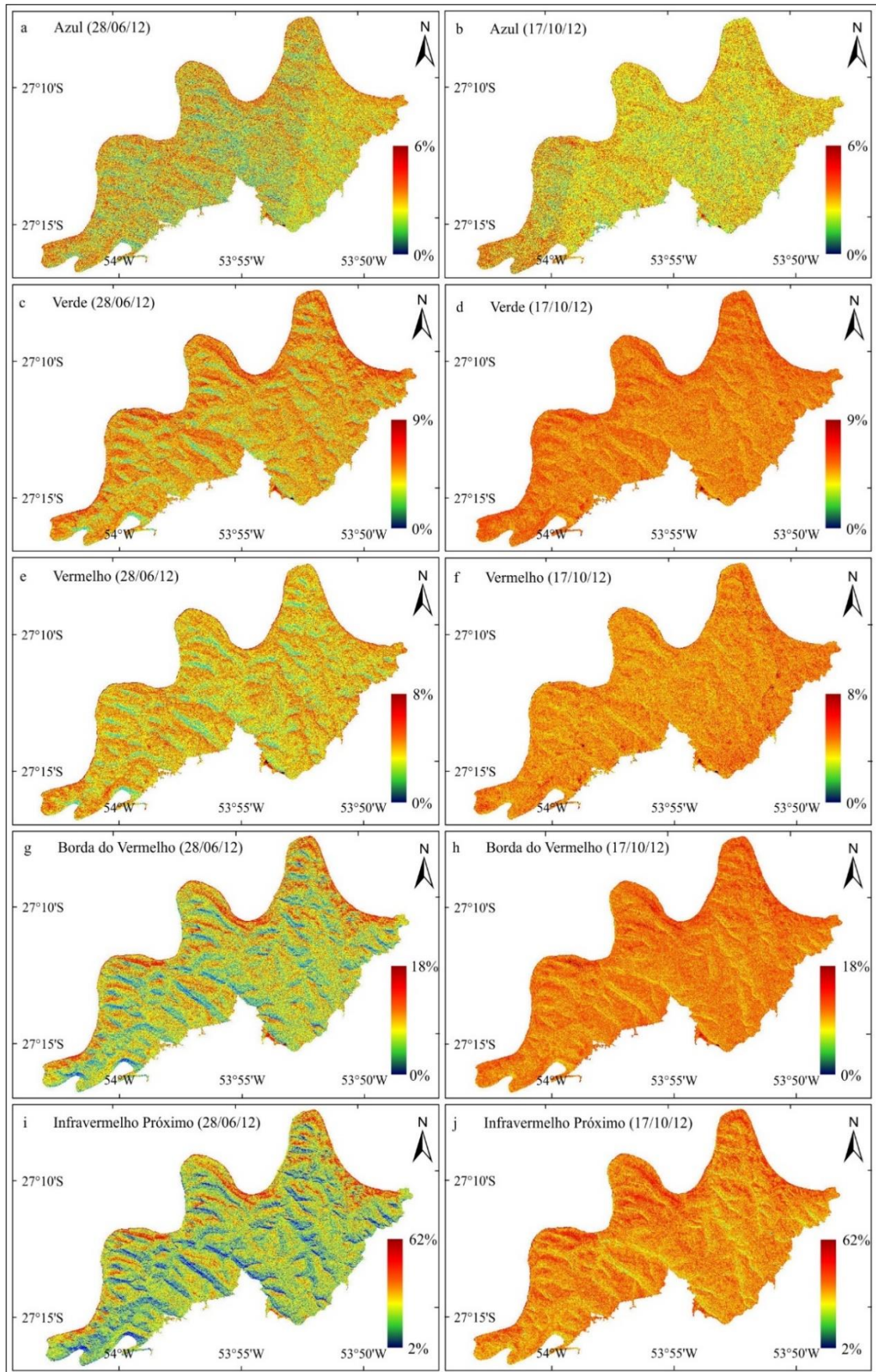


Figura 9 – Espacialização das variações da reflectância das bandas RapidEye para a floresta do PET em função das variações da geometria de iluminação solar para as datas de 28 de junho e 17 de outubro de 2012.

De forma sintética, é possível verificar que para a imagem de outubro ocorre uma maior homogeneidade (menor variância) do que para a data de junho. Além disso, em geral, em junho, uma grande diferença de magnitude dos valores de reflectância de superfície é encontrada entre as áreas de vales e as áreas mais elevadas ou sujeitas a maior iluminação.

Analizando a espacialização dos valores de reflectância da banda do azul para as duas datas foi possível verificar que esta banda apresentou baixa variação entre as duas datas, em comparação com as demais bandas devido a baixa reflectância que a vegetação apresenta na região do azul. Na data de junho (Figura 19a) ocorreram baixas variações nos valores de reflectância em comparação com as bandas onde a vegetação apresenta elevada reflectância.

No entanto, algumas áreas apresentaram uma maior reflectância, estando orientadas para as direções de maior incidência de radiação solar, enquanto que as áreas orientadas nas direções com baixa incidência direta de radiação solar apresentaram uma ligeira redução nos valores da reflectância da banda do azul. Na data de outubro (Figura 19b) não foram identificadas grandes amplitudes de variações, sendo identificados alguns pontos com elevado valor de reflectância. Em geral, em junho os efeitos topográficos mostraram-se mais acentuados em relação a data de outubro.

A partir da análise da banda do verde foram verificadas maiores variações em relação as duas datas avaliadas, sendo na data de junho (Figura 19c) possível identificar diversas áreas com valores baixos de reflectância, em torno de 2%, localizados nos fundos dos vales e em áreas orientadas nas direções contrárias a incidência direta de iluminação. Em algumas áreas próximas ao Rio Uruguai com orientação nas direções norte, nordeste e leste foram encontrados valores mais elevados de reflectância próximos a 7%.

Na data de outubro (Figura 19d) foi verificado um aumento dos valores de reflectância nas áreas iluminadas, sendo este acréscimo nos valores verificado principalmente nas áreas mais próximas ao Rio Uruguai, onde foram encontrados valores de reflectância média em torno de 8%. Enquanto que nas áreas de vertentes orientados na direção oposta a incidência direta de iluminação foram verificados os valores mais baixos, em torno de 4%, embora estes também sejam mais elevados em relação aos valores de reflectância verificados para as mesmas áreas na data de junho.

A espacialização dos valores de reflectância da banda do vermelho mostraram significativas variações entre as duas datas analisadas, sendo que na data de junho (Figura 19e) foram identificadas diversas áreas com reflectância entre 4% e 2% correspondentes a áreas de fundos de vales com baixa altimetria ou orientadas em direções contrárias a incidência de iluminação. De forma geral, na data de junho os valores de reflectância apresentaram-se

baixos. Na data de outubro (Figura 19f) houve um significativo acréscimo nos valores de reflectância em todas as áreas do PET. Analisado os dados espacializados foi possível identificar que os valores mais elevados da reflectância da banda do vermelho ocorrem relacionados as áreas com menor densidade de dossel vegetativo, o que causa maior interferência das estruturas arbóreas e do substrato. Também foi possível identificar com a banda do vermelho a estrada de solo exposto que corta o PET em direção ao Salto do Yucumã, na qual foram verificados valores de reflectância elevados em torno de 5%.

A banda da borda do vermelho apresentou variações relacionadas aos baixos valores entre as duas datas, sendo que na data de junho (Figura 19g) podem ser identificadas diversas formas de relevo que constituem áreas com características de pouca iluminação ou sombreamento. Na mesma data, também foram encontradas áreas com elevada reflectância situadas sobre áreas planas de topos de morros e encostas próximas ao Rio Uruguai orientadas nas direções norte, nordeste, leste e noroeste.

Na data de outubro (Figura 19h), assim como nas demais bandas foi verificado um considerável acréscimo nos valores de reflectância. Este acréscimo está relacionado ao desenvolvimento fenológico da vegetação e também a redução do ângulo zenital solar entre as duas datas. Na data de outubro foram verificadas poucas áreas com baixos valores de reflectância, sendo que a maior parte da área do PET apresentou uma reflectância média de 12%. Em algumas áreas declivosas próximas ao Rio Uruguai e de topos de morros foram verificados valores mais elevados de reflectância, em torno de 16%.

A banda do infravermelho próximo foi a que apresentou as reflectâncias mais elevadas e as maiores variações em relação as demais bandas. Na data de junho (Figura 19i) foram verificadas as maiores variações de reflectância, sendo identificadas áreas com baixa reflectância constituídas por vertentes de baixa iluminação ou grande sombreamento, e áreas com elevada reflectância, em torno de 45% características de vertentes com boa iluminação, situadas, sobretudo em áreas planas de topos de morros e também em áreas declivosas próximas ao Rio Uruguai com vertentes orientadas nas direções de maior incidência de radiação solar (norte, nordeste, leste e noroeste).

Na data de outubro (Figura 19j) foram identificadas áreas com valores de reflectância próximos a 54%, sendo que a maioria das áreas do PET estava apresentando valores acima de 35%. Embora sejam verificados os valores mais elevados de reflectância em relação às demais bandas na data de outubro, ainda existem áreas de fundos de vales com baixa reflectância, o que indica que mesmo com as variações sazonais da vegetação, com aumento da produção de clorofilas e aumento do índice de área foliar entre as duas datas, e diminuição do ângulo zenital

solar permitindo uma melhor condição de iluminação no PET, os maiores vales que cortam a área do PET ainda apresentam baixa reflectância em relação as demais áreas, em função destas áreas ainda apresentarem na data de outubro condições de sombreamento.

Como os dados de reflectância de superfície apresentaram forte dependência das características geomorfológicas locais, cabe investigar se o mesmo ocorre índices de vegetação usualmente utilizados no monitoramento e investigações florestais.

6.4.2 Distribuição espacial dos índices de vegetação na área de estudo

A distribuição espacial dos índices de vegetação sobre a área de estudo possibilitou a identificação das variações de cada índice em função do relevo, sendo identificados os locais de maior variação tanto positiva, quanto negativa destes índices, por meio da análise conjunta com os mapas obtidos por meio da modelagem topográfica. A Figura 20 ilustra as variações dos índices de vegetação, calculados para a área do PET a partir das bandas do RapidEye, em função das duas datas avaliadas.

A primeira avaliação mostra uma diferença notável entre os índices calculados a partir da cena adquirida em junho da cena de outubro. Essas diferenças são nítidas nas áreas de vales e encostas iluminadas. Considerando que a floresta apresenta um padrão decidual, ainda assim, grandes diferenças são encontradas para o período de junho dentro de cada cena. Em outubro a variância dos índices para a área do PET tende a diminuir junto com a redução do AZS e do sombreamento.

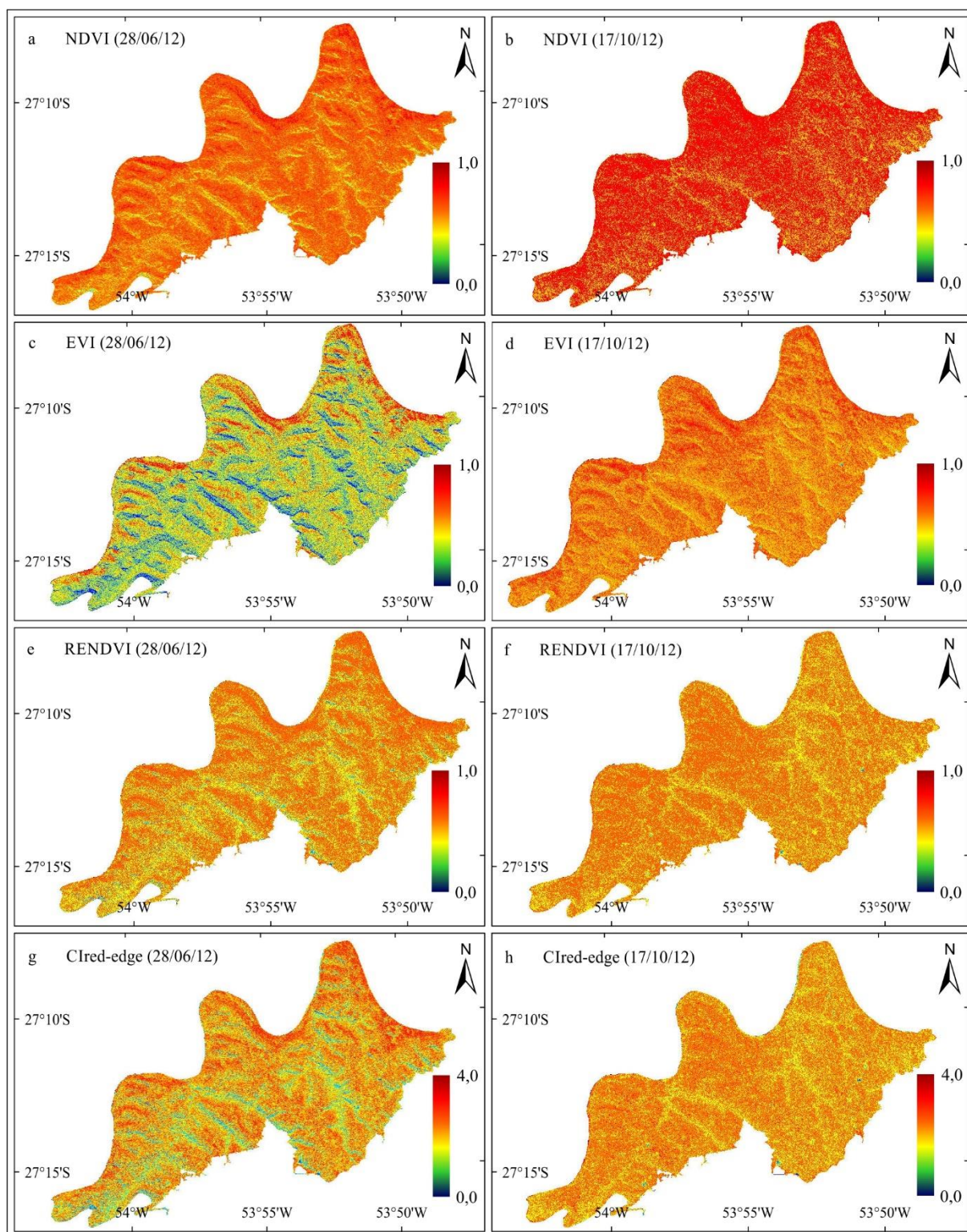


Figura 10 – Espacialização das variações dos índices de vegetação calculados para o PET em função da geometria de iluminação para as datas de 28 de junho e 17 de outubro de 2012.

Partindo-se do pressuposto de que a floresta subtropical decídua apresenta-se espacialmente de forma homogênea cobrindo toda a área do PET, os índices de vegetação

deveriam em tese indicar apenas variações relacionadas as características do dossel vegetativo. No entanto, a distribuição espacial dos quatro índices de vegetação utilizados neste trabalho mostrou uma significativa relação dos índices de vegetação com as mudanças sazonais na geometria de iluminação da área. Matsushita *et al.* (2007) concluíram em seu trabalho que os índices de vegetação NDVI e EVI sofrem interferência das condições de iluminação do dossel vegetativo no momento da aquisição das imagens, sendo o EVI mais susceptível as condições de sombreamento impostas pela geometria de iluminação associada ao relevo do que o NDVI, que devido a sua característica de normalizar efetivamente os dados, sofre menor influência das condições de iluminação (BREUNIG *et al.*, 2015).

Com a análise da distribuição espacial dos índices de vegetação utilizados neste estudo foi possível identificar as áreas do PET que apresentam maiores variações de valores destes índices. Neste sentido, as variações encontradas na distribuição espacial dos índices de vegetação entre as cenas das duas datas avaliadas permitiu identificar que a maioria destas variações de valores está associada a mudança do ângulo zenital solar entre as duas datas, uma vez que as áreas que apresentam menores valores nos índices calculados para a data de junho estão localizadas em regiões com grande interferência do relevo nas condições de iluminação. Na data correspondente ao mês de outubro foram verificados em todos os índices de vegetação acréscimos significativos em suas medidas na maior parte das áreas que apresentavam baixos valores na data de junho, embora nem todas as áreas apresentassem mudanças significativas entre as duas datas como as áreas sombreadas de fundo de vales, que apresentaram baixa variação.

Analizando as variações ocorridas em cada índice foi verificado que os índices de vegetação NDVI, RENDVI e EVI apresentaram maior susceptibilidade as condições de sombreamento na data de junho. O índice de clorofila da borda do vermelho apresentou baixa variação espacial na data de junho, tendo os seus valores significativamente mais baixos em relação aos valores verificados na data de outubro.

A espacialização do índice NDVI mostrou a ocorrência de um acréscimo nos valores entre as duas datas. Na data de junho (Figura 20a), embora verificados valores em sua maioria mais baixos do que os verificados valores mais baixos apresentaram-se associados a regiões com grande sombreamento localizadas principalmente nos fundos dos vales fluviais da porção central do Parque e também em áreas cujas vertentes apresentam orientação nas direções Sudeste, Sul, Sudoeste e Oeste, caracterizadas por apresentarem menores incidências de radiação solar. Os valores elevados de NDVI na data de junho ocorreram em regiões elevadas livres de sombreamento por intervenção de áreas adjacentes e com orientação nas direções Norte, Nordeste, Leste e Noroeste, caracterizadas por apresentar maior condição de iluminação.

A cena com data de outubro (Figura 20b) mostrou um significativo acréscimo nos valores do índice NDVI, ocorrido principalmente nas áreas em que na data de junho apresentavam-se baixos valores. Analisando a distribuição do NDVI para a data de outubro não foram encontradas variações consideráveis do índice de vegetação em função do relevo. Nesse ponto cabe destacar que o efeito do brotamento de folhas não foi avaliado para quantificar a interferência de cada variável no NDVI (BREUNIG *et al.*, 2015).

O EVI foi o índice de vegetação que apresentou maiores variações de valores condicionadas pelas condições de iluminação/sombreamento em relação aos demais índices analisados. A sua distribuição espacial nas duas datas analisadas mostrou grandes variações, sendo estas mais acentuadas na data de junho (Figura 20c), na qual foi possível identificar as formas de relevo por meio de sua distribuição espacial devido este índice apresentar grande sensibilidade as condições de variação de reflectância causadas principalmente, neste caso, pela pelas condições de iluminação e pelo efeito topográfico do relevo (MATSUSHITA *et al.*, 2007). Na data de outubro (Figura 20d), com uma maior condição de iluminação direta do PET dado a maior elevação solar nesta data, as variações dos valores do índice EVI mostraram-se menos acentuadas, emboa estas ainda sejam mais sensíveis do que as variações verificadas nos demais índices avaliados.

A distribuição espacial do índice EVI para a área do PET apresentou as mesmas características descritas por Matsushita *et al.* (2007) sobre a sua relação com a influência das condições de iluminação da área no momento da aquisição das imagens. As áreas dos vales e as encostas iluminadas são nitidamente visíveis em ambas as datas analisadas.

A distribuição espacial do índice RENDVI mostrou variações nos valores muito parecidas com as que foram analisadas na distribuição espacial dos valores do índice NDVI, sendo que a maior diferença entre os dois índices ocorreu nos valores em que o RENDVI apresenta valores mais baixos do que o NDVI devido ao uso da banda da borda do vermelho em sua composição (Equação 3).

Para a data de junho (Figura 20e), a distribuição espacial do índice RENDVI apresentou grandes áreas com baixos valores do índice. Igualmente como no NDVI, estas áreas estão associadas a interferência nas condições de sombreamento causado principalmente pelas condições do relevo e da geometria de iluminação. Na data de outubro (Figura 20f) foi verificado uma menor variação sobre os dados, sendo observada uma discrepância nos valores, os quais apresentaram-se mais elevados nas regiões central e próximas ao Rio Uruguai.

Como já mencionado, o CIred-edge não apresentou significativas variações em sua distribuição espacial na data de junho, apresentando apenas valores muito baixos em relação

aos valores encontrados na data de outubro. Isto ocorre em função deste índice identificar a produção de clorofilas, que na data de junho apresentava-se de forma muito baixa, concordando com a redução do IAF identificado por outros estudos (ROSA *et al.*, 2013; BREUNIG *et al.*, 2015). No entanto, as medidas deste índice para a data de outubro mostraram valores elevados, indicadores de grande produção de clorofilas. No que diz respeito a distribuição espacial dos valores, estes apresentaram uma significativa amplitude entre as áreas com maior e menor sombreamento, sendo possível identificar por meio de análise visual os valores fluviais localizados na região central do PET, que apresentam-se como áreas de maior sombreamento devido as suas características topográficas.

6.5 Análise dos dados de sensoriamento remoto em função dos parâmetros da modelagem topográfica

6.5.1 Dados de reflectância Rapideye em função dos parametros da modelagem topográfica

Os valores médios da reflectância das bandas das cenas RapidEye de 28 de junho e 17 de outubro de 2012 mostraram variações de acordo com as classes das variáveis topográficas. Estas variações remetem as diferenças apresentadas nos valores frente as características de iluminação associadas a cada classe. De todas as variáveis topográficas analisadas, a orientação de vertentes foi a que melhor representou as características da reflectância da floresta subtropical decídua do PET na data do mês de junho.

Analisando os gráficos da Figura 21 foi possível verificar que as médias de reflectância apresentam diferentes padrões de acordo com as variáveis topográficas associadas com uma significativa variação de amplitude média entre as duas datas analisadas. Dentre as quatro variáveis analisadas, a orientação de vertentes foi a que apresentou variações mais significativas, sendo estas associadas às variações de iluminação/sombreamento de acordo com as orientações das vertentes.

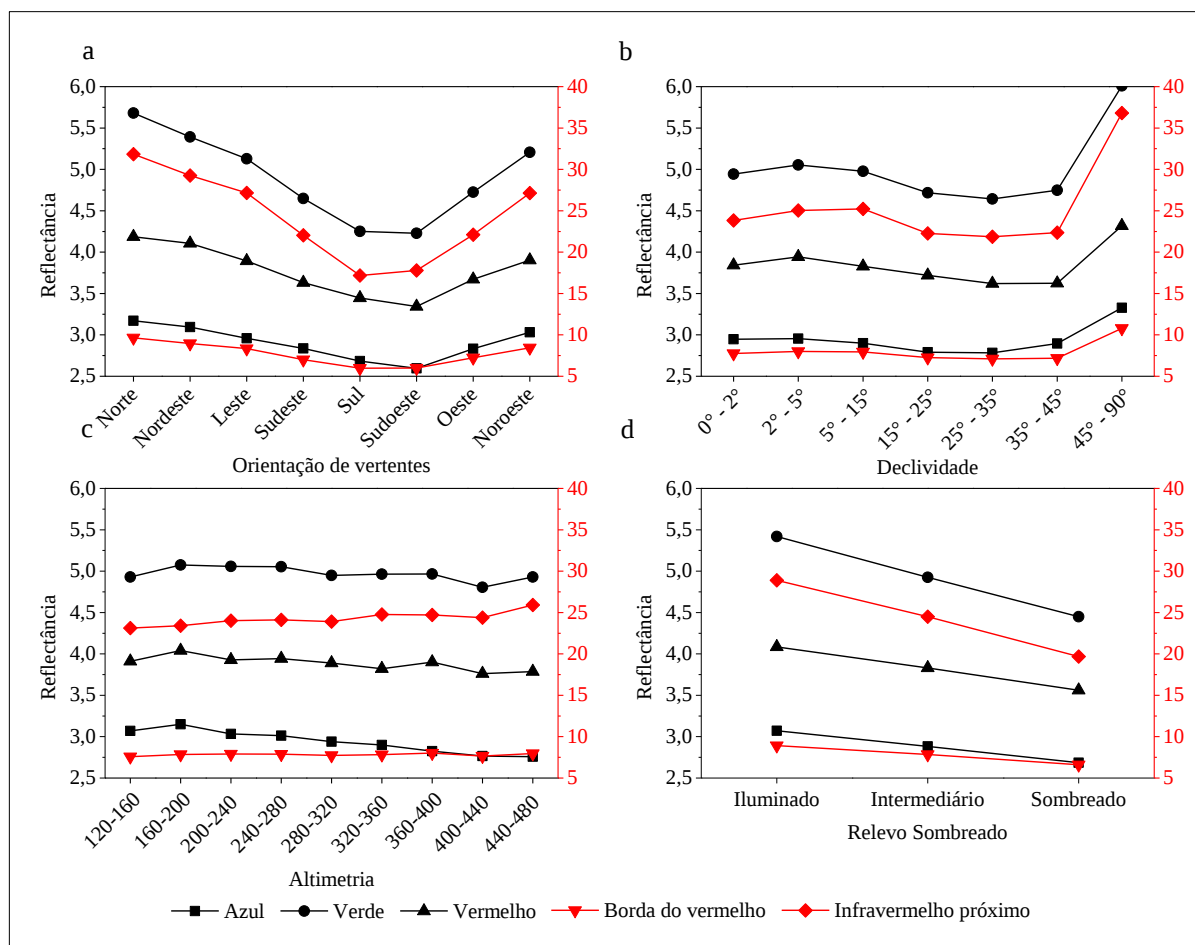


Figura 11 – Variações da reflectância das bandas da cena RapidEye de 28 de junho de 2012 em função das variáveis topográficas de orientação de vertentes (a), declividade (b), altimetria (c) e relevo sombreado (d). As reflectâncias são dadas em porcentagem.

O gráfico da Figura 21a mostrou que a reflectância média variou de acordo com as orientações das vertentes em todas as bandas espectrais, sendo que as bandas da borda do vermelho e infravermelho próximo apresentaram maiores variações em relação às bandas da região do visível (considerando apenas os valores absolutos os índices). As vertentes norte, nordeste, leste e noroeste tiveram reflectâncias mais elevadas se comparadas as das áreas das vertentes sudeste, sul, sudoeste e oeste, devido as primeiras apresentarem menor dependência das condições de iluminação por receberem radiação solar de forma direta, ao contrário das segundas, que são caracterizadas por apresentar maior dependência das condições de iluminação, em função da geometria de iluminação local causar maior sombreamento nestas vertentes.

No que diz respeito aos valores de reflectância amostrados em função das classes de orientação de vertentes, os valores mais elevados foram verificados nas bandas da borda do vermelho e infravermelho próximo, sendo que entre as bandas da região do visível, a banda do

verde foi a que apresentou maiores valores de média e amplitude de variação. A banda do verde apresentou uma média de reflectância de 4,91% e uma amplitude de 1,45% registrada entre as classes de orientação norte (maior valor, 5,68%) e sudoeste (menor valor, 4,23%). Por meio dos valores amostrados da banda da borda do vermelho foi possível verificar que esta apresentou valores médios e de amplitude de variação intermediários entre as bandas da região do visível e do infravermelho próximo, sendo verificada uma média de reflectância de 7,70% e uma amplitude de 3,68% entre as classes de orientação norte (maior valor, 9,64%) e sul (menor valor, 5,97%). A banda do infravermelho próximo foi a que apresentou tanto a maior média entre as bandas, quanto a maior amplitude de variação entre as classes de orientação de vertentes, sendo que esta banda apresentou um valor médio de 24,31% e uma amplitude de 14,65% verificada entre as classes de orientação norte (maior valor, 31,83%) e sul (menor valor, 17,79%).

Considerando os dados normalizados da reflectância das bandas RapidEye em função da classe de orientação sul (Figura 22a) foi verificado que as bandas que apresentaram valores mais representativos ao estudo foram as da borda do vermelho e infravermelho próximo, pois apresentaram as maiores variações entre as classes como maior e menor iluminação, sendo que para a borda do vermelho foi verificado um acréscimo de 61,65% entre as classes norte e sul, para a banda do infravermelho próximo identificou-se uma variação de 85,25% na reflectância entre as mesmas classes. Enquanto que para as bandas da região do visível foram verificadas variações menores, sendo que entre as classes norte e sul foi verificada uma variação de 18,13% na banda do azul, 33,66% para a banda do verde e 21,43% para a banda do vermelho.

Em função das classes de orientação de vertentes, os valores normalizados das classes norte, nordeste, leste e noroeste apresentaram as maiores variações em relação à classe sul, sendo que apenas na classe sudoeste, nas bandas do visível foram encontrados valores indicativos de variação inferior a da classe sul.

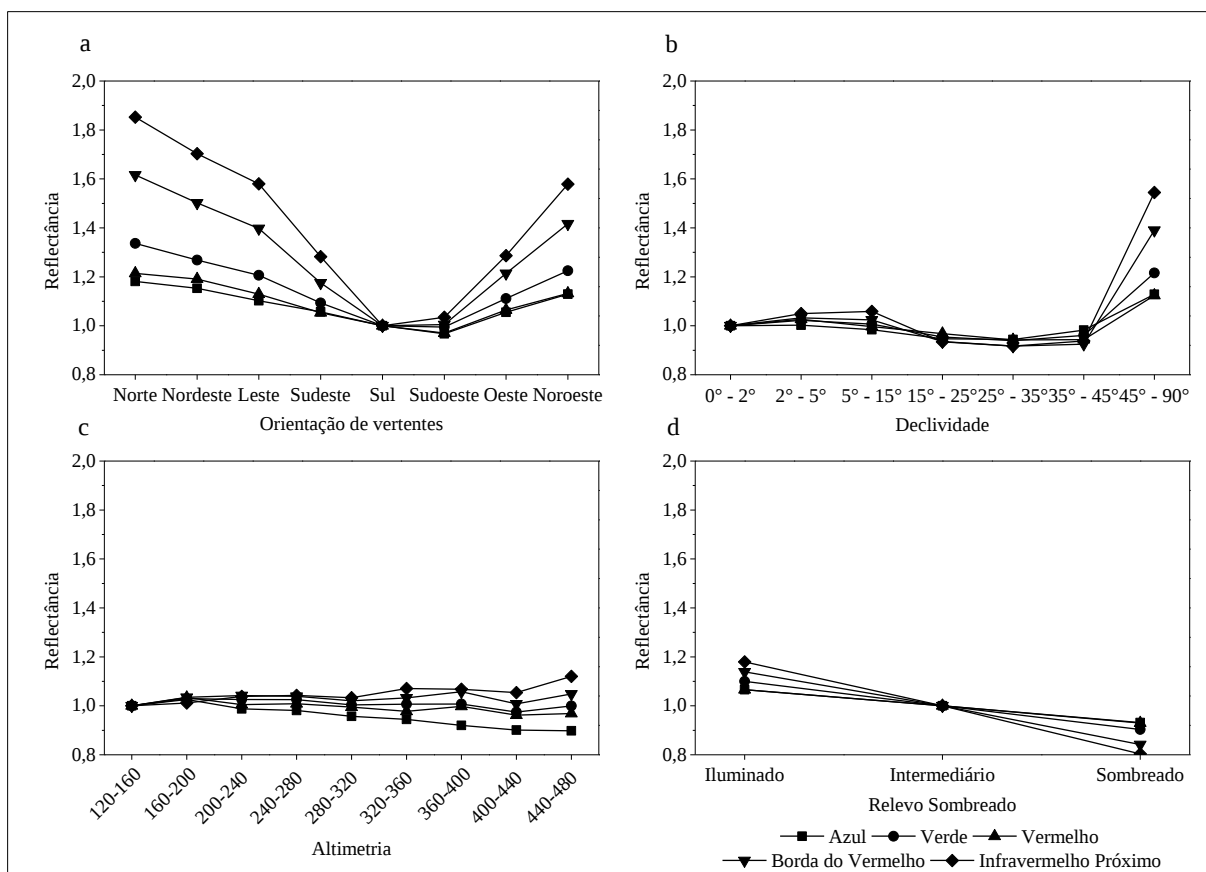


Figura 12 – Variações das reflectâncias normalizadas em função das classes de menor reflectância, sendo a classe sul para a orientação de vertentes (a), a classe de 0° a 2° para a declividade (b), a classe de 120 a 160 metros para altimetria (c) e a classe de padrão de iluminação intermediário para o relevo sombreado (d) na data de 28 de junho de 2012.

Em relação a declividade as reflectâncias amostradas (Figura 22b) foram um pouco mais elevadas de 0 a 15°, após isso ocorreu um decréscimo nas médias e um pico nas reflectâncias médias em áreas com declividade acima de 45°. Igualmente como ocorrido com a orientação de vertentes, as bandas da borda do vermelho e infravermelho próximo apresentaram as maiores variações dos valores médios de reflectância em função da declividade.

Estas variações correspondem na banda da borda do vermelho a um valor médio de reflectância de 8,00% e uma amplitude de 3,67% verificada entre as áreas com declividade entre 25° - 35° (maior valor, 10,78%) e 25° - 35° (menor valor, 7,11%). Enquanto que a banda do infravermelho próximo apresentou a maior média e a maior amplitude de variação entre as demais bandas em função da declividade, sendo que esta apresentou um valor médio de 25,34% e uma amplitude de 14,95% verificada entre as áreas com declividade entre 45° - 90° (maior valor, 36,81%) e 24° - 35° (menor valor, 21,86%). Nesse ponto, cabe ressaltar que os valores da reflectância em função da declividade não foram analisados de forma

combinada com a orientação de vertentes. Assim, uma declividade alta para o norte pode apresentar um valor de reflectância diferente da reflectância para a mesma classe de declividade, mas com orientação para o sul ou sudoeste. Novos estudos, discriminando as encostas com declividades semelhantes devem ser conduzidos para as distintas orientações de vertentes, afim de quantificar melhor o efeito dessa variável sobre os produtos de sensoriamento remoto.

Dentre as bandas da região do visível do espectro eletromagnético, a banda do verde foi a que apresentou os maiores e mais significativos ao estudo, sendo a média de reflectância de 5,01% e a amplitude de variação de 1,37% registrada nas áreas de com declividade entre 45° e 90° (maior valor, 6,01%) e 25° e 35° (menor valor, 4,64%). Enquanto que as bandas do azul e do vermelho apresentaram baixos valores, devido às características de grande absorção e baixa reflectância da vegetação nestas duas bandas.

De acordo com as características apresentadas pelas bandas em função da declividade (Figura 21b), os coeficientes de variação (CV) calculados sobre os valores amostrados indicaram que de todas as bandas, a que apresentou valores mais estáveis foi a banda do vermelho, em função do baixo coeficiente verificado de 17,28%. As outras duas bandas da região do visível apresentaram CV mais elevados em relação a banda do vermelho, sendo verificado 24,60% para a banda do azul e 22,72% para a banda do verde. A banda da borda do vermelho apresentou um CV com valor de 32,68% e a banda do infravermelho próximo 40,19%, estes valores elevados indicam uma grande variação ocorrida tendo em questão as características do estudo pode-se dizer que estas variações ocorrem em função da diferença de iluminação entre as classes de declividade. Estas medidas caracterizam uma menor proximidade dos valores encontrados em relação a reflectância natural do dossel vegetativo.

Considerando os valores normalizados de reflectância em função da classe 0° - 2° (Figura 22b) foi verificado que as bandas da borda do vermelho e do infravermelho próximos apresentaram-se mais sensíveis as variações de declividade devido as suas maiores amplitudes de variação. No que diz respeito as classes, os valores normalizados de reflectância apresentaram menor variação nas classes entre 5° e 45° em relação a classe 0° - 2°, o que indicam que nestas classes os valores de reflectância apresentaram-se mais baixos em todas as bandas. Enquanto que na classe de 45° - 90°, em todas as bandas foram verificadas maiores variações em relação as demais classes, sendo nesta classe verificados os valores mais significativos de reflectância amostrados em função da declividade.

A variação nas altimetrias apresentou-se de forma menos acentuada em relação as demais variáveis topográficas, com os valores médios apresentando baixa amplitude sem picos de

decréscimo significativos. A avaliação dos dados contidos no gráfico da Figura 21c mostrou que as bandas do verde, borda do vermelho e infravermelho próximo apresentaram as maiores variações de reflectância, da mesma forma como verificado nos gráficos anteriores. A banda do verde mostrou uma média de 4,97% superior as outras bandas da região do visível, que apresentaram 2,94% (banda do azul) e 3,89% (banda do vermelho). Embora a banda do verde apresente maior reflectância entre as bandas do visível, a banda do azul foi a que apresentou a maior amplitude de variação, sendo esta de 0,39% verificada entre as áreas com altimetria entre 160 e 200 metros (maior valor, 3,15%) e 440 e 480 metros (menor valor, 2,76%), enquanto que as amplitudes verificadas nas bandas do verde e vermelho foram de 0,27% e 0,28%, respectivamente. As bandas da borda do vermelho e infravermelho próximo apresentaram valores médios de reflectância de 7,82% e 24,26%, respectivamente, os quais caracterizam-se por serem os valores médios de reflectância mais elevados em relação as demais bandas. Estas duas bandas apresentaram amplitudes de variação de 0,44% verificada para a banda da borda do vermelho entre as áreas com altimetria entre 360 e 400 metros (maior valor, 8,02%) e 120 e 160 metros (menor valor, 7,59%), enquanto que a banda do infravermelho próximo apresentou uma amplitude de variação de 2,78% verificada entre as áreas com altimetria entre 440 e 480 metros (maior valor, 25,91%) e 120 e 160 metros (menor valor, 23,13%). É importante destacar que a altitude em si não provoca alterações na resposta espectral da floresta, mas leva a modificações nas características fitossociológicas e estruturais da vegetação que podem impactar nas imagens. Assim, a relação é indireta.

Dentre as características apresentadas pelas bandas em função da altimetria, os coeficientes de variação calculados sobre os valores amostrados indicaram que de todas as bandas a que apresentou valores mais estáveis foi a banda do vermelho, em função do baixo CV verificado de 14,72%. As outras duas bandas da região do visível apresentaram CV de 22,43% (banda do azul) e 17,32% (banda do verde). A banda da borda do vermelho apresentou um CV com valor de 21,07% e a banda do infravermelho próximo 26,11%, ambos os valores médios, indicativos de grande variação e menor proximidade dos valores avaliados em relação a reflectância natural do dossel vegetativo.

Os valores normalizados das reflectâncias indicaram que em função da altimetria (Figura 22c) as bandas que mais apresentaram sensibilidade as variações das condições de iluminação foram as bandas da borda do vermelho e do infravermelho próximo, as quais apresentaram variações positivas em função de todas as classes, sendo verificadas amplitudes de 12,02% para a banda do infravermelho próximo e 4,85% para a banda da borda do vermelho. Em relação as bandas da região do visível, a banda do azul foi a que apresentou a maior parte de suas variações

negativas, apresentando um decréscimo de 10,18% entre as classes 120 – 160 e 440 – 480, devido seus valores amostrados nas classes acima de 200 metros serem menores do que o valor da classe de 120 – 160, utilizada como base para a normalização. As bandas do verde e do vermelho também apresentaram variações negativas, de 0,02% para a banda do verde e 3,15% para a banda do vermelho, devido a valores amostrados mais baixos, principalmente verificados nas duas classes dispostas entre 400 e 480 metros.

Em relação ao relevo sombreado, os valores médios das reflectâncias apresentaram as maiores medidas associadas as classes com padrão iluminado. O gráfico da Figura 21d mostrou a existência de uma tendência de decréscimo nos valores médios amostrados de todas as bandas, sendo esta verificada entre as classes de áreas iluminadas e sombreadas.

Em relação as bandas RapidEye da região do visível foi verificado que estas apresentam, igualmente como nas demais variáveis analisadas, menores amplitudes de variação em relação as bandas da borda do vermelho e infravermelho próximo, em função da baixa reflectância que a vegetação apresenta nestas bandas, sendo verificadas amplitudes de 0,39% para a banda do azul, 0,97% para a banda do verde e 0,52% para a banda do vermelho.

As variações mais significativas da reflectância foram verificadas nas bandas da borda do vermelho e do infravermelho próximo, que apresentaram uma amplitude de variação de 2,33% e 9,22%, respectivamente, sendo nestas bandas apresentadas as maiores médias de reflectância em relação as demais bandas avaliadas, sendo de 7,79% para a banda da borda do vermelho e 24,35% para o infravermelho próximo. As demais bandas, da região do visível apresentaram médias mais brandas dos valores de reflectância, sendo: 2,88% (banda do azul), 4,93% (banda do verde) e 3,83% (banda do vermelho).

Por meio da análise do gráfico da Figura 21d verificou-se que os menores valores médios de reflectância estão associados as áreas sombreadas, sendo identificado este mesmo padrão para todas as cinco bandas RapidEye (conforme mostrado na Tabela 5), o que mostra que o efeito da redução da reflectância causado pelo sombreamento afeta todas as bandas. Enquanto que as áreas não afetadas pelo efeito do sombreamento e que apresentaram condições de incidência direta de radiação solar, as áreas iluminadas apresentaram os valores médios amostrados de reflectância mais elevados em todas as cinco bandas.

Tabela 4 – Valores de reflectância médios das bandas RapidEye amostrados em função do fator topográfico de iluminação para a data de 28 de junho de 2012.

Fator topográfico de iluminação	Azul	Verde	Vermelho	Borda do Vermelho	Infravermelho Próximo
Iluminado	3,07%	5,42%	4,08%	8,93%	28,89%
Plano	2,88%	4,93%	3,83%	7,84%	24,49%
Sombreado	2,68%	4,45%	3,56%	6,60%	19,68%

As áreas com padrão de iluminação intermediário entre as condições de sombreamento e iluminação apresentaram valores médios amostrados de reflectância medianos em relação as demais classes, embora estes apresentem uma pequena tendência a estarem mais próximos dos valores de áreas iluminadas, sendo justificado pelas características destas áreas que, embora não apresentem incidência direta de radiação solar, a iluminação recebida permite uma maior reflectância em relação as que estão sujeitas as condições de sombreado.

Com relação a avaliação do coeficiente de variação, a partir das medidas de reflectância amostradas foram obtidos valores baixos e médios de acordo com a classificação adaptada de Pimentel-Gomes (2000), sendo verificados baixos valores de CV associados as bandas da região do visível, sendo estes 6,73% para a banda do azul, 9,83% para a banda do verde e 6,83% para a banda do vermelho. Estes valores indicam que as condições de iluminação não causaram grande influência nas medidas de reflectância.

As bandas da borda do vermelho e infravermelho próximo apresentaram valores médios de CV, sendo estes 14,97% e 18,93% respectivamente. Estes valores mostram que estas bandas apresentam uma maior influência na reflectância em função das condições de iluminação. Esta característica apresentada pelas bandas em relação as medidas de CV podem estar diretamente relacionadas ao grau de reflectância que a vegetação apresenta em cada banda. Neste caso, por se tratar de um estudo florestal, as bandas que apresentam maior reflectância em função da vegetação serão as que irão apresentar maiores variações em relação as condições de iluminação em que a vegetação está submetida.

Analisando os dados normalizados a partir das áreas intermediárias (Figura 22d) foi possível verificar que igualmente como ocorreu nas demais variáveis analisadas, as bandas mais sensíveis as condições de iluminação foram as bandas da borda do vermelho e do infravermelho próximo, que apresentaram variações elevadas tanto para áreas iluminadas, quanto para as áreas sombreadas. As bandas da região do visível também apresentaram variações, porém mais

discretas, com menor amplitude nas medidas, como verificado nas bandas do azul e do vermelho, que apresentaram as menores variações.

Desta forma, os valores de reflectância normalizados em função da classe de áreas planas mostraram a existência de significativas variações em relação as condições de iluminação, sendo que as áreas contidas na classe de áreas iluminadas apresentam uma diferença normalizada maior do que as áreas sombreadas em função da classe de áreas planas.

Analizando os valores de reflectância das bandas RapidEye representados nos gráficos da Figura 23 para a data de outubro, em função das variáveis topográficas orientação de vertentes, declividade, altimetria e fator topográfico de iluminação foi identificado que os mesmos fatos ocorridos com os dados de reflectância analisados para a data de junho ocorreram, porém com intensidade diferente, sendo verificado um acréscimo nos valores médios da reflectância de superfície entre as duas datas e uma menor amplitude entre as variações. Estas mudanças de características apresentam grande influência das mudanças condições de iluminação ocorridas entre as duas datas.

No que diz respeito às variações associadas as classes de orientação de vertentes, as bandas que apresentaram valores mais representativos ao estudo foram as bandas da borda do vermelho e infravermelho próximo, sendo que entre as bandas da região do visível, a banda do verde foi a que apresentou maiores valores de média e amplitude de variação. A banda do verde apresentou uma média de reflectância de 5,59% e uma amplitude de 0,55% registrada entre as classes de orientação norte (maior valor, 5,89%) e sudoeste (menor valor, 5,33%). Por meio dos valores amostrados da banda da borda do vermelho foi possível verificar que esta apresentou valor médio e de amplitude de variação intermediários entre as bandas da região do visível e a região do infravermelho próximo, sendo verificada uma média de reflectância de 11,56% e uma amplitude de 1,52% entre as classes de orientação norte (maior valor, 12,30%) e sul (menor valor, 10,78%). A banda do infravermelho próximo foi a que apresentou tanto a maior média entre as bandas, quanto a maior amplitude de variação entre as classes de orientação de vertentes, sendo que esta banda apresentou um valor médio de 35,67% e uma amplitude de 5,99% verificada entre as classes de orientação norte (maior valor, 38,58%) e sul (menor valor, 32,59%).

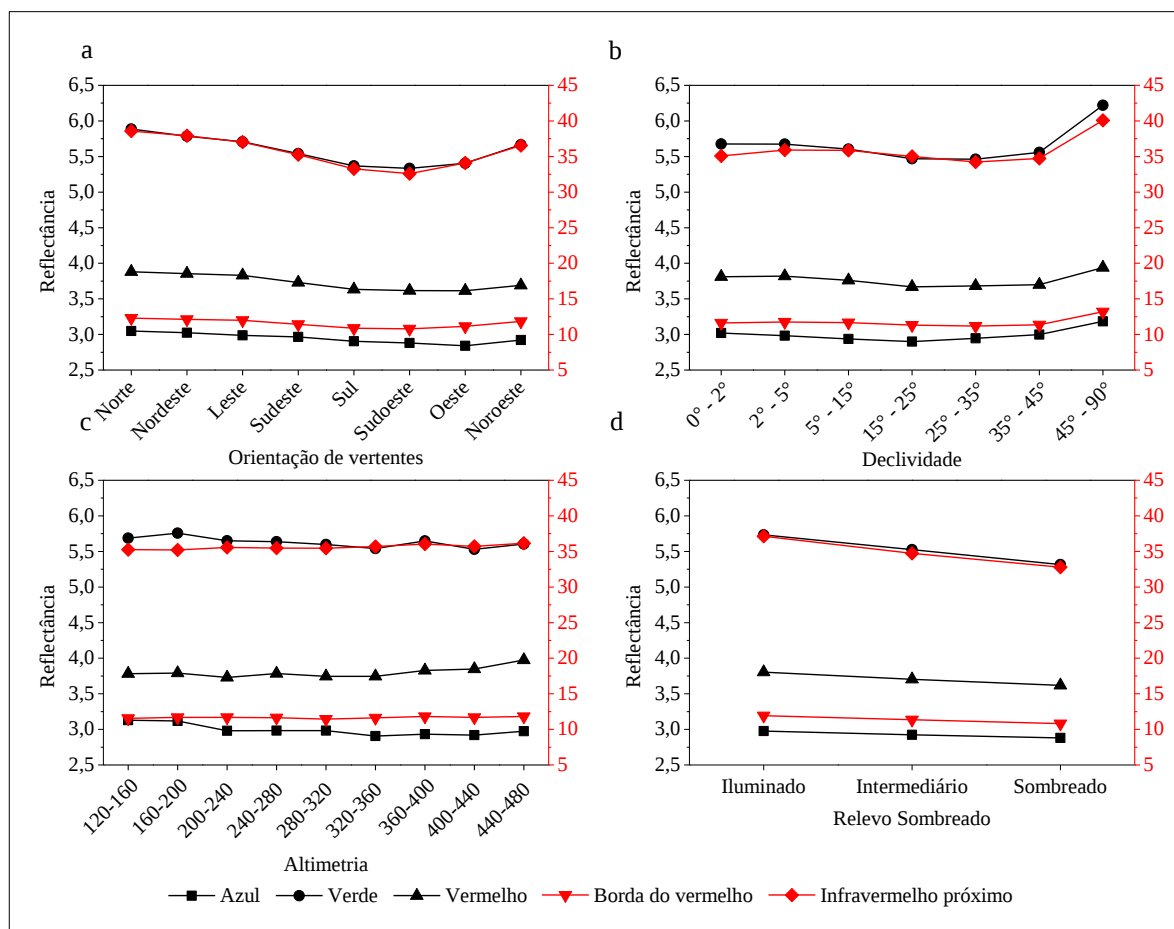


Figura 13 – Variações da reflectância das bandas da cena RapidEye de 17 de outubro de 2012 em função das variáveis topográficas de orientação de vertentes (a), declividade (b), altimetria (c) e relevo sombreado (d). As reflectâncias são dadas em percentagem.

Os valores de reflectância amostrados em função da orientação de vertentes apresentaram coeficientes de variação entre 10,55% e 12,51%. De acordo com a classificação de Pimentel-Gomes (2000) esses valores classificam-se como médios o que indica boa relação destes com a realidade do dossel vegetativo. Os coeficientes de variação verificados nas bandas foram de 12,51% para a banda do azul, 10,55% para a banda do verde, 10,71% para a banda do vermelho, 11,55% para a borda do vermelho e 12,41% para o infravermelho próximo. Estes valores indicam uma melhor distribuição das condições de iluminação entre todas as vertentes. Esses valores são inferiores aos encontrados para a data de junho.

Considerando os dados normalizados da amostragem em função da orientação de vertentes para a data de outubro (Figura 24a) foram verificadas menores variações entre as classes em todas as bandas, sendo que as da borda do vermelho e do infravermelho próximo apresentaram da mesma forma como verificado na data de junho as maiores variações, as

quais ocorreram entre as classes sul e norte, sendo verificada uma variação de 15,94% para a banda do infravermelho próximo e de 13,12% para a borda do vermelho. Nas bandas da região do visível, os maiores acréscimos na reflectância também ocorreram entre as classes sul e norte, sendo verificados 4,99% para a banda do azul, 9,61% para a banda do verde e 6,79% correspondente a banda do vermelho. Valores próximos também foram verificados na classe nordeste, enquanto que nas demais a variação dos valores normalizados de reflectância foi baixo, como na classe do sudoeste, que apresentou valores normalizados de reflectância negativos em relação aos da classe sul para todas as classes, o que indica que as variações ocorridas na classe sudoeste foram menores do que na classe sul.

Os dados normalizados mostraram que as bandas apresentaram da mesma forma que na data de junho maiores variações associadas as classes norte, nordeste, leste e noroeste, enquanto que as classes sudeste, sul, sudoeste e oeste apresentaram os menores valores das bandas.

As reflectâncias analisadas em função da declividade apresentam uma menor variação quando comparadas aos dados de junho, no entanto as variações ocorridas na data anterior também podem ser vistas em outubro como a elevação dos valores de reflectância entre as áreas com declividades entre 0 a 15°, com exceção da banda do azul que não apresentou o mesmo comportamento, após isso ocorreu um decréscimo nas médias das áreas com declividades entre 15° a 25° em todas as bandas, exceto na do infravermelho próximo que apresentou decréscimo entre as declividade de 25° e 35°.

Da mesma forma como ocorrido com as médias da reflectância de junho, em outubro, as bandas também apresentaram um pico nas reflectâncias médias em áreas com declividade acima de 45°, sendo este mais acentuado na banda do verde e principalmente na borda do vermelho e infravermelho próximo.

Para a banda da borda do vermelho as variações correspondem a um valor médio de reflectância de 11,72% e uma amplitude de 2,02%, verificada entre as áreas com declividade entre 25° - 35° (maior valor, 13,20%) e 45° - 90° (menor valor, 11,18%). Enquanto que a banda do infravermelho próximo apresentou a maior média e a maior amplitude de variação entre as demais bandas em função da declividade, sendo que esta apresentou um valor médio de 35,84% e uma amplitude de 5,86% verificada entre as áreas com declividade entre 45° - 90° (maior valor, 40,08%) e 24° - 35° (menor valor, 34,22%).

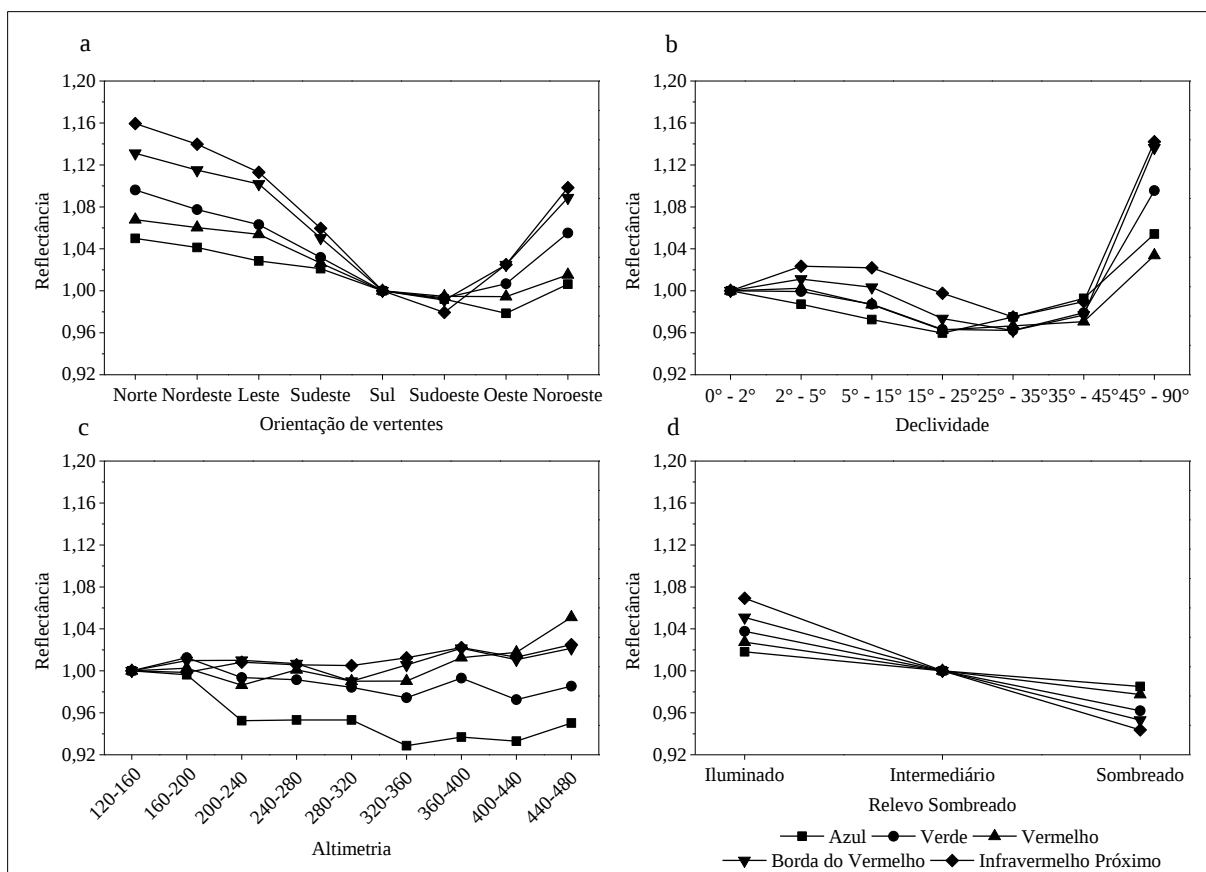


Figura 14 – Variações das reflectâncias normalizadas em função das classes de menor reflectância, sendo a classe sul para a orientação de vertentes (a), a classe de 0° a 2° para a declividade (b), a classe de 120 a 160 metros para altimetria (c) e a classe de padrão de iluminação intermediário para o relevo sombreado (d) na data de 17 de outubro de 2012.

Dentre as bandas da região do visível do espectro eletromagnético, a banda do verde foi a que apresentou os maiores mais significativos ao estudo, sendo a média de reflectância de 5,67% e amplitude de variação de 0,76% registrada nas áreas de com declividade entre 45° e 90° (maior valor, 6,22%) e 25° e 35° (menor valor, 5,46%). Enquanto que as bandas do azul e do vermelho apresentaram valores médios de 3% e 3,77%, respectivamente, enquanto que nestas bandas foram registradas as amplitudes de variação mais baixas, sendo verificada uma amplitude de 0,29% para a banda do azul e 0,27% para a banda do vermelho.

De acordo com as características apresentadas pelas bandas em função da declividade, os coeficientes de variação calculados sobre os valores amostrados indicaram que de todas as bandas apresentaram valores médios de acordo com a classificação de Pimentel e Gomes (2000), estes valores indicam uma boa relação dos dados com as características reais apresentadas pela reflectância dossel, não apresentando significativas influências das

condições de iluminação da área de estudo para a data de outubro, o que indica uma melhor iluminação da área em função do baixo ângulo zenital solar.

A normalização dos dados das reflectâncias amostradas em função dos parâmetros de declividade (Figura 24b) mostrou que os valores mais expressivos encontram-se na classe de 45° - 90° , em todas as bandas, principalmente as da borda do vermelho e do infravermelho próximo que demonstraram as maiores variações entre as classes, sendo estas de 13,62% e 14,21% respectivamente para as bandas da borda do vermelho e do infravermelho próximo. As demais bandas apresentaram baixa variação nos dados destacando-se que as bandas do azul, verde e vermelho apresentaram variações negativas em relação as cinco classes distribuídas entre o intervalo de declividade de 2° e 45° .

A variação nas altimetrias (Figura 23c) apresentou-se da mesma forma que na data de junho porém foi possível verificar um acréscimo nos valores médios entre as duas datas. De forma menos acentuada em relação as demais variáveis topográficas, os valores médios apresentaram baixa amplitude sem picos de acréscimo, nem decréscimos significativos, embora sendo possível interpretar detalhes da banda do vermelho que mostrou um acréscimo na reflectância de acordo com o aumento de altitude. Este mesmo comportamento foi verificado nas bandas da borda do vermelho e do infravermelho próximo. O contrário ocorreu com as bandas do azul e verde que aumentaram a reflectância conforme o aumento da altitude.

Os valores mais significativos de reflectância foram verificados nas bandas do verde, borda do vermelho e infravermelho próximo. A banda do verde mostrou uma média de 5,63% superior as outras bandas da região do visível, que apresentaram 2,99% (banda do azul) e 3,80% (banda do vermelho). Embora a banda do verde apresente maior reflectância entre as bandas do visível, a banda do vermelho foi a que apresentou a maior amplitude de variação, sendo esta de 0,24%, verificada entre as áreas com altimetria entre 200 e 240 metros (maior valor, 3,73%) e 440 e 480 metros (menor valor, 3,97%). As bandas da borda do vermelho e infravermelho próximo apresentaram valores médios de reflectância de 11,66% e 35,62%, respectivamente, os quais se caracterizam por serem os valores médios de reflectância mais elevados em relação as demais bandas. Estas duas bandas apresentaram amplitudes de variação de 0,36% verificada para a banda da borda do vermelho entre as áreas com altimetria entre 360 e 400 metros (maior valor, 11,81%) e 280 e 320 metros (menor valor, 11,45%), enquanto que a banda do infravermelho próximo apresentou uma amplitude de variação de 0,93% verificada entre as áreas com altimetria entre 440 e 480 metros (maior valor, 36,15%) e 120 e 160 metros (menor valor, 35,21%). Novamente, cabe destacar que as variações entre altimetria e parâmetros espectrais são indiretas (mudanças nas características da vegetação).

Dentre as características apresentadas pelas bandas em função da altimetria, os coeficientes de variação calculados sobre os valores amostrados indicaram que de todas as bandas a que apresentou valores mais condizentes com as características naturais da vegetação foi a banda do verde, em função do baixo CV verificado de 9,97%. As demais bandas da região do visível apresentaram CV de 13,47% (banda do azul) e 12,29% (banda do verde). A banda da borda do vermelho apresentou um CV com valor de 10,13% e a banda do infravermelho próximo 11,11%, ambos os valores médios, indicativos de variação e menor proximidade dos valores avaliados em relação a reflectância natural do dossel vegetativo.

Em relação ao relevo sombreado para a data de outubro, a análise do gráfico da Figura 23d permitiu verificar por meio dos valores de reflectância que as bandas do verde, borda do vermelho e infravermelho próximo foram as mais sensíveis as condições de iluminação, devido aos elevados valores de reflectância verificados nas áreas iluminadas (conforme mostrado na Tabela 6), embora na data de outubro ocorra uma menor amplitude de variação da reflectância em relação as variações de iluminação locais do que na data de junho.

Tabela 5 – Valores de reflectância médios das bandas RapidEye amostrados em função do fator topográfico de iluminação para a data de 17 de outubro de 2012.

Relevo sombreado	Azul	Verde	Vermelho	Borda do Vermelho	Infravermelho Próximo
Iluminado	2,98%	5,73%	3,80%	11,93%	37,14%
Plano	2,92%	5,53%	3,70%	11,35%	34,73%
Sombreado	2,88%	5,31%	3,62%	10,82%	32,78%

Neste sentido, a menor amplitude de variação dos valores de reflectância verificada principalmente nas bandas do visível está relacionada a dois fatores principais: o aumento da iluminação da área do PET, e ao desenvolvimento fenológico da vegetação, que nesta época apresenta maior produção de clorofilas, o que reduz a reflectância das bandas do visível e eleva nas bandas da borda do vermelho e principalmente no infravermelho próximo, que foram as bandas que apresentaram maior amplitude entre as variações de iluminação. Desta forma, a banda do verde apresentou uma amplitude de 0,42%, enquanto que a banda da região da borda do vermelho apresentou uma amplitude 1,11% e a banda do infravermelho próximo 4,36% de amplitude na reflectância entre as áreas iluminadas e sombreadas.

As bandas do azul e do vermelho apresentaram baixa sensibilidade as variações de iluminação, devido a vegetação apresentar baixa reflectância nestas duas bandas. Desta forma, analisando os dados de reflectância foram verificadas amplitudes de 0,1% e 0,19% respectivamente para as bandas do azul e do vermelho.

Os coeficientes de variação calculados sobre os valores amostrados de reflectância mostraram-se proporcionais de acordo com o nível de reflectância apresentado pela vegetação em cada banda. Nas bandas em que a vegetação apresentou reflectância mais elevada foram verificados os seguintes valores de CV: 4,89% para a banda da borda do vermelho e 6,26% para a banda do infravermelho próximo. Embora sejam as bandas que apresentam maior reflectância, os valores classificados como baixos de acordo com Pimentel-Gomes (2000) mostram uma reduzida diferença entre as condições de iluminação das áreas, a ponto destas não ocasionarem oscilações significativas nos valores de reflectância em função das condições de iluminação presentes.

As bandas da região do visível também apresentaram valores baixos de CV indicativos de baixa variação da reflectância em relação as condições de iluminação. Os valores de CV verificados correspondem a 1,65% para a banda do azul, 3,79% para a banda do verde e 2,5% para a banda do vermelho. Estas bandas, devido apresentarem baixa reflectância para alvos vegetativos também apresentam consequentemente menor variação em função das condições de iluminação.

Considerando os valores normalizados em função da classe de iluminação de áreas planas (Figura 24d) foi possível verificar que as bandas da borda do vermelho e infravermelho próximo foram as que apresentaram as maiores variações em relação as condições de iluminação com valores normalizados de 1,0509 e 1,0691 respectivamente para as bandas da borda do vermelho e infravermelho próximo, sendo que estas também apresentaram grande variação negativa em relação as áreas sombreadas com valores normalizados de 0,9530 para a banda da borda do vermelho e 0,9437 para a banda do infravermelho próximo. Desta forma, os valores normalizados em função da classe de áreas planas mostraram maior amplitude para as áreas iluminadas do que para as áreas sombreadas.

6.5.2 Análise de dispersão entre reflectância e relevo sombreado

A análise das reflectâncias das duas datas mostrou a ocorrência de um significativo impacto causado pelas variações de iluminação, sobretudo das áreas sombreadas, as quais reduzem a reflectância de áreas afetadas afetando principalmente os índices de vegetação que

apresentam resultados muitas vezes conduzidos pelas condições de iluminação. Os gráficos da Figura 27 mostraram variações da reflectância em função do relevo sombreado. Fica claro que a maior dependência do infravermelho próximo das condições iluminação do que a banda do vermelho.

Comparando os gráficos das Figuras 25a e 25b foi possível verificar que a banda do infravermelho apresentou uma maior amplitude, sendo esta decorrente do aumento que a reflectância apresenta em relação as áreas iluminadas, sendo verificado um aumento gradual em relação as condições de iluminação (valores próximos a zero correspondem a áreas sombreadas, enquanto que os valores próximos a um identificam áreas iluminadas). A banda do vermelho, no entanto, apresentou uma baixa variação embora crescente em função das condições de iluminação locais. Na data de junho as condições de iluminação levam a um maior sombreamento para a área do PET, sendo que estas condições destacam as estruturas não foliares que apresentam maior reflectância no vermelho.

Na data de outubro a reflectância da banda do vermelho avaliada em função do relevo sombreado não apresentou uma variação significativa entre as diferentes condições de iluminação, o que mostra que a maior homogeneidade das condições de iluminação do PET nesta data aliada a maior produção de pigmentos fotossintetizantes (brotamento) passam a ser os responsáveis pela resposta da vegetação nesta banda. A banda do infravermelho próximo apresentou uma maior amplitude de acordo com as características de iluminação da área do PET.

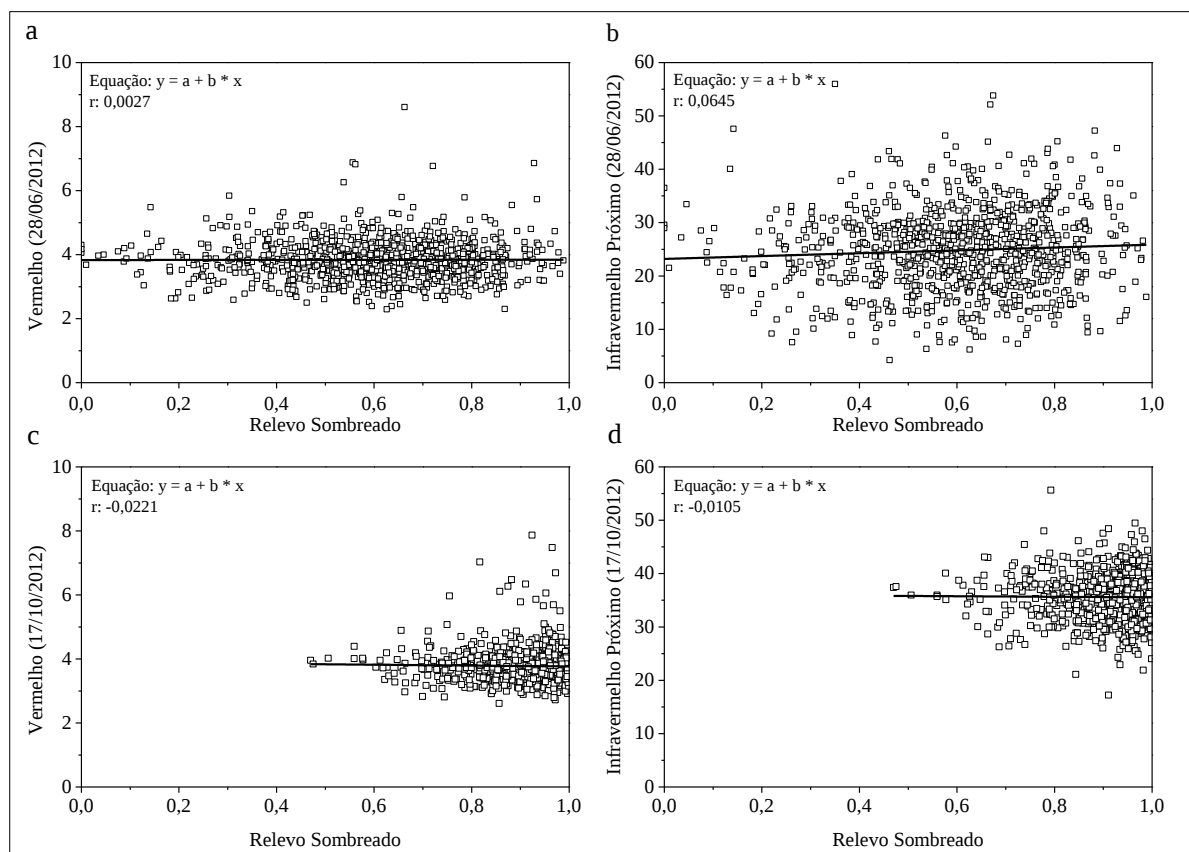


Figura 15 – Gráficos de dispersão entre reflectância e relevo sombreado para as bandas do vermelho (a) e infravermelho próximo (b) para a data de junho e vermelho (c) e infravermelho próximo (d) para a data de outubro. Os valores de reflectância das bandas são representados em porcentagem.

6.5.3 Dados dos índices de vegetação em função dos parametros da modelagem topográfica

6.5.3.1 Índices NDVI e EVI em função dos parâmetros da modelagem topográfica

Os índices de vegetação NDVI e EVI amostrados em função das variáveis topográficas de orientação de vertentes, declividade, altimetria e fator topográfico de iluminação apresentaram significativas variações em relação às condições de sombreamento, geradas em função das características do relevo do PET. O relevo associado as mudanças sazonais na geometria de iluminação da área cria extensas áreas de sombreamento, as quais interferem na reflectância espectral dos alvos mascarando ou até mesmo atribuindo valores diferentes para alvos idênticos sobre diferentes condições de iluminação. Deste modo, estas condições interferiram de forma mais significativa nos valores médios dos índices NDVI e

EVI para a data de 28 de junho de 2012, na qual as condições de sombreamento eram maiores do que na data de 17 de outubro do mesmo ano. Novamente, cabe destacar que as variações do IAF não foram avaliadas.

Embora haja uma variação natural destes índices entre as duas datas avaliadas em função da mudança nas condições fenológicas da vegetação do PET, sendo verificado um acréscimo nos valores dos índices entre as duas datas, a influência das condições de sombreamento pode ser percebida analisando os gráficos dispostos na Figura 26, os quais ilustram a resposta dos índices de vegetação em função das características de iluminação presentes em cada classe das variáveis topográficas. Em geral, as diferenças diminuem de junho para outubro devido a um efeito combinado de redução do AZS e o aumento do IAF, tornando o dossel mais isotrópico.

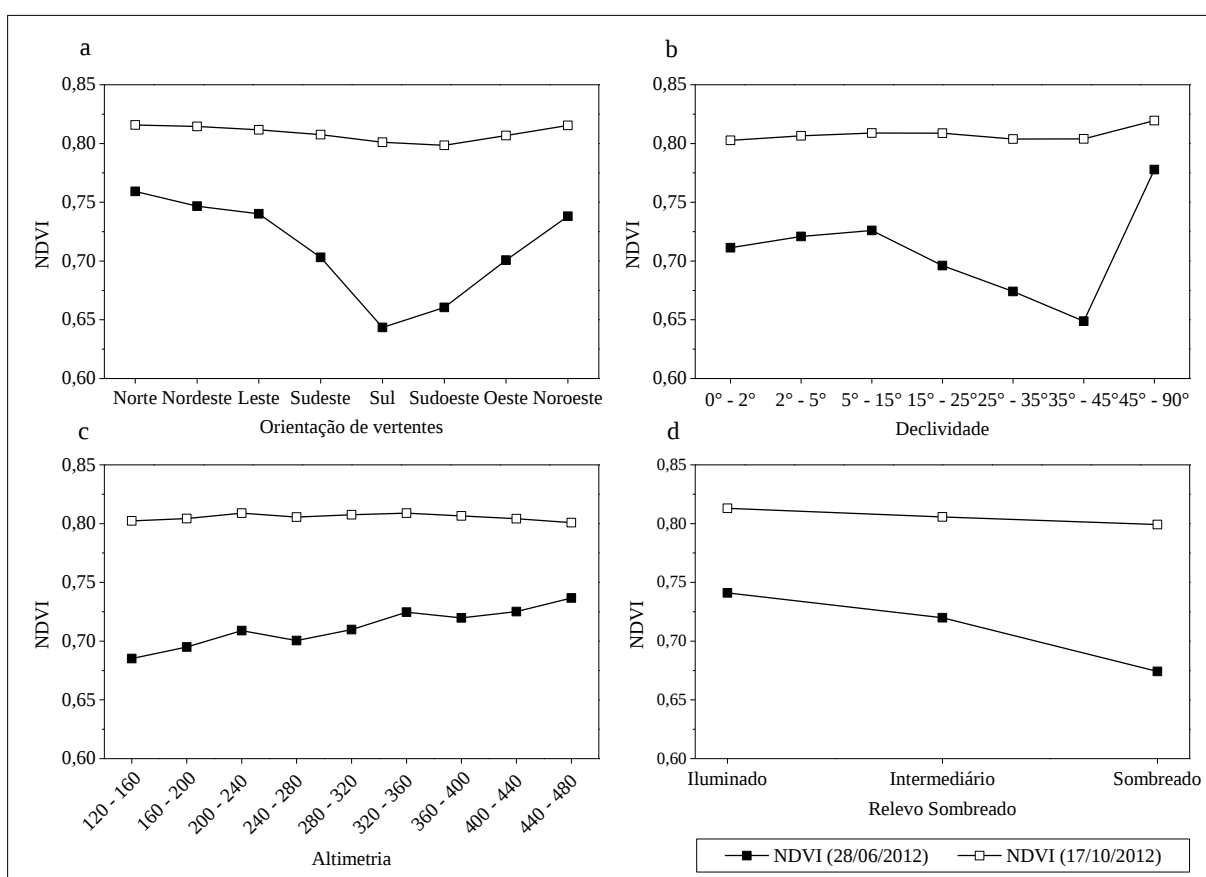


Figura 16 – Gráficos das variações do índice de vegetação NDVI em função das variáveis topográficas de orientação de vertentes (a), declividade (b), altimetria (c) e relevo sombreado (d) para as duas datas das cenas RapidEye.

Analisando as médias amostradas de NDVI em função da orientação de vertentes para as duas datas foram verificadas variações nas curvas do gráfico da Figura 26a, sendo que as médias com data de 28 de junho de 2012 apresentaram uma maior variação em relação as médias com data de 17 de outubro de 2012. Os valores de NDVI na data de junho apresentaram uma amplitude de variação de 0,1159, tendo o valor máximo de 0,7593 associado a classe de orientação Norte, e valor mínimo de 0,6434 verificado em função da classe de orientação Sul. Os valores médios de NDVI apesar de apresentarem uma menor variação na data de outubro apresentando uma amplitude de 0,0174, com o valor máximo médio de 0,8158 associado a classe de orientação Norte, e valor mínimo de 0,7984 verificado diferentemente da data de junho, em função da classe de orientação Sudoeste.

A análise dos valores de NDVI em função das classes de orientação de vertentes permitiu verificar uma diferença entre o padrão de variação do índice NDVI entre as duas datas, com ocorrências de valores indicativos de maior variação entre os valores máximo e mínimo na data de junho, enquanto que na data de outubro foi verificada uma menor ocorrência de variação entre o NDVI e as classes de orientação de vertentes.

As condições de iluminação em função da declividade do terreno variam de acordo com suas amplitudes na medida em que as classes correspondentes as áreas planas a suavemente onduladas, com baixa declividade, situada entre 0° a 15° apresentam condições de iluminação condicionadas de acordo com a altimetria, na qual as áreas com baixo gradiente altimétrico e clinográfico podem apresentar condições de sombreamento exercidas pela interferência de áreas adjacentes com maior altimetria, enquanto que as áreas com gradiente clinográfico mais acentuado (com declividade acima de 15°) apresentam condições de iluminação condicionadas de acordo com a orientação de vertentes.

Neste sentido, a avaliação dos valores médios de NDVI amostrados em função das classes de declividade do terreno mostraram ao longo das curvas do gráfico da Figura 26b duas tendências de comportamento para cada data. A primeira tendência analisada faz referência a um acréscimo nos valores médios de NDVI até a declividade de 15°. Este acréscimo ocorrido nas duas datas é mais acentuado na data de junho, a qual apresenta uma amplitude de 0,0146, enquanto que esta amplitude para a data de outubro é de apenas 0,0063, esta amplitude ocorreu nas áreas com as mesmas classes nas duas datas (0° - 2°, 2° - 5° e 5° - 15°). A segunda tendência apresentou uma maior amplitude de variação, causada por um decréscimo nos valores médios de 0,0772 na curva das médias de NDVI para a data de junho, ocorrido entre as áreas com declividade entre 5° - 15° e 35° - 45°. Na data de outubro foi verificado também um decréscimo nas mesmas classes, no entanto, com uma menor

amplitude nos valores médios de NDVI do que a verificada na data anterior, sendo esta de 0,0050. No entanto a maior variação nos valores médios do NDVI foi verificada para as duas datas nas áreas com declividades acentuadas, entre 35° e 90°, nas quais foram verificadas amplitudes de 0,1290, para a data de junho e 0,0168 para a data de outubro.

Embora as curvas apresentem um comportamento aparentemente semelhante, com acréscimo e decréscimo dos valores ocorrendo sobre as mesmas classes entre as duas datas, a curva da data de junho apresenta-se com variações com maiores amplitudes, embora com valores médios inferiores aos registrados na curva da data de outubro, que embora apresente valores médios mais elevados, mostraram baixas amplitudes de variação. Neste sentido, as diferenças de amplitudes ocorridas em função das classes de declividade estão relacionadas com a variação sazonal da geometria de iluminação da área do PET, sendo na data de junho verificada uma maior ocorrência de sombreamento entre as formas do relevo, sendo que de acordo com a declividade podem ocorrer áreas mais sujeitas a iluminação ou ao sombreamento.

Analisando o gráfico dos valores médios de NDVI em função da altimetria do PET foi verificada para a data de junho uma maior variação nas medidas do índice, o qual apresentou valor médio mais baixo, sendo 0,6852, associado a classe com menor elevação (120 a 160 metros) e valor médio mais elevado, 0,7367, associado a classe altimétrica com maior elevação (440 a 480 metros). A amplitude dos valores médios apresentados no gráfico foi de 0,0516, sendo a menor amplitude verificada entre as três variáveis topográficas analisadas. Ainda para a data de junho, os valores mais elevados (acima da média) foram verificados nas áreas de maior gradiente altimétrico, entre 320 e 480 metros. Enquanto que os baixos valores de NDVI (abaixo da média) foram verificados nas áreas com gradiente altimétrico mais baixo, entre 120 e 320 metros. Os resultados mostram que o dossel apresenta variações de IAF mais significativas no inverno para as diferentes altitudes.

Para a data de outubro foi verificado um acréscimo nos valores médios de NDVI e uma menor amplitude de variação entre as classes altimétricas. Diferente das características apresentadas pelos valores médios de NDVI em junho, na data de outubro, o valor mais elevado correspondente a 0,8089 foi encontrado associado às classes altimétricas de 200 a 240 metros e 320 a 360 metros, enquanto que o menor valor médio de NDVI 0,8008 foi verificado na classe de maior gradiente altimétrico (440 a 480 metros). Para a data de outubro foi verificada uma amplitude de variação entre os valores máximo e mínimo de 0,0081 caracterizando-se igualmente com a amplitude verificada na data anterior como a menor amplitude de variação encontrada para o NDVI em função das variáveis topográficas.

Em relação ao relevo sombreado, os valores médios amostrados para o NDVI apresentaram um comportamento semelhante ao ocorrido com as medidas amostradas de reflectância (como verificado na Figura 26d), no qual as áreas amostradas iluminadas apresentaram valores médios superiores aos das demais áreas com diferentes condições de iluminação, como as áreas com grande condição de sombreamento, nas quais os valores amostrados apresentaram-se muito baixos, sendo verificado um NDVI de 0,6742 para a data de junho e 0,7992 para a data de outubro. Os valores das áreas com característica de iluminação intermediária apresentaram-se como medianos entre as demais medidas, sendo estes 0,7199 e 0,8056 respectivamente para as datas de junho e outubro, estes valores verificados mais próximos dos valores das áreas iluminadas, que apresentam valores de 0,7411 e 0,8130 respectivamente para as datas de junho e outubro, o que demonstra que as condições de sombreamento ocorrentes em grande parte do PET na data de junho e em menor quantidade na data de outubro tendem a interferir de forma direta nas medidas do índice NDVI, uma vez que as reflectâncias das bandas do vermelho e principalmente do infravermelho próximo sofrem grande oscilação em áreas cujo dossel vegetativo apresenta-se sobre condições de sombreamento.

De acordo com os valores amostrados de NDVI em função das três classes de iluminação estabelecidas foi possível verificar uma amplitude média de 0,0669 entre os valores máximos (áreas iluminadas) e mínimos (áreas sombreadas) para a data de junho. Considerando-se o coeficiente de variação calculado a partir dos valores amostrados foi verificado um valor de 4,81%, sendo este valor considerado um valor baixo, o que indica que os valores de NDVI não apresentaram significativas oscilações em decorrência das condições de iluminação, embora estas sejam mais pronunciadas na data de junho do que em outubro.

Diferente dos valores verificados na data de junho, os valores amostrados na data de outubro apresentaram uma amplitude de apenas 0,0138. Esta baixa amplitude está associada diretamente as condições de iluminação decorrentes das mudanças ocorridas na geometria de iluminação entre as duas datas, com a diminuição do ângulo zenital solar, que proporcionou maior incidência direta de radiação solar, e consequente redução das áreas sombreadas. Desta forma, o valor do coeficiente de variação calculado para os dados de outubro foi de 0,86%, sendo este um valor baixo. Resultados obtidos por Matsushita *et al.* (2007) mostram que o NDVI apresentou um menor coeficiente de variação quando analisado sobre condições de iluminação e em relação ao índice EVI. De acordo com os autores o índice NDVI apresenta baixa sensibilidade as condições de iluminação devido este poder ser escrito sob a forma de uma função de razão simples, o que pode reduzir os efeitos topográficos diretos fazendo com que este índice não apresente consideráveis variações de valores em detrimento dos efeitos topográficos.

De acordo com as medidas apresentadas nos gráficos da Figura 27, o índice de vegetação realçado (EVI) apresentou diferenças nos valores médios atribuídos à vegetação do PET em função das variáveis topográficas analisadas. De maneira geral, o EVI apresentou uma maior variabilidade em relação às diferenças entre as áreas iluminadas e sombreadas do que o NDVI, apresentando grandes decréscimos de valores nas áreas com maior sombreamento.

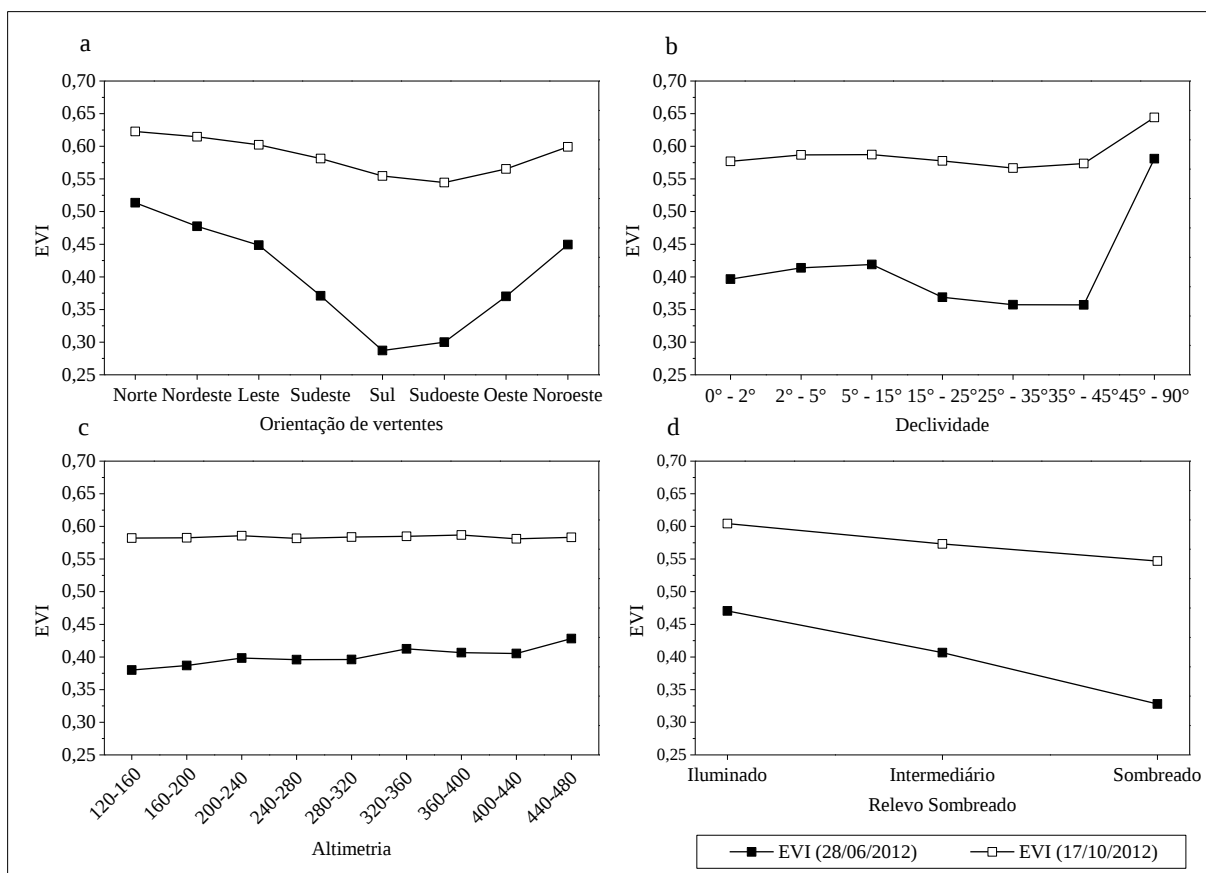


Figura 17 – Gráficos das variações do índice de vegetação EVI em função das variáveis topográficas de orientação de vertentes (a), declividade (b), altimetria (c) e relevo sombreado (d) para as duas datas das cenas RapidEye.

Analisando as médias do EVI em função da orientação de vertentes para as duas datas foram verificadas variações nas curvas do gráfico da Figura 27a, sendo que as médias com data de 28 de junho de 2012 apresentaram uma maior variação em relação as médias com data de 17 de outubro de 2012. Os valores de EVI na data de junho apresentaram uma amplitude de variação de 0,2262, tendo o valor máximo de 0,5135 associado as áreas cujas vertentes apresentam orientação na direção Norte, e valor mínimo de 0,2873 verificado nas áreas com orientação de vertentes na direção Sul.

Os valores médios de EVI apresentaram uma menor variação na data de outubro, os quais apresentaram uma amplitude de 0,0781, com o valor máximo médio apresentado de 0,6226 nas áreas com orientação Norte, e valor mínimo de 0,5445 verificado diferentemente da data de junho, (da mesma forma como ocorreu com o índice NDVI) associado as áreas com orientação na direção Sudoeste. Esta mudança ocorrida entre a ocorrência dos valores médios mínimos em diferentes classes (Sul e Sudeste) é diretamente influenciada pela variação sazonal do ângulo zenital solar entre as duas datas no momento da aquisição das cenas RapidEye, sendo verificado na data de junho um ângulo azimutal solar de 16,37° e 22,31° para a data de outubro.

A avaliação dos valores médios de EVI amostrados em função das classes de declividade do terreno mostrou um comportamento das curvas do gráfico da Figura 27b semelhante ao verificado com os dados do índice NDVI, sendo possível identificar também por meio do gráfico três tipos de variação associadas as áreas do PET, sendo uma de acréscimo nos valores médios verificado nas áreas com declividade entre 0° e 15°. A segunda variação pode ser verificada entre as áreas com declividade entre 15° e 45°, sendo esta variação verificada na data de junho, na qual foi verificado um decréscimo nos valores médios associados a estas áreas. Na data de outubro este decréscimo nos valores ocorre nas áreas com declividade entre 15° e 35°, sendo verificado um posterior acréscimo nos valores a partir das áreas contidas na classe de declividade entre 35° - 45°. A terceira variação identificada foi um pico nos valores de EVI correspondentes a classe de declividade 45° - 90° verificado para as duas datas da mesma forma como ocorreu com os dados do índice NDVI. Em função desta variação acentuada, que representa uma amplitude de 0,2238 nos valores de EVI para a data de junho e 0,0775 para a data de outubro ser verificada tanto para o índice NDVI, quanto para o EVI é possível concluir que as áreas com declividade entre 45° e 90° apresentam uma melhor condição de iluminação do que o restante das áreas.

O EVI analisado em função da altimetria apresentou comportamentos distintos entre as duas datas como mostra o gráfico da Figura 27c, no qual foi verificado na curva representante dos valores médios de EVI para a data de junho uma tendência de acréscimo nos valores relacionado com o aumento da altimetria. Além disto, o EVI apresentou uma maior variação nos valores em função da altimetria na data de junho apresentando uma amplitude de 0,0483 entre os valores máximos e mínimos verificados do que na data de outubro, na qual foi apresentada uma baixa amplitude entre os valores máximo e mínimo encontrados, o que condiciona uma amplitude de 0,0059 entre os valores máximo e mínimo do EVI.

Os valores mais elevados, que são definidos em função das melhores condições de iluminação foram verificados para a data de junho nas áreas com maior gradiente altimétrico, entre 320 a 480 metros. Para a data de outubro, os valores médios de EVI que definem as áreas

com melhor condição de iluminação apresentaram-se associadas as áreas com altimetria entre 200 e 240 metros e entre 280 e 400 metros.

Os valores médios amostrados de EVI mostraram uma tendência muito semelhante aos demais dados já analisados em função das condições de iluminação. Verificou-se a partir do gráfico da Figura 27d uma variação decrescente nos valores de EVI das áreas iluminadas em direção as áreas sombreadas nas duas datas, sendo mais acentuada na data de junho, na qual foi verificado uma amplitude de 0,1424, enquanto que na data de outubro foi identificada uma amplitude de 0,0573. As amplitudes verificadas mostram que os dados do índice EVI foram mais dependentes das condições de iluminação do que na data de outubro.

Os valores médios amostrados mais elevados de EVI foram identificados nas duas datas nas áreas iluminadas, sendo 0,4705 para a data de junho e 0,6043 para a área de outubro, enquanto que os valores mais baixos apresentaram-se nas áreas sombreadas, sendo encontrados valores médios de EVI de 0,3281 para a data de junho e 0,5473 para a data de outubro. As áreas com características de iluminação intermediárias apresentaram um valor médio de EVI de 0,4067 verificado para a data de junho e 0,5731, correspondente à data de outubro.

A análise dos dados do índice EVI amostrados em função do relevo sombreado mostrou que este índice possui uma maior dependência direta das condições de iluminação, apresentando grande influencia dos efeitos topográficos. De acordo com Matsushita *et al.* (2007) o EVI devido ao seu fator de ajuste do solo torna-se muito sensível aos efeitos topográficos.

6.5.4 Índices RENDVI e CIred-edge em função dos parâmetros da modelagem topográfica

Os valores médios do índice de clorofila da borda do vermelho (Figura 28) analisados em função da orientação de vertentes (Figura 28a) apresentaram o mesmo padrão dos índices anteriores, sendo verificada uma grande amplitude de variação na data de junho e uma baixa amplitude nos dados de outubro, embora em ambas as datas seja verificado o mesmo padrão de variação. Desta forma, igualmente aos demais índices analisados, os menores valores do índice CIred-edge foram encontrados nas classes de orientação sudeste, sul, sudoeste e oeste. Já os valores mais elevados foram verificados nas classes norte, nordeste, leste e noroeste.

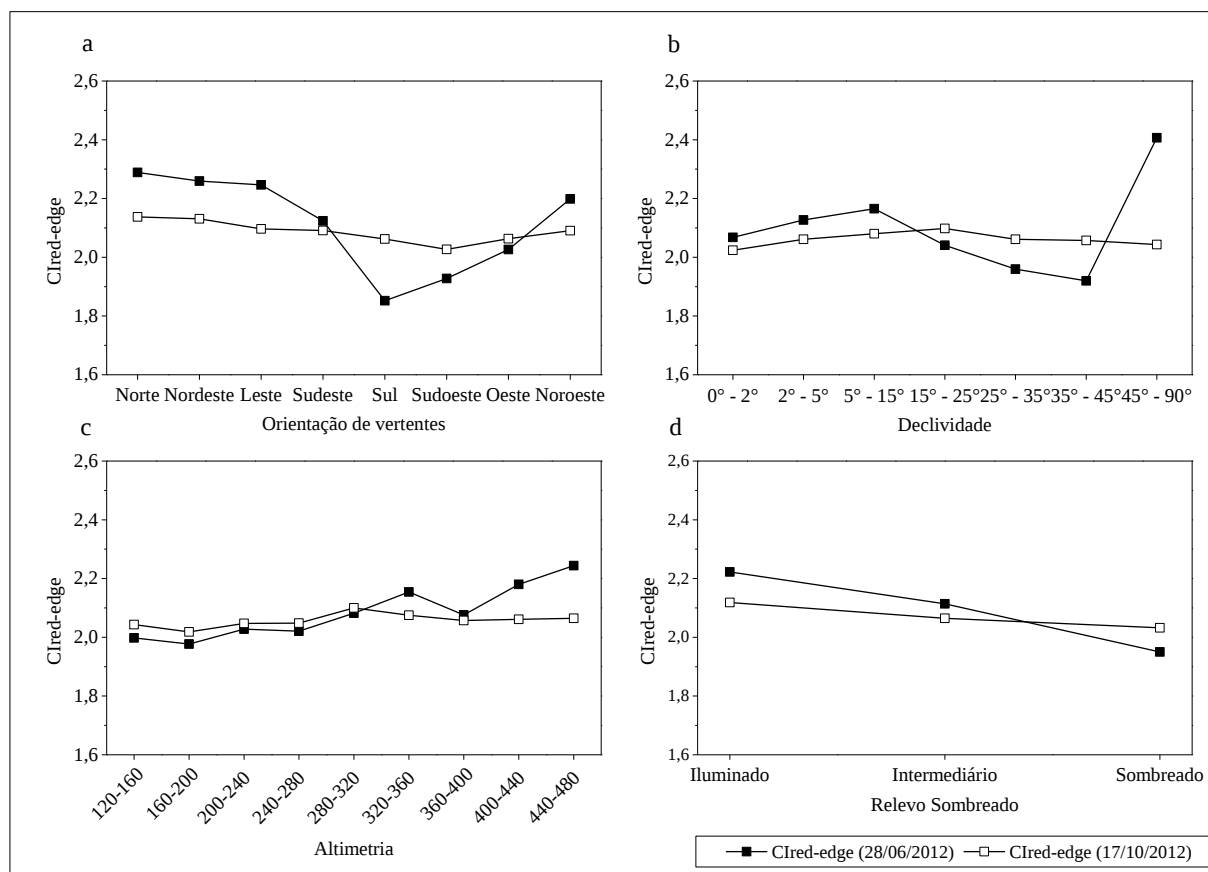


Figura 18 – Gráficos das variações do índice de vegetação CIred-edge em função das variáveis topográficas de orientação de vertentes (a), declividade (b), altimetria (c) e relevo sombreado (d) para as duas datas das cenas RapidEye.

Na data de junho a amplitude de variação verificada foi de 0,4370, sendo encontrado o maior valor médio na classe de orientação norte, correspondente a 2,2889, enquanto que o valor médio mais baixo foi verificado na classe de orientação sul, sendo este 1,8520. Na data de outubro, o valor médio mais elevado do CIred-edge foi verificado, igualmente como na data anterior, na classe de orientação norte, a qual apresentou o valor de 2,1376. Diferente da data de junho, o menor valor médio do CIred-edge foi verificado na classe de orientação sudoeste, apresentando o valor de 2,0268. A amplitude de variação verificada para a data de outubro foi de 0,1108, sendo menor que a de junho.

As variações do índice CIred-edge verificadas em função da orientação de vertentes mostraram uma considerável diferença entre os coeficientes de variação verificados entre as duas datas. Para a data de junho foi verificado um CV de 20,91%, e para a data de outubro, 8,78%. Estas variações mostram uma forte dependência das condições de iluminação verificada na data de junho, a qual apresentou o maior CV, estando este relacionado

diretamente com as oscilações causadas pelas amplitudes entre as áreas com maior ou menor dependência das condições de sombreamento.

Os valores médios do índice de clorofila da borda do vermelho analisados em função da declividade (Figura 28b) apresentaram o mesmo padrão encontrado nos índices anteriores para a data de junho, a qual apresentou um acréscimo nos valores de CIred-edge entre as declividades de 0° e 15°, sendo verificada uma grande amplitude de variação na data de junho e uma baixa amplitude nos dados de outubro, embora em ambas as datas seja verificado o mesmo padrão de variação. Para a data de outubro foi verificada uma diferença no padrão de comportamento, o qual não apresentou um pico entre os valores a partir da classe de 35° - 45° que vinha ocorrendo nos demais índices de vegetação, sendo verificado que esta classe está incluída em um decréscimo ocorrido entre as declividades de 15° a 90°.

Na data de junho a amplitude de variação verificada foi de 0,4873, sendo encontrado o maior valor médio na classe com declividade entre 45° - 90°, correspondente a 2,4069, enquanto que o valor médio mais baixo foi verificado na classe de declividade entre 35° - 45°, sendo este 1,9197. Na data de outubro, o valor médio mais elevado do CIred-edge foi verificado nas áreas com declividade entre 15° - 25°, a qual apresentou o valor de 2,0978, enquanto que o menor valor médio do CIred-edge foi verificado nas áreas com declividade entre 0° e 2° apresentando o valor de 2,0238. A amplitude de variação verificada para a data de outubro foi de 0,0741, sendo menor que a de junho.

As variações do índice CIred-edge verificadas em função da declividade mostraram uma considerável diferença entre os CV verificados entre as duas datas. Para a data de junho foi verificado um CV de 23,25%, e para a data de outubro, 9,17%. Estas variações mostram uma forte dependência das condições de iluminação verificada na data de junho, a qual apresentou o maior CV, estando este relacionado diretamente com as oscilações apresentadas na data de junho causadas pelas amplitudes entre as áreas com maior ou menor dependência das condições de sombreamento.

Em relação a altimetria, os valores médios do CIred-edge apresentaram uma tendência de acréscimo verificada entre as altitudes de 120 a 360 metros para a data de junho e de 120 a 320 metros para a data de outubro (Figura 28c), enquanto que após ambos os acréscimos ocorreu um acentuado decréscimo dos valores médios do CIred-Edge, sendo verificado nas áreas com altimetrias entre 320 e 400 metros para a data de junho e de 280 a 400 metros para a área de outubro.

A ocorrência destes padrões condicionou uma amplitude de variação de 0,2672 para a data de junho e 0,0816 para a data de outubro. Para a data de junho o maior valor médio de

CIred-edge foi verificado nas áreas com altimetrias entre 440 e 480 metros, enquanto que o valor mínimo foi encontrado nas áreas com gradiente altimétrico entre 160 e 200 metros. Na data de outubro, o maior valor médio do CIred-edge foi verificado nas áreas com gradiente altimétrico entre 280 e 320 metros, correspondendo a um valor de 2,1001, enquanto que o valor mais baixo, 2,0185 foi verificado nas áreas com altimetria entre 160 e 200 metros.

Analisando os valores do índice de clorofila da borda do vermelho em função do relevo sombreado (Figura 28d) foi possível identificar um comportamento semelhante ao dos outros índices já analisados. Da mesma forma, com os demais índices de vegetação os valores médios amostrados apresentam uma tendência de decréscimo entre as classes de áreas iluminadas e de áreas sombreadas, o que demonstra que este índice também sofre interferência das condições de iluminação. As áreas iluminadas apresentaram um valor médio amostrado de 0,5216 para a data de junho e 0,53135 para a data de outubro. Enquanto que as áreas sombreadas apresentaram um valor médio amostrado de 0,4860 e 0,5027.

Embora na data de junho sejam verificados valores mais elevados de CIred-edge nas áreas iluminadas e planas em relação a data de outubro, os valores amostrados para as áreas sombreadas apresentaram um significativo decréscimo. Desta forma, para a data de junho foi verificado uma amplitude nos valores médios amostrados de 0,0356, enquanto que na data de outubro a amplitude verificada foi de 0,0107. O que mostra que o CIred-edge apresentou uma baixa influência das condições de iluminação locais do PET, principalmente na data de outubro.

Analisando as médias amostradas de RENDVI em função da orientação de vertentes para as duas datas foram verificadas variações nas curvas do gráfico da Figura 29a, sendo verificado um parecido em relação aos demais índices analisados em função da orientação de vertentes, no qual os valores médios com data de 28 de junho de 2012 apresentaram valores mais elevados em relação aos dados com data de 17 de outubro de 2012.

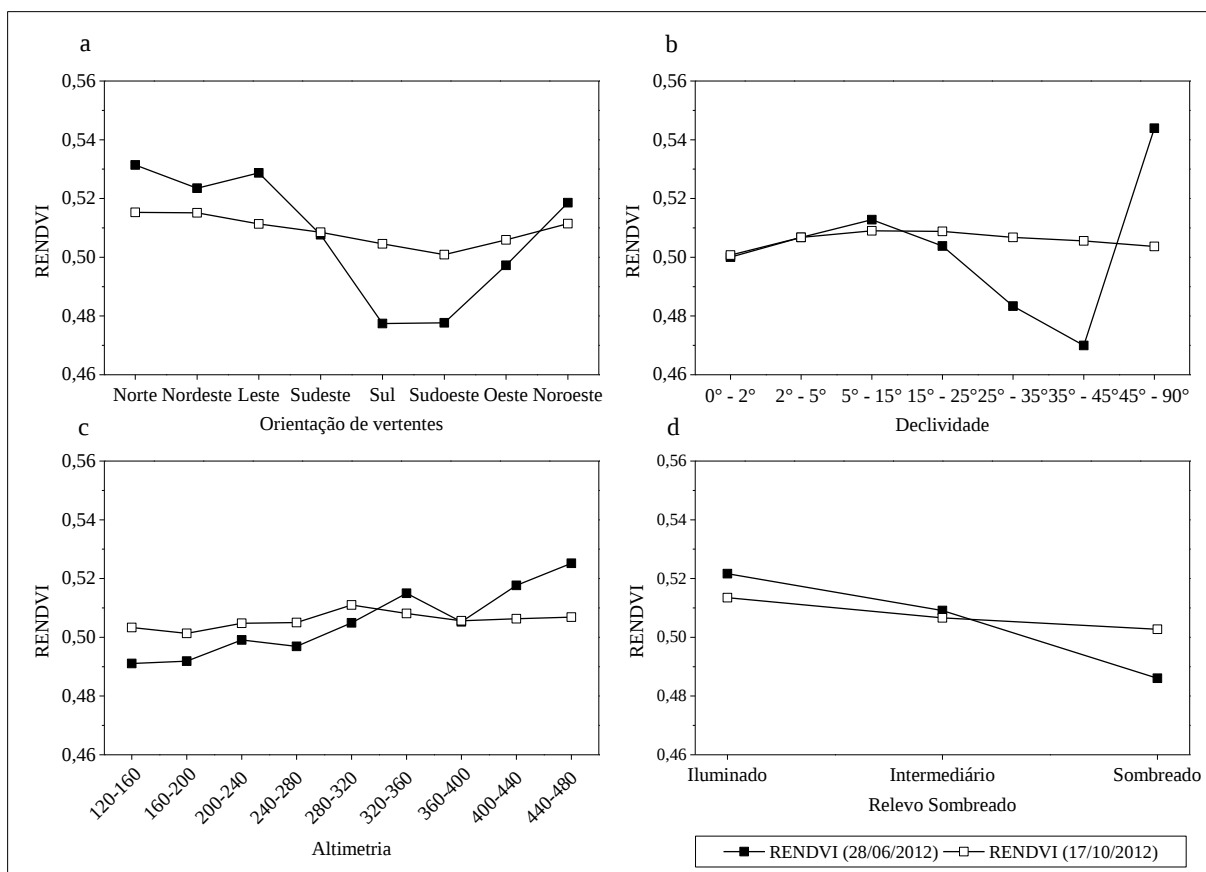


Figura 19 – Gráficos das variações do índice de vegetação RENDVI em função das variáveis topográficas de orientação de vertentes (a), declividade (b), altimetria (c) e fator topográfico de iluminação (d) para as duas datas das cenas RapidEye.

Em relação à declividade (Figura 29b), o RENDVI apresentou nas duas datas um acréscimo nos valores médios, sendo que para a data de junho este ocorreu nas áreas com declividades entre 0° a 15° e na data de outubro entre 0° e 25°. Após ocorreu um decréscimo nas médias e um pico nas reflectâncias médias da data de junho, em áreas com declividade acima de 45°.

Estas variações correspondem na data de junho a um valor médio de RENDVI de 0,5044 e uma amplitude de 0,689 verificada entre as áreas com declividade entre 45° e 90° (maior valor, 0,5430) e 35° e 45° (menor valor, 0,5019). Enquanto que na data de outubro foi apresentada uma maior ligeiramente maior do que na data anterior, sendo esta de 0,5064. A amplitude de variação apresentou um valor médio de 0,009 verificado entre as áreas com declividade entre 15° e 25° (maior valor, 0,5110) e 0° e 2° (menor valor, 0,5019).

Analisando o gráfico dos valores médios de RENDVI em função da altimetria do PET (Figura 29c) um acréscimo nos valores médios para as duas datas, sendo que este ocorreu nas

áreas com altitudes entre 120 e 360 metros para a data de junho e entre 120 e 320 metros para a data de outubro. Após o padrão dos valores nas duas datas mudou passando a apresentar um decréscimo verificado nas áreas com altimetria entre 360 e 400 metros, enquanto que os valores na data de outubro apresentaram um padrão de decréscimo correspondente às áreas com maior elevação.

Analisando os valores médios do RENDVI em função da altimetria (Figura 29c) foi possível verificar uma amplitude de variação de 0,0341 na data de junho, que apresentou o menor valor médio associado as áreas com altimetria entre 120 e 160 metros, sendo o valor de 0,4911, enquanto que o valor mais elevado foi verificado nas áreas com gradiente altimétrico entre 440 e 480 metros, as quais apresentaram um valor médio de RENDVI de 0,5252. Na data de outubro foi verificada uma menor amplitude em relação a data de junho, sendo apresentado um valor de 0,0097. O valor mais elevado foi encontrado na classe correspondente a altimetrias entre 280 e 320 metros, sendo o valor médio verificado de 0,5110, e o valor mínimo, encontrado na classe entre 160 e 200 metros, correspondente a um valor de RENDVI de 0,5013.

O gráfico dos valores médios de RENDVI amostrados em função do relevo sombreado (Figura 29d) mostraram padrões idênticos aos demais índices entre as duas datas, divergindo apenas na amplitude dos valores amostrados. No que diz respeito aos valores médios amostrados, os valores mais elevados foram encontrados na classe de áreas iluminadas, para ambas as datas, sendo 0,5216 para a data de junho e 0,5135 para a data de outubro. Enquanto que os menores valores amostrados estão relacionados às áreas sombreadas, nas quais foram verificados valores de RENDVI de 0,4860 para a data de junho e 0,5027 para a data de outubro.

Os valores médios amostrados de RENDVI para as áreas iluminadas e planas mantiveram-se próximos entre as duas datas, sendo as maiores diferenças verificadas nas áreas sombreadas. Desta forma a maior amplitude dos valores foi verificada na data de junho, sendo esta de 0,0356, enquanto que na data de outubro a amplitude dos dados foi de 0,0107.

O RENVi da mesma forma que o NDVI apresenta fator de normalização em sua equação, devido a este fator ambos os índices apresentaram baixa influência das condições de iluminação em relação aos índices EVI e CIRed-Edge, que não possuem fator de normalização e apresentaram grandes amplitudes entre as classes de áreas iluminadas e sombreadas indicando grande influência do sombreamento nos valores.

6.6 Análise integrada dos dados de sensoriamento remoto em função dos dados da modelagem topográfica e inventário florestal.

A análise integrada dos resultados da amostragem dos dados de sensoriamento remoto em função das variáveis topográficas em relação a distribuição espacial dos valores de reflectância e dos índices de vegetação permitiu verificar entre as duas datas analisadas, que as condições de iluminação locais interferem de forma direta na resposta destes dados.

As distribuições espaciais dos valores de reflectância e dos índices de vegetação analisados mostraram a ocorrência de variações nos valores médios amostrados em função das variáveis topográficas, sendo estas variações condicionadas pelo relevo, ocorrendo principalmente nos vales cortam a área do PET. Estas variações embora ocorram nas duas datas, mas com intensidades distintas, sendo na data de junho verificadas as maiores variações. Os menores valores tanto de reflectância das bandas, quanto dos índices de vegetação foram verificados nas áreas com baixa altimetria constituintes de fundos de vales, áreas com vertentes orientadas nas direções sudeste, sul, sudoeste, oeste e com baixa e média declividade. Todas estas áreas apresentaram condições de sombreamento ou menor exposição a radiação solar em comparação com as demais. Enquanto nas áreas expostas diretamente as condições iluminação incidente de forma direta foram verificados os valores mais elevados tanto para reflectância, quanto para os índices de vegetação ára as duas datas.

Embora as condições de iluminação tenham mostrado-se como forte condicionante das variações dos valores de reflectância e índices de vegetação, as características sazonais da vegetação também influenciaram na resposta dos valores, resultando em um efeito combinado (BREUNIG *et al.*, 2015). Neste sentido, comparando os valores médios amostrados apenas de áreas em condições de iluminação direta nas duas datas avaliadas foi identificado que tanto os valores de reflectância, quanto os valores dos índices de vegetação apresentaram-se menores na data de junho em relação a data de outubro, o que permite concluir que esta variação pode estar diretamente ligada as condições fenológicas da vegetação.

O PET embora seja totalmente coberto por vegetação, não apresenta um dossel homogêneo, devido este estar dividido em três estratos arbóreos principais, mais um arbustivo e outro herbáceo, o que configura uma característica de grande sombreamento interno do dossel vegetativo implicando em alterações diretas na resposta espectral da vegetação. Devido a estas condições, podem ser verificadas variações na resposta das bandas, em especial na banda do vermelho. Embora exista a ocorrência destas características de sombreamento interno do dossel, o

sombreamento causado pelo relevo é o que mais influencia na resposta tanto da reflectância das bandas e dos valores dos índices de vegetação, formando áreas de maior e menor reflectância. O sombreamento interno afeta de forma mais direta as variações entre píxel vizinhos, especialmente considerando sensores de resolução espacial alta como o Rapideye.

A análise integrada dos resultados indica que de todas as variáveis topográficas analisadas, a orientação de vertentes foi as que apresentaram maior relação com as condições de iluminação. Os gráficos dos valores médios amostrados em função da orientação de vertentes mostraram em todas as análises uma tendência de decréscimo dos valores associados diretamente às áreas orientadas nas direções sudeste, sul, sudoeste e oeste, direções estas, as quais apresentaram tanto no mês de junho, quanto em outubro uma menor exposição à radiação solar, sendo esta mais acentuada no mês de junho. Esta característica de maior sombreamento destas áreas fez com que os valores de reflectância sejam menores nelas, o que consequentemente acarretará em valores mais baixos em relação as condições normais em índices de vegetação gerados a partir destes dados.

Em função das características topográficas do PET como relevo em sua maior parte ondulado circundado por porções de relevo dissecado que constituem extensos vales em direção ao Rio Uruguai, as condições de iluminação sofreram mais variações em função da orientação das vertentes, pois as áreas com orientação oposta as condições de iluminação foram as que apresentaram as variações mais significativas, enquanto que outras variáveis topográficas como a declividade e a altimetria não apresentaram um padrão de variação.

Os gráficos dos valores médios amostrados em função da declividade não apresentaram um padrão de variação entre as análises, embora ocorra um padrão de variação associado a uma classe, na qual na maioria das análises entre as duas datas foi verificado um significativo acréscimo de valores médios amostrados associado as áreas com declividade mais acentuada, entre 35° e 90°. Por meio dos dados obtidos com o levantamento florestal realizado no PET, as áreas com maior declividade (parcela número 7) apresentaram algumas diferenças em relação as demais, sendo que nesta foi verificada uma maior ocorrência de espécies distribuídas entre todos os estratos arbóreos, além das espécies contidas nesta parcela apresentarem maior média de altura em relação as demais parcelas, o que mostra um maior índice de área foliar e consequente maior reflectância. Gandolfi (2000) descreve que a declividade pode interferir tanto na distribuição, quanto nas características das espécies. Segundo o autor, declividades acentuadas causam interferência na organização vertical do dossel, ocasionando variações nos ângulos de penetração e distribuição de luz no interior de florestas; promoção da aparente elevação da copa de indivíduos menores e mais jovens

de áreas superiores, de modo que alcancem mais rápido o dossel em áreas de declividade acentuada; variação no tempo de incidência de radiação durante o ano.

A altimetria da mesma forma que a declividade não apresentou um padrão definido entre os dados analisados, sendo as respostas dos valores médios amostrados diferentes entre as duas datas apresentando variações mais significativas para a data de junho. Estas variações estão mais relacionadas ao sombreamento causado pelas áreas adjacentes de maior altimetria do que a distribuição das espécies sob o dossel vegetativo, uma vez que a altimetria do PET não é suficientemente elevada a ponto de condicionar a distribuição de espécies. Sobre a influência da altimetria na distribuição de espécies, um estudo realizado por Silva *et al.* (2008) em uma área de Mata Atlântica com variação altimétrica de 150 metros, os autores não identificaram uma influência direta de fatores abióticos relacionados ao gradiente de altitude.

A análise dos gráficos dos valores médios amostrados em função do fator topográfico de iluminação mostraram um padrão de acordo com o esperado, mostrando em todas as análises valores mais elevados associados às áreas iluminadas e com maior reflectância, seguidos de valores mais brandos associados às áreas com padrão de iluminação de relevo plano e por último as áreas sombreadas foram as que apresentaram os valores mais baixos.

As condições de baixa reflectância apresentadas pelas bandas RapidEye em relação às áreas sombreadas estenderam-se aos índices de vegetação, embora não ocorrendo na mesma intensidade em todos os índices analisados, alguns como o EVI apresentaram grande influência das condições de iluminação, apresentando valores distintos para alvos idênticos, enquanto que os índices NDVI e RENDVI que apresentam fatores de normalização em suas equações apresentaram baixa influência às condições de iluminação.

Entre as duas datas analisadas, as mudanças ocorridas nos valores amostrados de reflectância e nos índices de vegetação estão diretamente relacionadas à variação sazonal das condições de iluminação do PET em função do decréscimo do ângulo zenital solar verificado entre as duas datas. De acordo com Ayoade (2011) a variação do ângulo de incidência solar associada à latitude do lugar considerado é o principal fator que condiciona as variações de iluminação das áreas. Embora o fator topográfico seja um importante condicionante local das condições de iluminação de áreas, as variações sazonais de iluminação estão condicionadas às características da latitude em que a área se encontra. No caso do PET, sua localização proporcionou um decréscimo do AZS de 33° entre as datas de 28 de junho e 17 de outubro de 2012, o que justificou o acréscimo em quase todos os valores médios amostrados de reflectância e dos índices de vegetação verificados em outubro.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora se tratando de uma área inteiramente coberta por dossel vegetativo e mesmo tipo de floresta, a análise dos dados de reflectância das cenas RapidEye em função das variáveis topográficas permitiram identificar significativas variações nos valores de reflectância e índices de vegetação causadas pelas condições de iluminação, mesmo em alvos idênticos. As diferenças encontradas nos dados entre as duas datas possibilitaram avaliar que embora exista a ocorrência de fenômenos sazonais como a deciduidade de algumas espécies, as condições de iluminação tendem a causar influência na magnitude das variações da reflectância, uma vez que os menores valores de reflectância foram verificados justamente sobre áreas sombreadas.

A avaliação temporal dos índices de vegetação MODIS mostrou a existência de um ciclo anual bem definido da vegetação do PET. No verão são encontrados nos maiores valores dos índices e no inverno, devido a perda de folhas, os menores valores foram encontrados.

A modelagem topográfica do PET permitiu a análise das características do relevo e a influência causada por este nas condições de iluminação. Os dados obtidos com a modelagem topográfica possibilitaram concluir por meio da análise realizada das variáveis de orientação de vertentes, declividade e altimetria, que o relevo do PET apresenta-se em sua maior parte como plano ondulado, apresentando ocorrências de áreas elevadas com topos de relevo plano, sendo intercaladas por extensos vales fluviais, cercados por encostas dissecadas com grande declividade que se estendem da porção central do parque em direção ao Rio Uruguai.

Verificou-se que as encostas mais iluminadas apresentam maior reflectância em todas as bandas, enquanto que as encostas com menor condição de iluminação ou maior sombreamento apresentaram valores de reflectância inferiores aos encontrados nas demais áreas em todas as bandas. As características apresentadas pelas bandas RapidEye em função dos parâmetros topográficos avaliados permitiram concluir que a resposta espectral de cada banda é influenciada pelas variações das condições de iluminação. Considerando a normalização das bandas, verificou-se que as bandas do vermelho e infravermelho próximo são as mais afetadas pelas variações de orientação de vertentes, declividade e relevo sombreado. Em relação a altimetria, foi verificado que ocorre uma variação entre o padrão das bandas do RapidEye a medida que a altitude aumenta, possivelmente associada a mudanças das características da vegetação do parque.

Considerando os índices de vegetação elaborados a partir das bandas RapidEye conclui-se que os índices que possuem fatores de normalização, como o NDVI e o RENDVI apresentaram-se menos sensíveis as condições topográficas, enquanto que os índices EVI e

CIred-edge apresentaram maior sensibilidade as condições de iluminação e sombreamento, apresentando grandes variações entre áreas iluminadas e sombreadas, embora apresentando condições idênticas de dossel vegetativo. |Dos índices avaliados, os que melhor representaram as condições da vegetação e sem grandes influências das condições de iluminação foram os índices NDVI e RENDVI. O índice EVI, embora tenha sido elaborado com o objetivo de reduzir os efeitos atmosféricos e do substrato, para as características de relevo e condições de iluminação do PET não apresentou de forma eficaz as características da vegetação, sendo influenciado diretamente pelas condições de iluminação, o que fez com que seus valores apresentassem variações condicionadas pela influencia do relevo e não de mudanças diretas nas condições fenológicas do dossel vegetativo. O índice de clorofila da borda do vermelho foi mais eficiente para a caracterização da vegetação na ausência de sombreamento. A sombra parece mascarar as feições de clorofila e dificultar a obtenção de resultados sólidos.

A reflectância das bandas RapidEye e os índices de vegetação apresentaram variações associadas a três parâmetros principais: as condições de iluminação em função das características locais da geometria de iluminação com grande variação sazonal do ângulo zenital solar; as características topográficas do PET e; as características do próprio dossel vegetativo, no qual a sobreposição de extratos faz com que exista grande quantidade de vegetação disposta sobre condições de sombreamento, mesmo em áreas com recebimento direto de radiação solar além do caráter decidual da vegetação do PET.

REFERÊNCIAS

ABDON, M. M.; SILVA, J. S. V.; FERNANDES, A. E. Detecção de queimadas na bacia do Alto Paraguai através de dados do NOAA/AVHRR. In: ENCONTRO SOBRE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A ESTUDOS NO PANTANAL, Corumbá, 1995. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1995. p.117-118.

ABRAMS, M.; HOOK, S.; RAMACHANDRAN, B. **ASTER user's handbook**. Pasadena: JPL, 1999. 93p.

ALBUQUERQUE, E. P. Sobre o desaparecimento da fauna da região do Alto Uruguai e a Importância do Parque Florestal Estadual do Turvo na sua preservação. **Roessléria**, v. 1, n. 1, p. 143–149, 1977.

ALMEIDA, C. G. **Análise espacial dos fragmentos florestais na área do Parque Nacional dos Campos Gerais, Paraná**. 2008. 74 p. Dissertação (Mestrado em Gestão do Território) – Departamento de Geociências, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2008.

ALMEIDA, E. S. **Relação entre índice de vegetação derivado do NOAA-AVHRR e precipitação na região Amazônica**. 1997. 108 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997.

AMARAL, S. **Imagens do sistema sensor AVHRR/NOAA na detecção e avaliação de desmatamentos na Floresta Amazônia: relações com dados do sistema TM/Landsat**. 1992. 195 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992.

ANDERSON, G. L.; HANSON, J. D.; HAAS, R. H. Evaluating Landsat Thematic Mapper derived vegetation indices for estimating above-ground biomass on semiarid rangelands. **Remote Sensing of Environment**, v. 45, n. 2, p. 165-175. 1993.

ANDERSON, L. O. A. **Classificação e monitoramento da cobertura vegetal de Mato Grosso utilizando dados multitemporais do sensor MODIS**. 2004. 247 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

ANDERSON, L. O.; LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. **Sensor MODIS: uma abordagem geral**. São José dos Campos: INPE, 2003.

ANDRIEU, B.; BARET, F. Indirect methods of estimating crop structure from optical measurements. In: VARLET-GRANCHER, C.; BONHOMME, R.; SINOQUET, H. (Eds.). **Crop Structure and Light Microclimate**. INRA, France. p. 285-322, 1993.

ASNER, G. P. Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance. **Remote Sensing of Environment**, p. 234–253, 1998.

ASSAD, E. D.; CASTRO, L. H. R.; ALMEIDA, S. A. O. Análise exploratória da variação espaço temporal do índice de vegetação NOAA/AVHRR e pluviometria: caso dos cerrados brasileiros. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, Salvador, 1996. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996, p. 491-493.

ASSAD, E. D.; SETZER, A.; MOREIRA, L. Estimativa da precipitação através do índice de vegetação do satélite NOAA. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5, Natal, 1988. **Anais...** São José dos Campo: INPE, 1988, p. 425-429.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 15 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011, 332 p.

AZEVEDO, E. C.; MANGABEIRA, J. A. C. **Mapeamento de uso das terras utilizando processamento digital de imagem de sensoriamento remoto**. Campinas: MAPA, 2001. 12p.

BARKER, J. L.; HARDEN, M. K.; ANUTA, E. A.; SMID, J.; HOUGHT, D. **MODIS spectral sensivity study**: requirements and characterization. Washington: NASA, 1992, 84p.

BATISTA, G. T.; SHIMABURUKO, Y. E.; LAWRENCE, W. T. Monitoramento da cobertura florestal através de índices de vegetação do NOAA/AVHRR. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento, 7, Curitiba, 1993. **Anais...** São José dos Campos: INPE, v. 2, 1993, p. 30-37.

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

BEVEN, K. Linking parameters across scales: subgrid parameterizations and scale dependence hydrological model. **Hydrological Processes**, 9, pp. 507 – 525, 1995.

BEVEN, K.; MOORE, I. D. **Terrain analysis and distributed modeling in hidrology wiley**. New York, 1993.

BURGESS, D. W.; LEWIS, P. The topographic effects on NDVI measurements derived from AVHRR data. In: Proceedings of the Seventh Australasian Remote Sensing Conference. **Proceedings...** Melbourne, Australia, pp. 189-196. 1994.

BRACK, P., BUENO, R. M., FALKENBERG, D. B., PAIVA, M. R. C., SOBRAL, M., STEHMANN, J. R. Levantamento florístico do Parque Estadual do Turvo, Tenente Portela, Rio Grande do Sul, Brasil. **Roessléria**, v. 7, p. 69–94, 1985.

BRAGA, C. C. **Inter-Relações entre Padrões de Índice de Vegetação e de pluviometria no Nordeste do Brasil**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2000. 124p.

BRAGHIERE, R. K.; YAMASOE, M. A. Avaliação da fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela floresta tropical primária na Amazônia durante a estação seca dos anos de 2002 e 2007. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 6019-6025.

BRASWELL, B. H.; SCHIMEL, D. S.; LINDER, E.; MOORE, B. III. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability. **Science**, v. 278, p. 870-872. 1997.

BREUNIG, F. M. **Influência dos efeitos direcionais sobre produtos de Sensoriamento Remoto em florestas decíduais subtropicais**. Projeto de Pesquisa. Edital FAPERGS 003/2012. 2012.

BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. R.; GITELSON, A. A.; MOURA, Y. M.; TELES, T. S.; GAIDA, W. Spectral anisotropy of subtropical deciduous forest using MISR and MODIS data acquired under large seasonal variation in solar zenith angle. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 35, p. 294-304, 2015.

BULFE, N. M. L. **Dinâmica de clareiras originadas de exploração seletiva de uma floresta estacional semidecidual na Provincia de Misiones, nordeste da Argentina**. Tese de Doutorado. Universidade federal do Paraná (UFPR) - Curitiba, 73 p., 2008.

CAMPBELL, J. B.; WYNNE, R. H. **Introduction to Remote Sensing**. New York: Guilford Press, 2011, 667 p.

CAMPOS, A. R.; FONSECA, D. F.; SAMPAIO, D. M.; FARIA, S. D.; ELMIRO, M. A. T. Classificação orientada a objeto para mapeamento do uso e cobertura do solo do município de Rio Acima – MG: por crescimento de regiões e por extração de objetos. In: SIMPÓSIO

BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, Foz do Iguaçu, 2013. **Anais...** São José dos Campos, INPE, 2013, p. 8035-8042.

CANAVESI, V. **Aplicação de dados hiperespectrais na extração de informações qualitativas e quantitativas de plantios florestais do gênero Eucalyptus spp.** 2008. 145 f. Tese (Doutorado em sensoriamento remoto) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

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

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; HERMUCHE, P. M.; GUIMARÃES, R. F. Identificação regional da Floresta Estacional Decidual na bacia do Rio Paraná a partir da análise multitemporal de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geofísica**. v.24, n.3, São Paulo. 2006.

CARVALHO, T. M.; LATRUBESSE, E. M. O uso de modelos digitais do terreno (MDT) em análises macrogeomorfológicas: o caso da bacia hidrográfica do Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.5, n.1, p.85-93, 2004.

CHEN, S. C.; SHIMABURUKO, Y. E. Dados AVHRR/NOAA monitoramento da cobertura vegetal em região amazônica. In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO EN PERCEPCIÓN REMOTA, 5, Cusco, 1991. **Anais...** INTI/SELPER, 1991.

CLERICI, N.; WEISSTEINER, C.J.; GERARD, F. Exploring the use of MODIS NDVI based phenology indicators for classifying forest general habitat categories. **Remote Sensing**, Basel, v. 4, n. 6, p. 1781-1803. 2012.

COLLINS, W. Remote sensing of crop type and maturity. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 44, p. 43-55, 1978.

COLWELL, J. E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 3, n. 2, p.175-183, 1974.

COMBAL, B.; ISAKA, H. The effects of small topographic variations on reflectance. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 3, pp. 663-670, 2002.

CONCEIÇÃO, O. A. C. **A expansão da soja no Rio Grande do Sul: 1950 – 75.** Porto Alegre: FEE. Impressão 2, n. 6. 1986.

CORRÊA, E. A.; PINTO, S. A. F.; MORAES, I. C. Análise da influência dos parâmetros de iluminação de cena e sombreamento do relevo em índices de vegetação normalizada. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, Foz do Iguaçu, 2013. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013, p. 231-236.

COLWELL, J. E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 3, n. 3, p. 175-183, 1974.

CURRAN, P. J. Remote sensing of foliar chemistry. **Remote Sensing of Environment**, volume 30, 1989, p. 271 – 278.

DANKS, S. M.; EVANS, E. H.; WHITTAKER, P. A. **Photosynthetic systems**: structure, function and assembly, Wiley, New York, 1984.

DEERING, D. W.; MIDDLETON, E. M.; ECK, T. F. Reflectance Anisotropy for a Spruce-Hemlock Forest Canopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 47, p. 242-260, 1994.

DEVICES, Delta-T. HemiView canopy analysis software Version 2.1. **Delta-T Devices Ltd.**, Cambridge, 1998.

DIAS, L. L.; VASCONCELOS, J. M. O.; SILVA, C. P.; SOBRAL, M.; BENEDETI, M. H. B. Levantamento florístico de uma área de mata subtropical no Parque Estadual do Turvo, Tenente Portela, RS. **Revista do Instituto Florestal**, v. 4, p. 339-346, 1992.

DONG, J.; KAUFMANN, R. K.; MYNENI, R. B.; TUCKER, C. J.; KAUPPI, P. E.; LISKI, J.; BUERMANN, W.; ALEXEYEV, V.; HUGHES, M. K. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 393-410, 2003.

DUBAYAH, R.; RICH, P. M. Topographic solar radiation models for GIS. **International Journal of Geographical Information Systems**, 9:4, 405-419, 1995.

DWYER, J., SCHMIDT, G., 2006. The MODIS reprojection tool. In: QU, J. J.; GAO, W.; KAFATOS, M.; MURPHY, R. E.; SALOMONSON, V. V. (Eds.). **Earth Science Satellite Remote Sensing**. Berlin: Springer, Berlin, 2006. p. 162–177.

DYMOND, J. R.; SHEPHERD, J. D. Correction of the topographic effect in remote sensing. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 2, p. 2618-2620, 1999.

ELDRIDGE, N. R.; EDWARDS, G. Continuous tree class density surfaces derived from high resolution digital image analysis. pp. 947–952 in **Proc. GIS/LIS'93**. Vancouver, British Columbia, 1993.

ELMES, G. A.; FUGIKAWA, E. K.; TWERY, M. J. Forest cover type estimation from digital elevation data. In: ANNUAL ESRI USERS CONFERENCE, 11, 1991. Redlands. **Proceedings...** Redlands: Environmental Systems Research Institute, 1991. pp. 389-395.

ELVIDGE, C. D.; CHEN, Z. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 54, p. 38-48, 1995.

EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; VALERIANO, D. DE M.; OLIVEIRA, J. B. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 467–474, 1996.

EUMETRAIN. **Monitoring vegetation from space**. 2010. Disponível: <<http://www.eumetrain.org/data/3/36/print.htm>>. Acesso em: 11 mar. 2014.

EXELIS. **ENVI versão 5.0**. Boulder, Colorado: Exelis Visual Information Solutions, 2013.

EVANS, I. S. An integrated system of terrain analysis for slope mapping. **Zeitschrift fur Geomorphologie**, v. 36, pp. 274-295, 1980.

FELIX, I. M.; KARMIERCZAK, M. L.; ESPINDOLA, G. M. RapidEye: a nova geração de satélites de observação da Terra. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 7619-7622.

FLEMING, M. D. An integrated approach for automated cover-type mapping of large inaccessible areas in Alaska. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 54, n. 3, pp. 357-362, 1988.

FLEMING, M. D.; HOFFER, R. M. **Machine processing of Landsat MSS data and DMA topographic data for forest cover type mapping**. Laboratory for applications of Remote Sensing, Purdue University, 1979.

FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. **Características espectrais de culturas e rendimento agrícola**. São José dos Campos: INPE, 1990. 178 p.

FRANKLIN, S. E. Geomorphometric processing of digital elevation models. **Computers & Geosciences**, v. 13, n. 6, pp. 603-609, 1987.

FRANKLIN, S. E. **Remote sensing for sustainable forest management**. New York: CRC Press, 2001. 407 p.

GANDOLFI, S. **História natural de uma Floresta Estacional Semidecidual no município de Campinas (São Paulo, Brasil)**. 2000. 520f. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

GAO, X.; HUETE, A. R.; NI, W.; MIURA, T. Optical–biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, n. 3, p. 609-620, 2000.

GESCH, D.; OIMOEN, M.; ZHANG, Z.; DANIELSON, J.; MEYER, D. **Validation of the ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) Version 2 over the Conterminous United States**. Sioux Falls: USGS, EROS, 2011, 16 p.

GILES, P. T.; FRANKLIN, S. E. An automated approach to the classification of the slope units using digital data. **Geomorphology**, v. 21, n. 3, p. 251-264, 1998.

GIRALDELLI, G. R.; PARANHOS FILHO, A. C. Relação entre as variáveis estruturais do habitat e o índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) em três tipos de habitat de cerrado na fazenda Diamante, Coxim, MS. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 1, Campo Grande, 2006. **Anais...** Campinas: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2006, p. 341-350.

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. **Journal of Plant Physiology**. v. 148, p. 494-500, 1996.

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N.; LICHTENTHALER, H. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. **Journal of Plant Physiology**. v. 148, p. 501-508, 1996.

GITELSON, A. A.; VIÑA, A.; CIGANDA, V.; RUNDQUIST, D. C.; ARKEBAUER, T. J. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 8, 2005.

GITELSON, A. A.; VIÑA, A.; VERMA, S. B.; RUNDQUIST, D. C.; ARKEBAUER, T. J.; KEYDAN, G.; LEAVITT, B.; CIGANDA, V.; BURBA, G. G.; SUYKER, A. E. Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: Implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 111, n. 8, 2006.

GONG, P.; PU, R.; YU, B. Conifer species recognition: An exploratory analysis of *in situ* hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, n. 2, p. 189-200, 1997.

GOWARD, S. N.; MARKHAM, B.; DYE, D. G.; DULANEY, W.; YANG, J. Normalized difference vegetation index measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, p.257-277, 1991.

GOWARD, S. N.; TUCKER, C. J.; DYE, D. G. North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer. **Vegetation**, v. 64, p. 3-14. 1985.

GRANELL-PÉREZ, M. C. **Trabalhar geografia com cartas topográficas**. Ijuí: UNIJUÍ, 2001. p. 128.

GRIFFITH, D. A. **Spatial autocorrelation and spatial filtering**. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003. 250 p.

GUADAGNIN, D. L. **Zonificación del Parque Estadual do Turvo, RS, Brasil, y directivas para el plan de manejo**. Tese de Doutorado. Universidad Nacional de Córdoba - Córdoba, Argentina. 1994.

GUPTA, P; CHRISTOPHER, S. A. An evaluation of Terra-MODIS sampling for monthly and annual particulate matter air quality assessment over the Southeastern United States. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 26, p. 6465-6471, 2008.

GUSSO, A.; ADAMI, M.; SILVA, W. F.; AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T. Aplicação de séries temporais EVI/MODIS na identificação do uso e ocupação do solo anterior ao cultivo da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, Natal, 2009. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009, p. 5851-5856.

HANSEN, M. C.; ROY, D. P.; LINDQUIST, E.; ADUSEI, B.; JUSTICE, C. O.; ALTSTATT, A. A method for integrating MODIS and Landsat data for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 5, p. 2495-2513, 2008.

HENRICKSEN, B. L.; DURKIN, J. W. Growing period and drought early warning in Africa using satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 1583-1608, 1986.

HILKER, T.; WULDER, M. A.; COOPS, N. C.; LINKE, J.; MCDERMID, G.; MASEK, J. G.; GAO, F.; WHITE, J. C. A new data fusion model for high spatial-and temporal-resolution mapping of forest disturbance based on Landsat and MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 8, p. 1613-1627, 2009.

HU, C.; MULLER-KARGER, F. E.; TAYLOR, C. J.; CARDER, K. L.; KELBLE, C.; JOHNS, E.; HEIL, C. A. Red tide detection and tracing using MODIS fluorescence data: A regional example in SW Florida coastal waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, n. 3, p. 311-321, 2005.

HUETE, A. R. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1, p. 195–213, 2002.

HUETE, A. R.; JUSTICE, C. **MODIS vegetation index (MOD13) algorithm theoretical basis document**. Greebelt: NASA Goddard Space Flight Center, 129 p. 1999.

HUETE, A.; JUSTICE, C.; LIU, H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing of Environment**, v. 29, p. 224–234, 1994.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; van LEEUWEN, W. J. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 440-451, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Folhas SH 22 Porto Alegre e parte das folhas SH 21 e SI 22 Lagoa Mirim: Levantamento de Recursos Naturais. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra.** Rio de Janeiro; 1986. v. 33.

IRGANG, B. E. A mata do alto Uruguai no RS. **Ciência e Cultura**, v. 32, p. 323-324, 1980.

JACÓBSEN, L. O.; FONTANA, D. C.; SHIMABUKURO, Y. E. Efeitos associados a El Nino e La Nina na vegetação do estado do Rio Grande do Sul, observados através do NDVI/NOAA. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 19, n. 2, p. 129-140, 2004.

JACKSON, R. D.; PINTER JR., P. J. Spectral response of architecturally different wheat canopies. **Remote Sensing of Environment**, v.20, n. 1, p.43-56, 1986.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres**. Tradução de J. C. N. Epiphanyo. São José dos Campos, SP: Parênteses, 2009. 598

p. (Prentice Hall Series in Geographic Information Science) Tradução de: Remote Sensing of the environment: an Earth resource perspective.

JULIEN, Y.; SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. Land use classification from multitemporal Landsat imagery using the Yearly Land Cover Dynamics (YLCD) method. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 5, p. 711–720. 2011.

JUNGES, A. H.; FONTANA, D. C. Perfis temporais de NDVI/MODIS de áreas agrícolas de outono-inverno, na região de Passo Fundo (RS), provenientes de máscara de cultivos e classificação não supervisionada. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 31-38.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D. P.; MORISETTE, J. T. An over-view of MODIS land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 244–262, 2002.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; HOLBEN, B. N.; TUCKER, C. J. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 6, p. 1271-1318, 1985.

KASPER, C. B.; MAZIM, F. D.; SOARES, J. B. G.; OLIVEIRA, T. G.; FABIÁN, M. E. Composição e abundância relativa dos mamíferos de médio e grande porte no Parque Estadual do Turvo, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 24, n. 4, p. 1087-1100, 2007.

KLEIN, R. M. Árvores nativas da floresta subtropical do Alto Uruguai. **Sellowia**, Itajaí, v. 24, p. 9-62, 1972.

KRAMER, H. J. **Observation of the Earth and its environment**: Survey of Missions and Sensors. Paris: ESA. Disponível em: <http://www.eoportal.org/directory/pres_RapidEyeSatelliteConstellation.html>. 2012.

KUMAR, M.; MONTEITH, J. L. Remote sensing of crop growth. In: Smith, H. (Ed.) **Plants and the daylight spectrum**. London: Academic Press, p. 133-144. 1981.

LAMPARELLI, R. A. C.; NERY, L.; ROCHA, J. V. Utilização da técnica por componentes principais (acp) e fator de iluminação, no mapeamento da cultura do café em relevo montanhoso. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.3, p.584-597, maio/jun. 2011.

LATORRE, M. L.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Sensor MODIS: características gerais e aplicações. **Espaço & Geografia**, v.6, n. 1, p. 91-121, 2003.

LEE, T. Y.; KAUFMAN Y. J. Non-lambertian effects on remote sensing of surface reflectance and vegetation index. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 24, p. 699-707, 1986.

LI, X.; STRAHLER, A. H. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: Effect of crown shape and mutual shadowing. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 2, p. 276-292, 1992.

LIESENBERG, V. Monitoramento global e regional da cobertura vegetal: uma abordagem dos atuais sistemas de observação da Terra. **Ciências Exatas e Naturais**, v. 7, n.1, p.115-128, 2005.

LIESENBERG, V.; GALVÃO, L.; PONZONI, F. Variations in reflectance with seasonality and viewing geometry: Implications for classification of Brazilian savanna physiognomies with MISR/Terra data. **Remote Sensing of Environment**, v. 107, n. 1-2, p. 276–286, 2007.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and imagem interpretation**. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons, 3 ed, 1994, 750 pp.

LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E.; ADAMI, M.; FREITAS, R. M.; ARAGÃO, L. E.; FORMAGGIO, A. R.; LOMBARDI, R. Mapeamento de Cicatrizes de Queimadas na Amazônia Brasileira a partir da aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral em imagens do sensor MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, Natal, 2009. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009, p. 5925-5932.

LIU, W. T.; XAVIER, A. F. S.; XAVIER, T. M. B. S. Relações da pluviometria na grande São Paulo com índices de vegetação e de umidade de diferença normalizada. In: SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS, 5, e SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9, Rio de Janeiro, 1991. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRH, 1991, p. 117-123.

LUCAS, A. A.; SCHULER, C. A. B. Análise do NDVI/NOAA em cana-de-açúcar e Mata Atlântica no litoral norte de Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.11, n.6, p. 607-614, 2007.

MALINGREAU, J. P.; BELWARD, A. S. Scale considerations in vegetation monitoring using AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 12, p. 2289-2307, 1992.

MANTOVANI, A. C.; AMARAL, S. Avaliação preliminar da utilização de imagens AVHRR/NOAA na detecção de desmatamento no Pantanal - MT. In: ENCONTRO SOBRE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A ESTUDOS NO PANTANAL, Corumbá, 1995. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1995.

MARCUSSI, A. B.; BUENO, C. R. P.; MIQUELONI, D. P.; ARRAES, C. L. Utilização de índices de vegetação para os sistemas de informação geográfica. **Caminhos de Geografia**, v. 11, n. 35, 2010, p. 41 - 53.

MATSUSHITA, B.; YANG, W.; CHEN, J.; ONDA, Y.; QIU, G. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-density Cypress Forest. **Sensors**, 7(11), pp.2636–2651. 2007. Disponível em: < <http://www.mdpi.com/1424-8220/7/11/2636/>>. Acesso em 15 jan. 2014.

MEIRELLES, M. S. P.; COSTA, G. A. O. P.; SINGH, D.; BERROIR, J. P.; HERLIN, I.; SILVA, E. F.; COUTINHO, H. L. C. A methodology to support the analysis of environmental degradation using NOAA/AVHRR data. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING CONGRESS, 20, Istanbul, 2004. **Proceedings...** London: ISPRS, 2004, p. 534-540.

MEISEL, J. E.; TURNER, M. G. Scale detection in real and artificial landscapes using semivariance analysis. **Landscape Ecology**, v. 13, n. 6, p. 347-362, 1998.

MENESES, P. R. Princípios de Sensoriamento Remoto. In: MENESES, P. R, ALMEIDA, T. (Orgs.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília, p. 1-31, 2012. Disponível em: < <http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>>. Acesso em: 16 set. 2013.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. D. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UnB e CNPq, 2012. p. 266.

MELO, R. W.; FONTANA, D. C.; BERLATO, M.A. Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento da soja para o Estado do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: Inpe, 2003. p.173-179.

MEYER, P.; ITTEN, K. I.; KELLENBERGER, T.; SANDMEIER, S.; SANDMEIER, R. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 48, p. 17–28, 1993.

MEYER, D. (Org.); TACHIKAWA, T.; KAKU, M.; IWASAKI, A.; GESCH, D.; OIMOEN, M.; ZHANG, Z.; DANIELSON, J.; KRIEGER, T.; CURTIS, B.; HAASE, J.; ABRAMS, M.; CRIPPEN, R.; CARABAJAL, C. **ASTER Global Digital Elevation Model Version 2: summary of validation results**. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center and the Joint Japan-US ASTER Science Team, 2011, 26p.

MIESCH, C.; BRIOTTET, X.; KERR, Y. Bidirectional reflectance of a rough anisotropic surface. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 15, p. 3107-3114, 2002.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modeling a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, pp. 3–30. 1991.

MOORE, I. D.; O'LOUGHLIN E. M.; BURCH, G. J. A contour-based topographic model for hydrological and ecological applications. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 13, pp. 305 – 320, 1988.

MORAES, E. C.; PEREIRA, G.; CARDOZO, F. S.; OLIVEIRA, G.; FERREIRA, M. P. Spectral response of vegetation covered surface subject to flooding due to viewing geometry. **Geografia**, v. 36, n. especial, p. 187-199, 2011.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos de sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. Viçosa: UFV, 2004, 307 p.

MOREIRA, M. A. **Identificação de reflorestamentos por meio da análise quantitativa de imagens orbitais Landsat**. 1984. 65 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1984.

MOURA, Y. M. **Influência da geometria de visada sobre o EVI na estação seca em floresta tropical usando dados do MISR/Terra**. 2012. 106 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

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

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION - EARTH SYSTEM RESEARCH LAB (NOAA-ESRL). **Solar Position Calculator**. 2015. Disponível em < <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/azel.html> >. Acesso em 4 de janeiro de 2015.

NICHOLOSON, S. E.; FARRAR, T. J. The Influence of Soil Type or the Relationships Between IVDN, Rainfall and Soil Moisture in Semiarid Bostswana. **Remote Sensing Environmet**, n. 50, p. 107-120.1994

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 3 ed, 2008, 388 p.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

OLIVEIRA, F. P.; FERNANDES FILHO, E. I.; SOARES, V. P.; SOUZA, A. L. Mapeamento de fragmentos florestais com monodominância de aroeira a partir da classificação supervisionada de imagens RapidEye. **Revista Árvore**, v. 37, n. 1, p. 151-161, 2013.

PALTRIDGE, G. W.; BARBER, J. Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA/AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 381-394, 1988.

PEREIRA, M. C.; AMARAL, S.; ZERBINI, N. J.; SETZER, A. W. Estimativa da área total queimada no Parque Nacional das Emas com uso de imagens da banda 3 do AVHRR: comparação com estimativas do TM/Landsat. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6, Manaus, 1990. **Anais...** São José dos Campos: INPE, v. 2, 1990, p. 302-310.

PIMETEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 14 ed., Piracicaba: Degaspari, 2000. 477 p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2010, 127p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 135 p.

PONZONI, F. J. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação: diagnosticando a mata atlântica. In: RUDORFF, B. F. T.; MORAES, E. C.; PONZONI, F. J.; CAMARGO JÚNIOR, H.; CONFORTE, J. C.; MOREIRA, J. C.; EPIPHANIO, J. C. N.; MOREIRA, M. A.; KAMPEL, M.; ALBUQUERQUE, P. C. G.; MARTINI, P. R.; FERREIRA, S. H.; TAVARES JÚNIOR, S. S.; SANTOS, V. M. N. (Ed.). **Curso de uso de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente**. São José dos Campos: INPE, 2002, cap. 8, p. 2-27.

RAPIDEYE A G. **RapidEye Satellite Imagery Product Specifications**. Version 4.0. Brandenburg an der Havel, Germany: RapidEye. Disponível em: <www.RapidEye.com>. 2013.

RICHTER, R. Correction of satellite imagery over mountainous terrain. **Applied Optics**, v. 37, n. 18, p. 4004-4015, 1998. Avaliabe at: <<http://www.opticsinfobase.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-37-18-4004>>. Accessed on March 11, 2014.

RICHTER, R.; SCHLAPFER, D. **Atmospheric / Topographic Correction for Satellite Imagery** (ATCOR-2/3 User Guide, Version 8.2 BETA), Wessling, Germany; Wil SG, Switzerland. Available at: http://www.dlr.de/eoc/Portaldata/60/Resources/dokumente/5_tech_mod/actor3_manual_2012.pdf. 2012.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA - RS). **Plano de manejo do Parque Estadual do Turvo**. Porto Alegre: Divisão de Unidades de Conservação do Estado do Rio Grande do Sul, 2005.

RISSO, J.; RIZZI, R.; EPIPHANIO, R. D. V.; RUDORFF, B. F. T.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; FERNANDES, S. L. Potencialidade dos índices de vegetação EVI e NDVI dos produtos MODIS na separabilidade espectral de áreas de soja. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 379-386.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja**: estudo de caso no Rio Grande do Sul. Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. 214p.

RIZZI, R.; FONSECA, E. L. Análise da variação espacial e temporal do NDVI no Estado do Rio Grande do Sul através de imagens AVHRR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, Foz do Iguaçu, 2001. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001, p. 1735-1737. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2001/09.24.10.32/doc/1735.1737.293.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2014.

RODRIGUES, T. L.; DEBIASI, P.; SOUZA, R. F. Avaliação da adequação dos produtos ASTER GDEM no Auxílio ao mapeamento sistemático brasileiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3, Recife, 2010. **Anais...** Recife: UFPE, 2010. p. 001-005.

ROSA, P. A.; BREUNIG, F. M.; BALBINOT, R.; GALVAO, L. S. Dinâmica da floresta do Parque Estadual do Turvo com índices de vegetação. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 4, pp. 487-499, 2013.

ROSA, R.; SANO, E. E. Análise dos parâmetros responsáveis pelas variações das condições de iluminação nos dados Landsat. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE SENSORIAMENTO REMOTO, SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 4, Gramado, 1986. **Anais...** São José dos Campos: INPE/Selper/SBC, 1986, p. 583-588.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3, Washington- DC, **Proceedings...** Washington – DC, 1973.

RUSCHEL, A. R.; GUERRA, M.; MOERSCHBACHER, B.; NODARI, R. O. Valuation and characterization of the timber species in remnants of the Alto Uruguay River ecosystem, southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 217, n. 1, p. 103-116, 2005.

RUSCHEL, A. R.; NODARI, R. O.; MOERSCHBACHER, B. M. Woody Plant Species Richness in the Turvo State Park, a Large Remnant of Deciduous Atlantic Forest, Brazil. **Biodiversity and Conservation**, v. 16, p. 1699-1714, 2007.

SAKAMOTO, T.; YOKOZAWA, M.; TORITANI, H.; SHIBAYAMA, M.; ISHITSUKA, N.; OHNO, H. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. **Remote sensing of environment**, v. 96, n. 3, p. 366-374, 2005.

SANTOS, A. R.; PELUZIO, T. M. O.; SAITO, N. S. Spring 5.1.2: passo a passo: Aplicações Práticas. Alegre: CAUFES; 2010. Disponível em: http://www.Mundogeomatica.com.br/Livros/Livro_Spring_5.1.2_Aplicacoes_Praticas/Livro_SPRING_512_PassoaPasso_Aplica%C3%A7%C3%A3o_Pr%C3%A1tica.pdf.

SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (SEMA/RS). **O Plano de Manejo do Parque Estadual do Turvo - RS**. Porto Alegre: SEMA, 2005. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/upload/Plano_manejo_PETurvo.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2013.

SELLERS, W. D. **Physical Climatology**. Chicago: University of Chicago Press, 1965, 272 p.

SELLERS, P. J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. **International Journal of Remote Sensing**, v. 6, p. 1335-1372. 1987.

SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; MOREIRA, M. A.; ARAI, E.; VALERIANO, D. M.; ANDERSON, L. O.; ESPÍRITO-SANOT, F. B. Desflorestamento na Amazônia – Sistema

DETER. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; JUAN CARLOS CEBALLOS, J. C. (Org.). **O Sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Editora Parêntese, v. 1, 2007, p. 389-401.

SIGNORI, A.; BREUNIG, F. M.; BALBINOT, R.; OLIVEIRA, E. C. M. DE. Remanescentes florestais da região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. X Seminário de Atualização em Sensoriamento remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal. **Anais...** Curitiba, PR, Brasil: INPE e UFPR, 2012.

SILVA, W. G.; METZGER, J. P.; BERNACCI, L. C.; CATHARINO, E. L. M.; DURIGAN, G.; SIMÕES, S. Relief influence on tree species richness in secondary forest fragments of Atlantic Forest, SE, Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 22, n. 2, pp. 589-598, 2008.

SMITH, J. A.; LIN, T. L.; RANSON, K. J. The lambertian assumption and Landsat data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. v. 46, n. 9, p. 1183-1189, 1980.

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

SOUDANI, K.; MAIRE, G.; DUFRÊNE, E.; FRANÇOIS, C.; DELPIERRE, N.; ULRICH, E.; CECCHINI, S. Evaluation of the onset of green-up in temperate deciduous broadleaf forests derived from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 5, p. 2643-2655, 2008.

SOUZA, G. M.; MATRICARDI, E. A. T. Análise comparativa dos modelos de elevação SRTM, ASTER GDEM e TOPODATA para estimar o fator topográfico (LS) da USLE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 4435-4442. Disponível em: <http://www.dsr.inp.e.br/sbsr2013/files/p0253.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2013.

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

ST-ONGE, B. A.; CAVAYAS, F. Automated forest structure from high-resolution imagery based on directional semivariogram estimates. **Remote Sensing of Environment**, 61: 82–95, 1997.

ST-ONGE, B. A.; CAVAYAS, F. Estimating forest stand structure from high-resolution imagery using the directional variogram. **International Journal of Remote Sensing**, 16: 1999–2021, 1995.

TEILLET, P. M.; GUINDON, B.; GOODENOUGH, D. G. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, n. 8, pp. 84 – 106, 1982.

TEILLET, P. M.; STAENZ, K. Atmospheric effects due to topography on MODIS vegetation index data simulation from AVIRIS imagery over mountainous terrain. Can. 1. **Remote Sensing of Environment**, v. 18, n. 4, p. 283-291. 1992.

TOMER, M. D.; ANDERSON, J. L.; LAMB, J. A. Landscape analysis of soil and crop data using regression. In: ROBERT, P. C. (Ed.). **Site-Specific Management for Agricultural Systems**. Madison: ASA, CSSA & SSSA. 1995. session 1, pp. 273-248.

TREITZ, P. M.; HOWARTH, P. J. Hyperspectral remote sensing for estimating biophysical parameters of forest ecosystems. **Progress in Physical Geography**, v. 23, pp. 359-390, 1999.

TROTTER, C. M. Characterising the topographic effect at red wavelengths using juvenile conifer canopies. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, p. 2215-2221, 1998.

TUCKER, C. J.; NEWCOMB, W. W.; LOS, S. O.; PRINCE, S. D. Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 6, p. 1133-1135, 1991.

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

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

TYC, G.; TULIP, J.; SCHULTEN, D.; KRISCHKE, M.; OXFORD, M. The RapidEye mission design. **Acta Astronautica**, v. 56, n. 1-2, p. 213–219, 2005.

VACCARO, S.; LONGHI, S. J. Análise fitossociológica de algumas áreas remanescentes da floresta do Alto Uruguai, entre os rios Ijuí e Turvo, no Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 33-53. 1995.

VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 539-546, 2003.

VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, Goiânia, 2005. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 3595-3602, 2005.

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

VALERIANO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. **Topodata**: processamento dos dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2010. 79 p.

VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M.; STORINO, M.; AMARAL, B. D.; MENDES, J. N.; LIMA, D. J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazônia with Shuttle Radar Topographic Mission – 90m data. **Computers and Geosciences**, v.32, n.8, p.1169-1181, 2006.

VAN LEEUWEN, W. J. D.; HUETE, A. R.; LAING, T. W. MODIS vegetation index compositing approach: a prototype with AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 69, n. 3, p. 264-280, 1999.

VASCONCELLOS, J. M. O.; DIAS, L. L.; SILVA, C. P.; SOBRAL, M. Fitossociologia de uma área de mata subtropical no Parque Estadual do Turvo-RS. **Revista do Instituto Florestal**, v. 4, p. 252-259, 1992.

VELASCO, G. D. N.; POLIZEL, J. L.; COLTRI, P. P.; LIMA, A. M. L. P.; SILVA FILHO, D. F. Aplicação do índice de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) em imagens de alta resolução no município de São Paulo e suas limitações. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 2, n. 3, 2007.

VERMOTE, E. F.; SALEOUS, N. Z. E.; JUSTICE, C. O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. **Remote Sensing of Environment**, v. 38, n. 1, p. 99-111, 2002.

VICENS, R. S.; CRUZ, C. B. M.; RIZZINI, C. M. Utilização de Técnicas de Sensoriamento Remoto na Análise da Cobertura Florestal da Reserva Florestal de Linhares, ES, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9, Santos, 1998. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998, p. 1561-1572.

VOGELMANN, J. E.; ROCK, B. N. Assessing forest decline in coniferous of Vermont using ZS-001 Thematic Mapper Simulator data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, n.10, p. 1303-1321, 1986.

VUOLO F, ATZBERGER C, RICHTER K, D'URSO G, DASH J. Retrieval of biophysical vegetation products from RapidEye imagery. In: WAGNER, W.; SZÉKELY, B. (Eds.): **ISPRS TC VII Symposium - 100 Years ISPRS**. IAPRS, Vienna, v. 38, p. 281-286, 2010.

WANG, J.; PRINCE, K. P.; RICH, P. M. Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 18, 2001.

WEYERMANN, J.; DAMM, A.; KNEUBÜHLER, M.; SCHAEPMAN, M. E. Correction of reflectance anisotropy effects of vegetation on airborne spectroscopy data and derived products. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 2013.

YAMAGUCHI, Y.; FUJISADA, H.; KUDUCH, M.; KAWAKAMI, T.; TSU, H.; KAHLE, A. B.; PNIEF, M. ASTER instrument characterization and operation scenario. **Advances in Space Research**, v. 23, n. 8, p. 1415-1424, 1999.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H.; HODGES, J. C. F.; GAO, F.; REED, B. C.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, n. 3, p. 471-475, 2003.