



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.27.14.14-TDI

**RELAÇÕES DE MÉTRICAS FENOLÓGICAS
EVI/MODIS DO TIMESAT COM SOMBREAMENTO E
PADRÕES ATÍPICOS DE TEMPERATURA EM
FLORESTA ESTACIONAL DECIDUAL**

Thiago Sousa Teles

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Lênio Soares Galvão, e
Fábio Marcelo Breunig, aprovada
em 24 de março de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J3G3LP>>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

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

Membros:

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

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.27.14.14-TDI

**RELAÇÕES DE MÉTRICAS FENOLÓGICAS
EVI/MODIS DO TIMESAT COM SOMBREAMENTO E
PADRÕES ATÍPICOS DE TEMPERATURA EM
FLORESTA ESTACIONAL DECIDUAL**

Thiago Sousa Teles

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Lênio Soares Galvão, e
Fábio Marcelo Breunig, aprovada
em 24 de março de 2015.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J3G3LP>

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Teles, Thiago Sousa.

T236r Relações de métricas fenológicas EVI/MODIS do TIMESAT com sombreamento e padrões atípicos de temperatura em floresta estacional decidual / Thiago Sousa Teles. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxii + 90 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.27.14.14-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadores : Drs. Lênio Soares Galvão, e Fábio Marcelo Breunig.

1. Fenologia por satélite. 2. Efeitos topográficos.
3. Temperatura. 4. TIMESAT. 5. Variações Climáticas. I.Título.

CDU 581.54:528.835

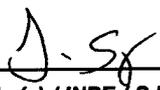


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

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

Dr. Lênio Soares Galvão



Presidente / Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Fábio Marcelo Breunig



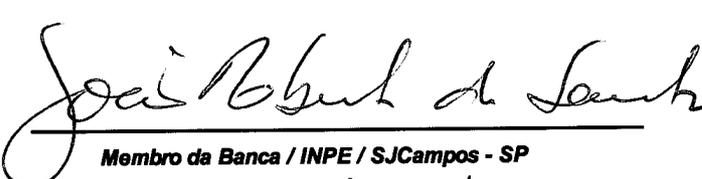
Orientador(a) / UFSM / Sta Maria - RS

Dr. Flávio Jorge Ponzoni



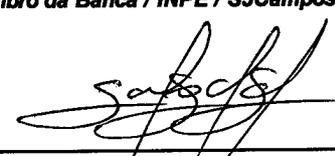
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. João Roberto dos Santos



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Edson Eyji Sano



Convidado(a) / EMBRAPA / Brasília - DF

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Título: "RELAÇÕES DE MÉTRICAS FENOLÓGICAS EVI/MODIS DO TIMESAT COM SOMBREAMENTO E PADRÕES ATÍPICOS DE TEMPERATURA EM FLORESTA ESTACIONAL DECIDUAL"

Aluno (a): **Thiago Sousa Teles**

São José dos Campos, 24 de Março de 2015

*Ó profundidade das riquezas, tanto da sabedoria, como da ciência de Deus!
Quão insondáveis são os seus juízos, e quão inescrutáveis os seus caminhos!*

Romanos 11:33

A meus pais, Fernando e Damiana Teles.

A minha avó, Raimunda Souza.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP; processo 2013/03908-3) pelo apoio financeiro para a realização do projeto.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade de realização do mestrado.

Aos professores da pós-graduação pelos ricos momentos de aprendizagem.

Aos Drs Lênio Soares Galvão e Fábio Marcelo Breunig pela orientação segura e pelo companheirismo nesta jornada.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Campus Frederico Westphalen pelo apoio ao projeto.

Aos Drs Rafaelo Balbinot e Luciano Denardi e aos colegas Rafael Vendruscolo; Jonathan Trautenmuller; William Gaida pelo apoio em campo.

Aos membros da Banca de avaliação pelas contribuições prestadas.

Aos companheiros de pós-graduação: Ana, Carolina, Caroline, Denis, Denise, Emily, Everton, Fábio, Fátima Lorena, Gabriel, Isaque, Leandro, Luciane, Mainara, Matheus, Tássia, Sabil, Silvia, Vinicius, William. Vivenciamos momentos inesquecíveis.

Ao Ricardo Dal'Agnol e à Yhasmin Moura, filhos do mesmo pai, pelas conversas e auxílio.

À Taíssa pelo apoio prestado na realização do mestrado.

A meus pais Fernando e Damiana Teles, amigos inabaláveis. Amo vocês.

À Lia e ao Antônio pelo incentivo e auxílio.

À Noeme pela compreensão e afeto durante a caminhada.

A todos aqueles que, mesmo não citados, contribuíram direta ou indiretamente para esta realização.

E, sobretudo, ao Mestre dos mestres, fonte de toda a sabedoria e inspiração, meu Grande Amigo!

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi verificar possíveis relações de métricas fenológicas extraídas pelo algoritmo TIMESAT com o sombreamento resultante das variações sazonais no Ângulo Zenital Solar (AZS) e dos efeitos topográficos locais e com padrões atípicos de temperatura observados na Floresta Estacional Decidual do Parque Estadual do Turvo (PET), localizado na região sul do Brasil. De forma mais específica, procurou-se: (1) caracterizar fisionômico-estruturalmente a vegetação da área de estudo; (2) extrair métricas fenológicas aplicando o TIMESAT ao produto *Enhanced Vegetation Index* (EVI) do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS/Terra) e analisar sua variabilidade sazonal; (3) correlacionar as métricas fenológicas com as frações sombra de um Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) e com os valores da imagem relevo sombreado ($\cos \lambda$) obtida de modelagem topográfica; (4) identificar padrões atípicos de temperatura entre 2002 e 2012 por meio de análise de ondeletas de dados de estação meteorológica; e (5) analisar a influência local de padrões anômalos de temperatura sobre a variação interanual das métricas fenológicas. Os resultados mostraram que a variação anual de EVI no PET apresentou valores máximos e mínimos associados à diminuição do Índice de Área Foliar (IAF) e ao aumento do AZS (sombreamento dos dosséis e efeitos topográficos) do verão para o inverno. A variação do IAF é resultado da deciduidade das espécies caducifólias do estrato superior em resposta ao fotoperíodo e a temperatura, onde a perda de folhas estaria associada à seca fisiológica durante o inverno. As métricas fenológicas, extraídas pelo TIMESAT, atreladas a periodicidade dos eventos (Início, Final, Duração e Data Central do Ciclo Sazonal), não tiveram correlações significativas com a fração sombra do MLME ou com a imagem relevo sombreado ($\cos \lambda$). Por outro lado, as métricas mais diretamente relacionadas com os valores absolutos de EVI (Nível de Base, Valor Máximo, Amplitude Sazonal, Derivadas da Borda Esquerda e Direita, Integral Maior e Menor) apresentaram correlações com o sombreamento. O espectro de ondeletas identificou dois períodos de maior potência no sinal relacionados às variações sazonais dos anos 2006/07 e 2009/10 e um de menor potência em 2003/04. As maiores potências compreenderam as diferenças de amplitude entre as elevadas temperaturas de verão dos ciclos 2006/07 e 2009/10 e as baixas temperaturas de inverno em 2007 e 2009. As baixas temperaturas do verão em 2003/04 foram detectadas pelas ondeletas como um período de menor potência da série temporal. As temperaturas mais elevadas dos ciclos de 2006/07 e 2009/10 estão possivelmente associadas aos eventos de El Niño-Oscilação Sul (ENOS). Ao serem verificadas correlações entre temperatura e a variação interanual das métricas fenológicas dos ciclos sazonais entre 2002 e 2012, verificou-se que: os valores absolutos de EVI Mínimo para o mês julho (inverno) foram estatisticamente correlacionados ($r = +0,77$) com a média das temperaturas dos meses de junho e julho, sendo 2007 e 2009 os anos que apresentaram os mais baixos valores da série; as métricas Final do Ciclo Sazonal, Duração do Ciclo Sazonal, Integral Maior e Integral Menor apresentaram correlações positivas e estatisticamente significantes com a variação interanual das temperaturas mínimas e médias para diferentes períodos. Estas métricas, para os ciclos 2006/07 e 2009/10, apresentaram médias superiores às verificadas nos demais anos. Já o ciclo 2003/04 apresentou a menor média para a métrica de Final do Ciclo Sazonal. As médias destes anos de comportamento atípico, para as métricas indicadas, foram significativamente diferentes ($p < 0,05$) dos demais anos, de acordo com o teste estatístico t -pareado. Imagens z -padronizadas geradas para estas métricas indicaram desvios positivos com relação à média para os ciclos

2006/07 e 2009/10, indicando que as temperaturas mais elevadas prolongaram o período de produtividade primária destes ciclos em relação à 2003/04.

RELATIONSHIPS OF TIMESAT PHENOLOGIC METRICS FROM EVI/MODIS WITH SHADOWS AND ATYPICAL TEMPERATURE PATTERNS IN SEASONAL DECIDUOUS FOREST

ABSTRACT

The objective of this work was to verify possible relationships between phenologic metrics extracted from the TIMESAT algorithm, shadows from strong seasonal variations in solar zenith angle (SZA) and local topographic effects, and anomalous patterns of temperature observed in seasonal deciduous forest from the Parque Estadual do Turvo (PET), located in south Brazil. More specifically, the objectives were to: (1) characterize floristic-structurally the vegetation of the study area; (2) obtain phenologic metrics applying the TIMESAT to the Enhanced Vegetation Index (EVI) of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS/Terra) and analyze their seasonal variation; (3) correlate the phenologic metrics with the shade fractions derived from the linear spectral mixture model (LSMM) and with shaded relief values ($\cos \theta$) from topographic modeling; (4) identify anomalous patterns of temperature between 2002 and 2012 using wavelet analysis applied to gauge station data; and (5) analyze the local influence of these anomalous patterns over the inter-annual variation of the phenologic metrics. Results showed that the seasonal EVI variations in the PET showed maximum and minimum values associated with decreasing leaf area index (LAI) and increasing SZA (canopy shadows and topographic effects) from the summer to winter. LAI variations mainly results from the deciduous species from the upper layer strata in response to the photoperiod and temperature and the physiologic drought in the winter. TIMESAT phenologic metrics associated with the periodicity of events (Start of Season, End of Season, Length of Season, Time of Middle of Season) were not correlated with the shade fraction from LSMM or with the shaded relief values ($\cos \theta$). On the other hand, metrics closely associated with the absolute EVI values (Base Value, Maximum Value, Amplitude, Left Derivative, Right Derivative, Large Integrated Value and Small Integrated Value) were correlated with shadows. The wavelet analysis indicated two high power seasonal cycles (2006/07 and 2009/10) and one low power cycle (2003/04). The largest power values were associated with the amplitude between the highest summer temperatures observed for 2006/07 and 2009/10 and the lowest ones measured in the winter of 2007 and 2009. The lowest wavelet power values were associated with the coldest winter of 2003/04. The temperature behavior of the summer of 2006/07 and 2009/10 is probably associated with El Niño Southern Oscillation (ENSO). When the correlation between the temperature and the inter-annual variation of phenologic metrics were analyzed, the absolute values of EVI minimum for the month of July (winter) were statistically correlated ($r = +0.77$) with average temperatures for the months of June and July, being 2007 and 2009 the years with the lowest values of the series. Positive correlations were obtained for End of Season, Length of Season, Small and Large Integrated Values with minimum and mean temperatures. These metrics presented larger mean values in 2006/07 and 2009/10 than in the other cycles. On the other hand, the lowest mean value was observed for End of Season in 2003/04. The mean metric values of these three cycles were statistically different from the other years, as indicated from a paired sample t -test ($p < 0.05$). Standardized z-score images showed positive standard deviation values for 2006/07 and 2009/10 and negative ones for 2003/04, indicating that the highest

summer temperatures of the first two cycles prolonged the primary production period when compared to 2003/04.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Métricas fenológicas que são extraídas pelo TIMESAT (espectro esquemático).....	16
Figura 2.2 - Exemplo da ondeleta de Morlet com diferentes valores de escala (a).....	22
Figura 2.3 - Espectro de potência de ondeleta.....	23
Figura 2.4 - Distribuição espacial da anomalia padronizada para o NDVI (parte superior) e EVI (parte inferior) para 2005, 2009 e 2010.....	25
Figura 3.1 - Localização do Parque Estadual do Turvo (PET) no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (RS).	26
Figura 3.2 – Valores médios mensais (1961-1990) de precipitação e temperatura da estação de Iraí-RS.....	27
Figura 4.1 - Fluxograma metodológico.....	29
Figura 5.1 - Distribuição de frequência dos indivíduos amostrados em classes de Altura Total.....	42
Figura 5.2 - Distribuição de frequência dos indivíduos amostrados em classes de DAP.....	43
Figura 5.3 - Densidade (ind.ha^{-1}) e riqueza por família.	44
Figura 5.4 – Média da variação anual de temperatura e EVI.	46
Figura 5.5 – Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) do Produto MOD15A2 e variações sazonais do ângulo zenital solar (AZS).....	47
Figura 5.6 – Imagens EVI/MODIS do verão (dezembro de 2011) (A) e inverno (julho de 2012) (B) no PET, mostrando o realce das feições topográficas com a maior quantidade de sombras vistas pelo MODIS no inverno.....	48
Figura 5.7 – Métricas fenológicas do ciclo sazonal 2011/12. A - Início do Ciclo Sazonal (Dia do Ano); B - Final do Ciclo Sazonal (Dia do Ano); C - Duração do Ciclo Sazonal (Dias); D - Nível de Base (IV); E - Data Central do Ciclo Sazonal (Dia do Ano); F - Valor Máximo (IV); G - Amplitude Sazonal (IV); H - Derivada da borda esquerda (Dia/IV); I - Derivada da borda direita (Dia/IV); J – Integral Maior (Dia-IV); L – Integral Menor (Dia-IV).....	51
Figura 5.8 – A: Composição das frações vegetação verde, solo e sombra do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) para a imagem-composição MODIS de 26 de junho de 2012. Os resultados foram projetados sobre um modelo digital de elevação (MDE) do SRTM.	

	B: Espectro de reflectância dos membros de referência do MLME, considerando apenas as 4 bandas do produto MOD13.	53
Figura 5.9	– Estrutura da vegetação de maior reflectância (maior fração de vegetação verde no MLME) que ocorre próximo às margens do rio Uruguai (lado Argentino). Fotografia adquirida em 14/09/2013...	53
Figura 5.10	– Diagramas de dispersão da relação entre a fração sombra do MLME e as métricas: Nível de Base (A), Amplitude Sazonal (B); Derivada da borda da Esquerda (C) e Integral Menor (D) do ciclo 2011/12.	55
Figura 5.11	– Imagem do cosseno do ângulo de incidência ($\cos i$) da imagem SRTM reamostrada de 30 m para 250m.	56
Figura 5.12	– Diagramas de dispersão da relação do $\cos i$ da imagem relevo sombreado com as métricas do ciclo 2011/12: Nível de Base (A), Amplitude Sazonal (B); Derivada da borda da Esquerda (C) e Integral Menor (D) e reflectância das Bandas Vermelho (E) e Infravermelho próximo (F).	58
Figura 5.13	– Espectro de Potência da Ondeleta Morlet (ordem 3) para os dados de Temperatura Média Diária (TMD) entre os anos de 2002 e 2012.	59
Figura 5.14	– Temperatura média diária. A: Média da temperatura diária para os meses de dezembro e janeiro; B: Média da temperatura diária para os meses de junho e julho. No eixo direito do gráfico, dados de temperatura, padronizados com relação a média, são apresentados.	61
Figura 5.15	– Boxplot das 11 métricas fenológicas do TIMESAT entre 2002 e 2012. Os dados de 100 pixels escolhidos aleatoriamente. As médias são mostradas em vermelho. A - Início do ciclo sazonal (Dia do Ano); B - Final do ciclo sazonal (Dia Juliano); C - Duração do ciclo sazonal (Dia do Ano); D - Nível de base (IV); E - Data central do ciclo sazonal (Dia do Ano); F - Valor máximo (IV); G - Amplitude Sazonal (IV); H - Derivada da borda Esquerda (IV/Dia); I - Derivada da borda Direita (IV/Dia); J – Integral Maior (IV-Dia); L - Integral Menor (IV-Dia).....	64
Figura 5.16	– Diagrama de dispersão da relação entre valores médios de temperatura e das métricas fenológicas Final do Ciclo Sazonal (A), Duração do Ciclo Sazonal (B), Integral Maior (C), Integral Menor (D) e EVI mínimo (E).	67
Figura 5.17	– Imagens padronizadas das Métricas fenológicas EVI/MODIS, calculadas usando o TIMESAT, para os ciclos sazonais de 2003/04 (valores baixos de potência na análise de ondeletas de dados de temperatura) e 2006/07-2009/10 (valores atipicamente altos de potência). As métricas foram padronizadas para o restante da série temporal entre 2002 e 2012.	71

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Produtos de Índices de Vegetação do sensor MODIS	8
Tabela 4.1 – MOD13Q1 Pixel Reliability e pesos de ponderação no TIMESAT	34
Tabela 4.2 – Métricas fenológicas extraídas pelo TIMESAT e selecionadas para estudo	35
Tabela 5.1 – Parâmetros biofísicos das parcelas amostradas na área do PET42	
Tabela 5.2 – Parâmetros fito-sociológicos de algumas espécies inventariadas no PET..	44
Tabela 5.3 – Correlação entre as 11 métricas fenológicas do TIMESAT (ciclo 2011/12) e a fração-sombra do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME).....	54
Tabela 5.4 – Correlação dos valores da imagem relevo sombreado ($\cos \theta$) com as 11 métricas fenológicas do TIMESAT (ciclo 2011/12) e a reflectância das bandas MODIS.....	57
Tabela 5.5 – Coeficientes de correlação das métricas fenológicas do TIMESAT e do EVI mínimo (média de 100 pixels) com as médias das temperaturas máximas, médias e mínimas para períodos distintos nos diferentes ciclos sazonais.....	65
Tabela 5.6 – Resultado do p-valor da estatística <i>t</i> -pareada de comparação de médias de 2003/04, 2006/07 e 2009/10 com os demais anos. ...	69
Tabela A.1 – Percentual de <i>Pixel Reliability</i> para os anos 2011 e 2012	89

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AZS	Ângulo Zenital Solar
AT	Altura Total
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BDMEP/INMET	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa/ Instituto Nacional de Meteorologia
CAP	Circunferência à Altura do Peito
CP	Componente Principal
DA	Densidade Absoluta
DAP	Diâmetro à Altura do Peito
DoA	Dominância Absoluta
DoR	Dominância Relativa
DR	Densidade Relativa
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
EnMAP	Environmental Mapping and Analysis Program
EVI	Enhanced Vegetation Index
FA	Frequência Absoluta
FR	Frequência Relativa
GIFOV	Ground-projected Instantaneous Field of View
GPS	Global Positioning System
H'	Índice de Shannon-Weaver
HPIM	Altura do Ponto de Inversão Morfométrica
HyspIRI	Hyperspectral Infrared Imager
IAF	Índice de Área Foliar
IV	Índice de Vegetação
IVI	Índice de Valor de Importância
J	Índice de Equabilidade de Pielou
LAI	Leaf Area Index
LUT	Look-up tables
MAIAC	Multi-angle Implementation of Atmospheric Correction for

	MODIS
MDE	Modelo Digital de Elevação
MLME	Modelo Linear de Mistura Espectral
MNF	Minimum Noise Fraction
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MRT	MODIS Reprojection Tools
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PET	Parque Estadual do Turvo
PPI	Pixel Purity Index
R	Coefficiente de Correlação
RS	Rio Grande do Sul
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TMD	Temperatura Média Diária
UTM	Universal Transverse Mercator

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Hipóteses do trabalho.....	5
1.2. Objetivo Geral.....	5
1.3. Objetivos específicos.....	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1. MODIS e os produtos Índices de Vegetação	7
2.2. Fenologia vegetal	10
2.3. Extração de métricas fenológicas com o TIMESAT	13
2.4. Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME).....	17
2.5. Efeito topográfico de iluminação.....	18
2.6. Transformada em ondeletas para a detecção de padrões meteorológicos em séries temporais.....	20
2.7. Teste t- pareado	23
2.8. Padronização z em imagens de sensoriamento remoto	24
3 ÁREA DE ESTUDO.....	25
4 METODOLOGIA DE TRABALHO.....	29
4.1. Seleção da área de estudo.....	29
4.2. Caracterização fisionômica-estrutural da vegetação	30
4.3. Aquisição dos dados MODIS e extração de métricas fenológicas com o TIMESAT	32
4.4. Relações das métricas fenológicas com a fração-sombra do MLME e com a imagem relevo sombreado (cos i).....	36
4.5. Análise de variação interanual de temperatura com ondeletas entre 2002 e 2012.....	37
4.6. Relação entre métricas fenológicas e padrões atípicos de temperatura	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1. Caracterização fisionômico-estrutural da vegetação	41
5.2. Comportamento sazonal do EVI, IAF/MODIS e das métricas Fenológicas do TIMESAT	45
5.3. Relações das métricas fenológicas com a fração-sombra do MLME e com a imagem relevo sombreado da Modelagem Topográfica	52

5.4.	Detecção de padrões atípicos de temperatura na série temporal (2002-2012) usando análise de Ondeletas	59
5.5.	Variabilidade interanual das métricas fenológicas relacionadas aos padrões atípicos de temperatura.	61
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
	APÊNDICE A – PIXEL RELIABILITY ANOS 2011 E 2012	89

1 INTRODUÇÃO

O impacto das mudanças climáticas sobre os ecossistemas tem sido motivo de preocupação e de investigação científica em escala global. Um dos questionamentos mais proeminentes diz respeito à resiliência e ao grau adaptativo das mais variadas formações vegetais para diferentes cenários de mudanças climáticas (MENZEL, 2002). Exemplos disso são os recentes trabalhos de Anderson (2012), Atkinson et al. (2011), Huete et al. (2008), Moura et al. (2012), Morton et al. (2014), Saleska et al. (2007) e Samanta et al. (2010). Eles têm buscado compreender o comportamento interanual de formações vegetais por meio de índices de vegetação (IV) obtidos de sensores remotos em diferentes níveis de aquisição.

Um dos aspectos que tem ganhado destaque nas investigações desta natureza está ligado aos estudos de fenologia (CLELAND et al., 2007). Este termo deriva da palavra grega *phaino*, que significa mostrar ou aparecer, podendo ser definido como o estudo da sazonalidade temporal dos eventos cíclicos de vida das espécies (RATHCKE; LACEY, 1985). Desta forma, os estudos de fenologia vegetal buscam observar o comportamento sazonal das plantas, que está ligado tanto a aspectos genéticos, quanto às condicionantes ambientais, principalmente às de ordem climática (CLELAND et al., 2007; SOUDANI et al., 2012; WALTHER et al., 2002).

A fenologia vegetal configura-se como um aspecto chave para a compreensão da resposta adaptativa das plantas frente às possíveis variações climáticas em escala local, regional e global (MENZEL, 2002; WALTHER et al., 2002). Estes estudos têm sido tradicionalmente realizados com observações em nível de espécie, que permitem um detalhamento quanto ao comportamento sazonal das plantas. No entanto, estas observações são extremamente limitadas por serem pontuais e requererem elevada demanda de tempo e custos financeiros para as observações de campo (CLELAND et al., 2007; MELAAS et al., 2013; SOUDANI et al., 2012). Assim, métodos indiretos podem corroborar no entendimento da dinâmica da vegetação frente a mudanças das condicionantes ambientais.

Nesse sentido, o sensoriamento remoto é uma importante fonte de informação para o monitoramento do comportamento sazonal e interanual da vegetação em escalas regional e global, considerando a alta resolução temporal de alguns sensores (GANGULY et al., 2010; XIAO et al., 2006). Embora não forneçam métricas fenológicas tão detalhadas como as obtidas em campo para espécies, os estudos de fenologia por satélite são essenciais para ampliar o escopo das informações geradas por observações pontuais de campo e para obter dados importantes sobre o funcionamento geral dos ecossistemas. Realisticamente, somente instrumentos de sensoriamento são capazes de adquirir dados de alta resolução temporal sobre áreas relativamente grandes do terreno (ANDREW; USTIN, 2009).

O sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo do satélite TERRA, tem sido usado como fonte de informação para a compreensão da fenologia vegetal de diversos ecossistemas (GANGULY et al., 2010; HMIMINA et al., 2013; KUPLICH et al., 2013; ZHU et al., 2013). O MODIS oferece diversos produtos associados ao monitoramento da cobertura vegetal em escala global, dentre os quais se destaca o produto composição de 16 dias de Índice de Vegetação (MOD13Q1 - Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m). Esse produto inclui os índices *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI); as imagens de reflectância de superfície utilizadas para seu cálculo; informações sobre a qualidade atmosférica de cada pixel usado na composição e sobre a geometria de aquisição/iluminação das imagens (HUETE et al., 2002). Este produto tem sido amplamente utilizado para investigações de cunho fenológico. Ele possibilita capturar os ciclos anuais e as variações interanuais da cobertura vegetal através de séries temporais e, assim, identificar não somente o comportamento fenológico como um todo, mas também possíveis anomalias face às variações ambientais (BRADLEY et al., 2011; HMIMINA et al., 2013; ZHANG et al., 2003).

Por meio destes produtos (NDVI e EVI) é possível extrair métricas fenológicas que indiquem o comportamento sazonal da vegetação que pode ser comparado entre anos distintos. Nesse sentido, diversas metodologias e

algoritmos computacionais têm sido desenvolvidos com a finalidade de gerar dados e informações para as análises de sazonalidade vegetal (ATZBERGER; EILERS, 2011). Dentre estes algoritmos, pode-se destacar o TIMESAT, que foi desenvolvido por Jönsson e Eklundh (2002).

O TIMESAT pode ser usado para a extração de parâmetros fenológicos das séries temporais de IV derivados do sensor MODIS/TERRA. Inicialmente, o algoritmo utiliza filtros para a suavização dos dados originais do MODIS, devido a sua natureza ruidosa. Posteriormente, são fornecidos os marcadores fenológicos com base nos dados suavizados, como por exemplo, de Início e de Final do Ciclo Sazonal, dentre outros parâmetros (JÖNSSON; EKLUNDH, 2004; 2012). Neste contexto, a identificação da dinâmica sazonal da vegetação através da extração de métricas fenológicas derivadas de imagens pode contribuir para a compreensão da resposta adaptativa das plantas face aos eventos climáticos locais ou regionais. Quando aplicado a dados MODIS, o TIMESAT pode ser usado tanto com o NDVI (ROUSE et al., 1973), quanto com o EVI (HUETE et al., 2002). O EVI é um índice que foi desenvolvido para minimizar o problema de saturação do sinal do NDVI e também para reduzir a influência dos efeitos de substrato do dossel e da atmosfera (HUETE et al., 2002). Embora seja mais sensível a atributos biofísicos dos dosséis como o Índice de Área Foliar (IAF) (BREUNIG et al., 2015), estudos recentes têm demonstrado que o EVI também é afetado por efeitos de geometria de iluminação (sombreamento) e de visada da cena (ANDERSON et al., 2011; GALVÃO et al., 2011; SIMS et al., 2011; MOURA et al., 2012; MORTON et al., 2014). No Brasil, estudos recentes usando o TIMESAT com dados EVI/MODIS foram feitos por Borges (2014) e Borges et al. (2014). Os autores testaram o desempenho de três diferentes filtros do TIMESAT, aplicados sobre a série temporal MODIS (2000-2011), reportando o bom desempenho do filtro Logística Dupla (*double logistic*) para estudos de uso e cobertura da terra no oeste da Bahia.

O *locus* de análise do presente trabalho é o Parque Estadual do Turvo (PET), localizado no noroeste do estado do Rio Grande do Sul. O PET é um

importante remanescente de Mata Atlântica de 17.500 ha, cuja formação vegetal predominante é de Floresta Estacional Decidual (SEMA, 2005). Encontra-se inserido no conjunto da selva "*misioneira*", que ocorre na Argentina e Paraguai. Esta área tem ainda sua importância ressaltada por sua rica flora e fauna, além de seus atrativos cênicos e paisagísticos (IBGE, 2012; SEMA, 2005). Ao contrário da precipitação que é regularmente distribuída ao longo do ano, o PET é caracterizado por um padrão sazonal bem definido de temperatura que influencia fortemente a deciduidade de várias espécies (FRANCO, 2008; SEMA, 2005; ROSA et al., 2013). As baixas temperaturas no inverno dificultam a absorção de água pelas raízes produzindo um déficit hídrico mesmo com a disponibilidade de água nos horizontes dos solos (VELOSO et al., 1991; FRANCO, 2008), resultando na perda de folhas.

Do ponto de vista de sensoriamento remoto, o PET constitui um interessante estudo de caso. Do verão (dezembro-março) para o inverno (junho-setembro), a variação no ângulo zenital solar (AZS) é muito elevada, sendo superior a 30°. Desta forma, para um dado ano, as métricas fenológicas do TIMESAT podem ser afetadas não apenas pelas mudanças em atributos biofísicos da Floresta Estacional Decidual, como o IAF, que diminui do verão para o inverno, mas também por outros fatores decorrentes do aumento sazonal do AZS. Estes fatores incluem maiores quantidades de sombras imageadas pelos sensores remotos no inverno, associadas às copas de árvores emergentes ou às variações locais de iluminação no terreno, resultantes do relevo dissecado do PET. A influência destes fatores sobre as métricas calculadas com dados EVI/MODIS usando o TIMESAT não foram reportadas na literatura e será objeto de investigação. Entretanto, como o AZS não varia para uma dada localidade entre anos, é possível antecipar que, mesmo diante da existência de possíveis relações entre métricas fenológicas e sombras, as séries temporais do EVI/MODIS e o algoritmo TIMESAT podem ser utilizados para extrair marcadores fenológicos no PET. Desta forma, é possível caracterizar o comportamento interanual destas métricas, verificando possíveis associações com padrões meteorológicos locais de temperatura para um dado período de tempo.

1.1. Hipóteses do trabalho

Testa-se a hipótese de que algumas métricas fenológicas extraídas na Floresta Estacional Decidual do PET, a partir dos dados EVI/MODIS, são influenciadas pelo sombreamento dos dosséis e por efeitos topográficos locais. Testa-se ainda a hipótese de que padrões atípicos de temperatura ocorridos nos ciclos sazonais entre 2002 a 2012 influenciaram a resposta fenológica interanual da vegetação, sendo assim, passíveis de detecção pelas métricas fenológicas geradas no TIMESAT.

1.2. Objetivo Geral

Verificar possíveis relações das métricas fenológicas do TIMESAT (EVI/MODIS) com o sombreamento, resultante das variações sazonais no AZS e dos efeitos topográficos locais, e com padrões atípicos de temperatura observados na Floresta Estacional Decidual do PET (2002-2012).

1.3. Objetivos específicos

- a) Caracterizar fisionômico-estruturalmente a Floresta Estacional Decidual do PET;
- b) Extrair métricas fenológicas do produto EVI/MODIS entre 2002 e 2012 através do algoritmo TIMESAT, analisando sua variabilidade sazonal;
- c) Verificar a existência de possíveis relações das métricas fenológicas com as frações sombra de um Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) e com a imagem Cosseno do ângulo de incidência i (relevo sombreado), calculado de um modelo digital de elevação (MDE) da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM – 30 m) aplicado aos dados MODIS;
- d) Identificar padrões atípicos de temperatura na área de estudo entre os anos 2002 e 2012, utilizando a técnica Ondeletas (*Wavelet*) aplicada a dados da estação meteorológica mais próxima do PET;

e) Analisar a influência local de padrões anômalos de temperatura sobre a variação interanual das métricas fenológicas no período de 2002 a 2012.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. MODIS e os produtos Índices de Vegetação

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) opera a bordo dos satélites Terra e Aqua, lançados em 1999 e 2002, respectivamente. Estas plataformas possuem órbita Sol-síncrona e altitude nominal de 705 km. Esse sensor possui 36 bandas espectrais no intervalo de 405 a 14.385 nm, com resolução radiométrica de 12 bits e resolução espacial de 250 m, para as bandas 1 e 2, 500 m para as bandas 3 a 7 e 1000 m para as bandas 8 a 36. O sensor possui um campo de visada nominal de $\pm 55^\circ$, com faixa de imageamento de 2330 km, o que permite tempo de revisita quase diário, dependendo da latitude (NASA, 2014).

Além das imagens de reflectância de superfície, diversos produtos são gerados a partir do sensor MODIS, como, por exemplo, os índices de vegetação do produto MOD13: o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Melhorado (EVI). O fornecimento destes produtos é realizado em imagens-composição de 16 dias ou mensais, a fim de serem minimizados os efeitos de nuvens e da geometria de aquisição das imagens (JUSTICE et al., 2002). Na Tabela 2.1 são apresentadas algumas especificações de diferentes produtos índices de vegetação.

Tabela 2.1 - Produtos de Índices de Vegetação do sensor MODIS

Abreviação	Nome por extenso	Resolução Temporal	Resolução Espacial	Tipo de raster
MOD13A1	MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m SIN Grid	16 dias	500m	Tile
MOD13A2	MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1km SIN Grid	16 dias	1km	Tile
MOD13A3	MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 1km SIN Grid	Mensal	1km	Tile
MOD13C1	MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 0.05Deg CMG	16 dias	5600m	CMG
MOD13C2	MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05Deg CMG	Mensal	5600m	CMG
MOD13Q1	MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid	16 dias	250m	Tile

Fonte: Adaptado de Justice et al (2002); USGS (2014).

Os produtos NDVI e EVI do MODIS têm como objetivo principal caracterizar efetivamente os estados e processos biofísicos/bioquímicos da vegetação em escala global (NASA, 2014). O NDVI aparentemente é mais sensível à clorofila (banda do vermelho) do que o EVI, enquanto este último apresenta maior sensibilidade às variações estruturais do dossel (HUETE et al., 2002). Uma diferença importante entre ambos os índices é que o NDVI tende a saturar mais rapidamente com o aumento do Índice de Área Foliar (IAF) em florestas tropicais (HUETE et al., 2002; WANG et al., 2005).

As imagens NDVI são composições que apresentam a diferença normalizada entre as bandas do infravermelho próximo e vermelho. Este índice foi proposto inicialmente por Rouse et al. (1973) a fim de normalizar a razão simples ($SR = (\rho_{IVP}/\rho_V)$) no intervalo de -1 a 1. Este índice é calculado através da Equação 2.1.

$$NDVI = \frac{\rho_{nir^-} - \rho_{red}}{\rho_{nir^+} + \rho_{red}} \quad (2.1)$$

Onde, ρ_{nir} é a reflectância na banda do infravermelho próximo e o ρ_{red} é a reflectância na banda do vermelho.

O NDVI tem sido amplamente utilizado em diversas pesquisas por permitir a construção de perfis sazonais/anuais e de crescimento da vegetação. É o índice de vegetação mais frequentemente utilizado. Por outro lado, como mencionado anteriormente, apresenta problemas de saturação sob condições de elevada quantidade de biomassa, além de ser bastante sensível aos efeitos de solo ou substrato no estudo de vegetação esparsa (JUSTICE et al., 1998; HUETE et al., 2002).

Já o EVI é um índice que foi desenvolvido a fim de minimizar o problema de saturação do sinal do NDVI e também de reduzir a influência dos efeitos de substrato do dossel e da atmosfera. O EVI é calculado por meio da Equação 2.2.

$$EVI = G * \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + C_1 * \rho_{red} - C_2 * \rho_{blue} + L} \quad (2.2)$$

Onde, ρ_{nir} é a reflectância na banda do infravermelho próximo; ρ_{red} é a reflectância na banda do vermelho; ρ_{blue} é a reflectância na banda do azul; G é um fator de ganho igual a 2,5; C_1 e C_2 são coeficientes de ajuste para o efeito de resistência dos aerossóis, que usa a faixa azul para corrigir influências de aerossóis na faixa vermelha, e correspondem a 6 e 7,5, respectivamente; $L=1$ e refere-se a um fator de ajuste do substrato do dossel (HUETE et al., 2002).

O produto MOD13Q1 (MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid) fornece seus dados em imagens-composição de 16 dias com resolução espacial de 250 m. Além das imagens dos índices de vegetação NDVI e EVI, são fornecidas no conjunto dos metadatos: as imagens de reflectância de superfície das bandas 1 (vermelho), 2 (infravermelho próximo), 3 (azul) e 7 (infravermelho de ondas curtas); as informações de geometria de aquisição/iluminação (ângulo zenital solar, ângulo zenital de visada e ângulo azimutal); e as informações sobre a qualidade da aquisição dos dados (VI *Quality* e Pixel *Reliability*) (USGS, 2014).

Outro produto oriundo do MODIS é o Índice de Área Foliar – IAF (*Leaf Area Index – LAI*), denominado MOD15A2 (MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 1 km SIN Grid V005). O IAF é um índice (adimensional) que expressa a quantidade em área de folhas por área no terreno (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007). Este produto é uma composição de 8 dias e com 1 km de resolução espacial. Sua geração se dá através de modelo de transferência radiativa, utilizando um conjunto de dados tabelados (*Look-up tables – LUT*) e um mapa de cobertura para 8 biomas (MYNENI et al., 2002; TAN et al., 2005). Entretanto, quando há incertezas nos dados de entrada, o modelo de transferência radiativa é substituído por outro empírico, baseado nas relações entre o NDVI e o IAF para cada um dos biomas pré-definidos (BREUNIG et al., 2011; KNYAZIKHIN et al., 1999; USGS, 2014; YANG et al., 2006).

2.2. Fenologia vegetal

A fenologia é o estudo dos eventos periódicos dos ciclos de vida dos animais e plantas (CLELAND et al., 2007). Estes ciclos, marcados pela sazonalidade, são condicionados pelos fatores genéticos de cada espécie e pelo processo evolutivo-adaptativo ao ambiente em que se encontram (ANDERSON, 2012; SOUDANI et al., 2012). Deste modo, os estudos de fenologia vegetal estão diretamente ligados ao calendário de eventos sazonais como, por exemplo, a brotação, floração, frutificação (incluindo dispersão), senescência e queda de folhas (HMIMINA et al., 2013; RATHCKE; LACEY, 1985).

Estes padrões fenológicos presentes nos ciclos de vida das espécies são quantitativamente definidos por parâmetros como o tempo de ocorrência (início, meio, forma), duração (intervalo), sincronia (variância) e assimetria (RATHCKE; LACEY, 1985). Desta forma, os estudos fenológicos se configuram como um importante meio de investigação sobre o comportamento das espécies, principalmente no que tange a possíveis variações nos padrões ambientais a que estão sujeitas.

Os ciclos sazonais da vegetação são fortemente modulados pelas condições climáticas, especialmente a temperatura, o fotoperíodo e a disponibilidade de

água (SOUDANI et al., 2012). Deste modo, os estudos de fenologia podem contribuir para a compreensão da interação vegetação-clima, sendo ainda um forte indicador de possíveis variações climáticas em escalas de tempo de curta e longa duração (HMIMINA et al., 2013; SOUDANI et al., 2012; WALTHER et al., 2002). Assim, mudanças no ciclo fenológico são uma referência sobre a resposta adaptativa da vegetação às mudanças do clima (CLELAND et al., 2007; SOUDANI et al., 2012).

Outro aspecto ligado aos estudos fenológicos é a sua influência nos fluxos de água, energia e carbono (GANGULY et al., 2010). Diversas abordagens têm associado à resposta fenológica da vegetação aos impactos de troca de energia em diferentes escalas. Mudanças no ciclo fenológico afetam o comportamento fotossintético da vegetação e, conseqüentemente, a magnitude dos fluxos oriundos deste processo (HMIMINA et al., 2013; PAÑUELAS; FILELLA, 2001; RICHARDSON et al., 2009; WILSON et al., 2001).

Tradicionalmente os estudos de fenologia vegetal têm sido realizados com base em observações de campo em nível de espécie. Estas observações fornecem informações detalhadas dos estádios fenológicos individuais de diferentes espécies de plantas relacionadas, por exemplo, com o tempo de desenvolvimento foliar e de floração. O registro destas observações é secular e tem sido realizada em diversos locais com uma grande variedade de espécies (CLELAND et al., 2007; MELAAS et al., 2013).

No entanto, estes estudos fenológicos em nível de espécie são extremamente limitados no que tange a disponibilidade de dados para construção de modelos e monitoramento em larga escala (MELAAS et al., 2013). Além disso, eles requerem elevados custos financeiros, demandam grande período de tempo e estão sujeitos às incertezas quanto aos métodos utilizados (CLELAND et al., 2007; SOUDANI et al., 2012).

Por outro lado, a utilização das técnicas de sensoriamento remoto constitui importante alternativa para os estudos fenológicos convencionais (CLELAND et al., 2007; GANGULY et al., 2010). Alguns sensores orbitais possibilitam o

monitoramento em escalas regionais e em intervalos regulares de observação que permitem revelar o comportamento sazonal de vegetação (GANGULY et al., 2010; XIAO et al., 2006). Embora fenofases, como a floração e a frutificação, não possam ser identificadas em imagens orbitais de moderada resolução espacial, várias métricas fenológicas podem ser extraídas destes dados devido a sua regularidade, alta frequência temporal e a grande abrangência espacial dos dados (CLELAND et al., 2007). No entanto, é importante ter em mente que os estudos de fenologia por satélite não fornecem informações tão detalhadas como as obtidas em estudos convencionais de campo.

Estas métricas fenológicas geradas a partir de sensores orbitais são extraídas a partir dos dados de reflectância de superfície e da geração de produtos como os Índices de Vegetação (p. ex. NDVI, EVI). Estes, por sua vez, permitem verificar o comportamento sazonal da vegetação através das diferentes respostas espectrais em cada ciclo fenológico (HMIMINA et al., 2013; SOUDANI et al., 2012; XIAO et al., 2006; ZHANG et al., 2003).

Na literatura, os IVs têm sido usualmente aplicados em estudos fenológicos por meio de duas abordagens. A primeira utiliza diretamente os índices como sendo métricas que caracterizam o comportamento fenológico da vegetação. A segunda tem utilizado algoritmos para a extração de métricas sazonais (marcadores fenológicos) a partir dos mesmos. Dentro destas duas abordagens, diversas aplicações têm utilizado as variáveis fenológicas extraídas por sensores remotos, como por exemplo, para a caracterização sazonal de ecossistemas (ANDERSON, 2012; CHEN et al., 2009; DILLEN et al., 2012; HMIMINA et al., 2013; ISAACSON et al., 2012; SILVA et al., 2013; ZHANG et al., 2003); identificação de espécies (ANDREW; USTIN, 2009; DENNISON; ROBERTS, 2003; CHO et al., 2010); mapeamento de uso e cobertura do solo (CLARK et al., 2010; HESKETH; SANCHEZ-AZOFEIFA, 2012); mapeamento de fenorregiões (SILVA et al., 2013); e detecção de anomalias, variações climáticas e resiliência de formações vegetais (ATKINSON et al., 2011; BRADLEY et al., 2011; BROWN et al., 2012; HUETE

et al., 2006; JÖNSSON et al., 2010; SALESKA et al., 2007; SAMANTA et al., 2010).

Exemplos de sistemas sensores tradicionalmente utilizados para fornecer informações sobre a dinâmica global da vegetação incluem o MODIS/Terra e o *Advanced Very High Resolution Radiometer* - AVHRR/NOAA. No entanto, o grande desafio do uso destes e de outros sistemas imageadores na geração de informações fenológicas é reduzir as incertezas inerentes ao sistema sensor, à aquisição e ao processamento dos dados coletados. Por serem sensores de campo de visada amplo, seus dados são influenciados por fatores como a geometria de iluminação e de visada e pelas condições atmosféricas, que podem introduzir incertezas na interpretação dos resultados (BREUNIG et al., 2011; GALVÃO et al., 2011; HIRD; MCDERMID, 2009; VERBESSELT et al., 2010; SOUDANI et al., 2012). Por isso, é de extrema importância que as informações adquiridas por sensores orbitais recebam o devido processamento para a redução destes artefatos (CLELAND et al., 2007; HMIMINA et al., 2013).

2.3. Extração de métricas fenológicas com o TIMESAT

O programa TIMESAT foi desenvolvido por Jönsson e Eklundh (2002) com o objetivo de extrair informações sobre a sazonalidade da vegetação através de dados oriundos de sensores remotos. Os parâmetros sazonais extraídos através deste programa são derivados das séries temporais dos IV oriundos, por exemplo, das medições espectrais dos sensores AVHRR/NOAA, VEGETATION/SPOT e MODIS/TERRA.

O processamento da série temporal é inicialmente feito através de filtros de suavização devido à natureza ruidosa destes dados de entrada. O programa utiliza três diferentes métodos para o processamento das séries temporais baseado no ajuste pelo método dos mínimos quadráticos aplicados no conjunto dos dados de IV. O primeiro método utiliza funções polinomiais locais na filtragem e pode ser classificado como um filtro Savitzky-Golay adaptativo. Os outros dois se baseiam no método dos mínimos quadrados ordinários, onde os dados são filtrados por funções não-lineares de diferentes complexidades,

sendo um baseado em funções harmônicas e o outro em funções Gaussianas assimétricas (JÖNSSON; EKLUNDH, 2004). A formulação matemática específica de cada um destes filtros pode ser encontrada em Jönsson e Eklundh (2012).

Os filtros Savitzky-Golay e Gaussiano assimétrico podem ser classificados como métodos local e semi-local, respectivamente. Por outro lado, o filtro de base harmônica é um método global, uma vez que utiliza os dados de todo o ano na filtragem. A vantagem de métodos locais e semi-locais é que eles têm um bom funcionamento, mesmo para séries temporais que são semi-periódicas. O método global, que tem um período fixo de um ano, é desfavorável nesses casos (JÖNSSON; EKLUNDH, 2004).

Para os dados de IV pouco afetados por ruídos, o método de filtragem Savitzky-Golay tem um excelente desempenho, uma vez que os métodos locais são capazes de detectar comportamentos mais complexos, tais como um aumento rápido do índice seguido de um patamar decrescente. Para séries temporais ruidosas, os dados filtrados pelo Savitzky-Golay são por vezes difíceis de interpretar. Nestes casos, torna-se necessário aplicar restrições e forçar os dados para a forma funcional fixa que pode ser gerado através do método Gaussiano assimétrico ou da base harmônica e polinomial combinado. O método Gaussiano assimétrico, por outro lado, é menos sensível aos ruídos e parece fornecer melhores previsões para o início e o fim dos ciclos sazonais (JÖNSSON; EKLUNDH, 2004).

Como exposto anteriormente, estes três métodos são baseados no ajuste dos mínimos quadráticos para o processamento das séries temporais. Deste modo, suponha que se tenha uma série temporal (t_i, I_i) , $i = 1, 2, \dots, N$ e uma função modelo $f(t)$ (Equação 2.3):

$$f(t) = c_1\varphi_1(t) + c_2\varphi_2(t) + \dots + c_M\varphi_M(t), \quad (2.3)$$

Onde, $\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_M(t)$, são funções de base arbitrárias. Então, os melhores valores, no sentido dos mínimos quadrados, dos parâmetros c_1, c_2, \dots ,

c_M são obtidos através da resolução do sistema de equações normais, de forma que o somatório dos resíduos seja mínimo. A forma matricial da equação é apresentada na Equação 2.4:

$$A^T A_c = A^T b, \quad (2.4)$$

Onde,

$$A_{ij} = \omega_i \varphi_j(t_i), \quad b_i = \omega_i y_i \quad (2.5)$$

Onde, ω_i é o peso do valor dos dados i -ésimo, que se presume conhecido. Assim, quanto maiores os valores atribuídos aos pesos, maior será sua influência no ajuste da função. Se os pesos não são conhecidos, podem ser ajustados para o valor constante de $\omega = 1$ (JÖNSSON; EKLUNDH, 2012).

No TIMESAT, classificações de cobertura de nuvens ou outros dados complementares podem ser usados para atribuir pesos aos valores da série temporal, como por exemplo, os dados de qualidade de pixel do sensor MODIS (*Pixel reliability*). Os pesos atribuídos a estas informações variam de 0 a 1, onde 1 é associado aos pixels de melhor qualidade e 0 aos de pior. Deste modo, alguns picos e valores atípicos podem ser detectados com a utilização dos dados de qualidade auxiliares para suavização da série temporal (JÖNSSON; EKLUNDH, 2012).

Após a suavização da série temporal, o algoritmo extrai imagens dos atributos fenológicos a partir das funções ajustadas pelos métodos descritos anteriormente. Estes atributos são apresentados para a variação do ciclo sazonal de cada ano (Figura 2.1).

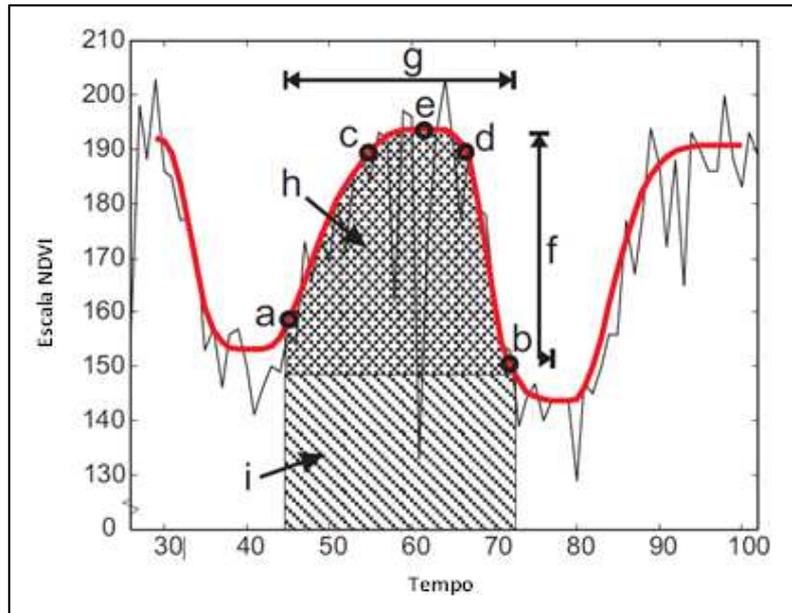


Figura 2.1 - Métricas fenológicas que são extraídas pelo TIMESAT (espectro esquemático). Os pontos a e b marcam o início e o final do ciclo sazonal, respectivamente. Os pontos c e d representam o nível de 80% de distribuição dos dados. O ponto e mostra o máximo valor. f é a amplitude sazonal e g é a duração da estação. As integrais h e i mostram o efeito cumulativo de crescimento da vegetação durante a temporada. Fonte: adaptado de Jönsson e Eklundh (2012).

Na Figura 2.1, os marcadores de Início (a) e Final do Ciclo Sazonal (b) representam o tempo para o qual a borda esquerda aumenta e a da direita diminui, respectivamente, para um nível que deve ser definido pelo usuário (p. ex. 20%). Os parâmetros (c) e (d) representam a taxa de variação (Derivadas da Borda Esquerda e Direita), para os quais, respectivamente, o nível da borda da esquerda e o da direita aumenta 80% em relação ao nível mínimo e ao ponto de Valor Máximo (e) (JÖNSSON; EKLUNDH, 2012).

A Amplitude (f) do Ciclo é obtida com a diferença entre o Valor Máximo e o Nível de Base. Este representa a média dos valores mínimos da esquerda e da direita. A Duração do Ciclo (g) representa a diferença entre o Final e o Início do Ciclo Sazonal. O algoritmo fornece ainda o valor de duas integrais. A primeira, Integral Menor (h), refere-se à área da região entre a função ajustada e o nível médio dos valores mínimos da esquerda e da direita. Ela representa a vegetação sazonalmente ativa, sendo maior em florestas decíduais do que em áreas de vegetação perene (JÖNSSON; EKLUNDH, 2004; 2012).

A segunda, Integral Maior ($h+i$) é dada pela área entre a função ajustada e o nível zero. Ela pode ser associada à produtividade total da vegetação. Assim, quanto mais vigorosa for uma formação vegetal, maior será sua resposta ao IV e, portanto, maior será o valor da Integral. Por exemplo, em florestas perenes, a Integral Menor pode ser pequena, por não apresentar a marcada sazonalidade das florestas decíduais, enquanto que a Integral Maior apresentará valores mais elevados, em decorrência do seu vigor vegetativo alto e constante. (JÖNSSON; EKLUNDH, 2004).

2.4. Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME)

A resposta dos pixels é resultante da mistura espectral dos objetos contidos em cada uma das unidades de resolução projetadas pelo detector no GIFOV (*Ground-projected Instantaneous Field of View*). Assim, a resposta espectral de cada pixel é derivada da combinação das respostas espectrais dos objetos que compõem a superfície imageada (ADAMS; GILLESPIE, 2006; SCHOWENGERDT, 2007).

O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) tem como objetivo modelar a resposta espectral dos diferentes componentes presentes em cada pixel. Os pixels considerados “puros”, ou seja, representativos de um determinado componente de cena (p. ex., vegetação verde, solo ou sombra), são denominados de *endmembers* (membros de referência). Eles servem como referência no modelo para a geração das “imagens-fração”. Estas imagens representam as proporções dos componentes presentes em cada unidade de resolução, assumindo a combinação linear da resposta espectral destes diferentes elementos (ADAMS; GILLESPIE, 2006; GALVÃO et al., 2001; SCHOWENGERDT, 2007). Matematicamente o modelo de mistura espectral pode ser descrito por meio da Equação 2.6:

$$r_i = \sum a_{ij}x_j + e_i \quad (2.6)$$

Onde, r_i é a reflectância espectral média para a i -ésima banda espectral; a_{ij} é a reflectância espectral da j -ésima componente no pixel para a i -ésima banda

espectral; x_j é o valor de proporção da j -ésima componente do pixel; e_i é o erro para a i -ésima banda espectral; j é 1,2..., n (n =número de componentes assumidos para o problema); i é 1,2..., m (m =número de bandas espectrais para o sistema sensor) (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Para a seleção dos *endmembers* que compõem o modelo são utilizadas diversas técnicas, dentre elas a aplicação das técnicas Fração Mínima do Ruído (*Minimum Noise Fraction* – MNF) e Índice de Pureza do Pixel (*Pixel Purity Index* - PPI) (BOARDMAN et al 1995). O MNF é considerado uma Componente Principal (CP) modificada, que objetiva, através de transformação, o isolamento dos ruídos das imagens (GREEN et al., 1988). Para isto, ela promove a redução da dimensionalidade dos dados por decorrelação. Deste modo, o produto final são imagens (componentes) resultantes da combinação dos valores originais, ordenadas da maior para a menor variância ou sinal/ruído. As primeiras componentes, por possuírem maior quantidade de variância, podem ser usadas como dados de entrada para a técnica PPI e para auxiliar a escolha dos membros de referência através de visualizador n -dimensional (CARVALHO JÚNIOR et al., 2003; SCHOWENGERDT, 2007).

PPI é uma técnica que objetiva verificar os valores extremos (vértices) em diagramas de espalhamento n -dimensionais a partir de diversas interações. O produto final é uma imagem contendo o número de vezes em que o pixel foi definido como extremo em projeções aleatórias entre bandas ou componentes. Assim, quanto maior for o valor do PPI em um pixel, maior será a possibilidade deste pixel conter material com maior grau de pureza para um determinado componente de cena (CARVALHO JÚNIOR et al., 2003; ITT, 2014).

2.5. Efeito topográfico de iluminação

A radiância espectral registrada pelos sensores pode ser influenciada pelo efeito que a topografia gera sob a iluminação solar em áreas de relevo irregular. Este efeito topográfico de iluminação é resultado da combinação dos ângulos zenitais e azimutais solares e da variação da declividade e da orientação do terreno, para um determinado ponto de observação (HOLBEN;

JUSTICE, 1980; TEILLET et al., 1982). As variações de iluminação do terreno causadas pela topografia podem gerar diferentes respostas radiométricas dos componentes de cena, que supostamente deveriam ser iguais, considerando um mesmo tipo de alvo refletor (p. ex. a floresta do PET). Tal fato pode ser observado em imagens de satélites na diferença de brilho (nível de cinza) entre as faces iluminadas e sombreadas do relevo (MOREIRA; VALERIANO, 2014; PROY et al. 1989). Matsushita et al. (2007) verificaram a sensibilidade do NDVI e EVI quanto aos efeitos topográficos em uma área montanhosa com plantação de cipreste no Japão. Os resultados mostraram a sensibilidade que os índices tiveram aos efeitos topográficos, sendo que o EVI apresentou maior sensibilidade em relação ao NDVI, justificada pelos autores pela influência do fator de ajuste do solo “L” presente no cálculo do índice. Este efeito topográfico, resultante da combinação da incidência da fonte (sol) e da declividade e orientação do terreno, é relacionado com o que se denomina de relevo sombreado ($\cos i$) ou fator cosseno (DUBAYAH; RICH, 1995; SELLERS, 1965; SLATER, 1980) (Equação 2.7):

$$\cos i = \cos \theta_s \cos \theta_t + \sin \theta_s \sin \theta_t \cos (\varphi_s - \varphi_t) \quad (2.7)$$

Onde, θ_s é o ângulo zenital solar; θ_t é o ângulo zenital da normal da superfície, correspondente a declividade; φ_s é o ângulo azimutal solar; e φ_t é o ângulo azimutal da normal da superfície, indicada pela orientação de vertentes.

Deste modo, para uma dada imagem, cujos valores de geometria de iluminação (zênite e azimute solar) são constantes, o que definirá a variação do fator cosseno será a geometria da superfície. Em áreas que apresentam relevo plano, o fator cosseno não sofrerá variações, pois a radiância será constante. De modo contrário, em áreas de relevo acentuado, o fator cosseno indicará a variação de iluminação da cena em função da topografia. Assim, quanto maior for o $\cos i$ de uma superfície, maior é seu grau de iluminação, variando de 0 (sombreado) à 1 (iluminado) (MOREIRA, 2014; VALERIANO, 2011).

2.6. Transformada em ondeletas para a detecção de padrões meteorológicos em séries temporais

A transformada em ondeletas, do inglês *wavelet*, tem sido amplamente utilizada em diversos campos do conhecimento, inclusive em aplicações ligadas à meteorologia, com a finalidade de identificar padrões em séries temporais de dados (ANDRADE, 2011; LAU; WENG, 1995; SILVA et al., 2010; TORRENCE; COMPO, 1998). O princípio básico desta transformada é a decomposição dos sinais em diferentes domínios de frequências e a indicação da variabilidade no domínio do tempo (GUTIERREZ, 2002; LIMA, 2002). Tal característica é de extrema importância para a análise de sinais que apresentam comportamento transitório, como tendências ou mudanças abruptas, pois permite conhecer o conteúdo da frequência do sinal localmente no tempo (CAPOZZOLI, 2011).

Esta decomposição dos sinais é feita por meio das funções ondeletas que envolvem a transformação da série unidimensional em um espaço de tempo e frequência (ARAÚJO; SILVA, 2001). As ondeletas são um conjunto de funções com a forma de pequenas ondas geradas por dilatações e translações, que permitem distinguir as características locais de um sinal em diferentes escalas e cobrindo toda a região deste sinal (LIMA, 2002; VITORINO, 2003).

Matematicamente, a transformada em ondeletas decompõe um sinal $s(t)$ em termos de funções elementares $\psi_{b,a}(t)$, chamadas de ondeletas filhas, que são derivadas de uma ondeleta-mãe $\psi(t)$ por dilatação (a) e translação (b) (LAU; WENG, 1995). Sua formulação matemática pode ser visualizada na Equação 2.8:

$$\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{(a)^{1/2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.8)$$

Onde, b denota a posição (translação) e " a " (>0) indica a escala (dilatação) da ondeleta; $\psi_{b,a}(t)$ são chamadas de ondeletas filhas ou simplesmente ondeletas. Um fator de normalização de energia $(a)^{1/2}$ em (1) remete a energia da ondeleta filha igual à da mãe.

Deste modo, a transformada em ondeletas de um sinal real $s(t)$ com respeito à função de ondeletas $\psi(t)$ pode ser definida como uma integral-convolução (Equação 2.9):

$$W(b, a) = \frac{1}{(a)^{1/2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) s(t) dt \quad (2.9)$$

Onde, $W(b,a)$ é o coeficiente da ondeleta da função $s(t)$; $\psi(t)$ é a ondeleta analisada; $a (>0)$ é o parâmetro da escala e b é o parâmetro da posição (LAU; WENG, 1995; STARCK et al., 2000).

Existem diversas funções utilizadas para gerar ondeletas que possuem aplicações específicas em diferentes sinais, como por exemplo, as de Morlet, Haar, Chapéu Mexicano e Daubechies (LIMA, 2002; STARCK et al., 2000). Em dados de natureza geofísica, como é o caso dos dados meteorológicos, tem-se aplicado usualmente a função em ondeleta de Morlet. Isto porque os sinais meteorológicos são não-estacionários e com uma grande variedade de regimes de frequência localizados no tempo (ANDRADE, 2011; BOIASKI, 2013, SILVA et al., 2010; TORRENCE; COMPO, 1998).

A ondeleta de Morlet se aproxima dos dados meteorológicos por sua natureza complexa e carrega características como simetria ou assimetria e variação temporal brusca ou suave (BOIASKI, 2013, SILVA et al 2010, WENG; LAU, 1994). A vantagem de se utilizar a ondeleta de Morlet é devido a sua natureza complexa capaz de detectar a amplitude e fase, em função do tempo, para diferentes frequências expostas na série temporal (LAU; WENG, 1995). A função desta ondeleta é não-ortogonal, cuja amplitude é modulada por uma Gaussiana. Sua formulação matemática é dada pela Equação 2.10 (WENG; LAU, 1994):

$$\psi(t) = e^{ik\psi t} e^{-(|t|^2/2)} \quad (2.10)$$

Aqui se configura uma onda plana de vetor de onda k modulada por uma unidade de largura no envelope de Gaussiano ($e^{-(|t|^2/2)}$). A Figura 2.2 mostra um exemplo da ondeleta de Morlet com diferentes valores de escala.

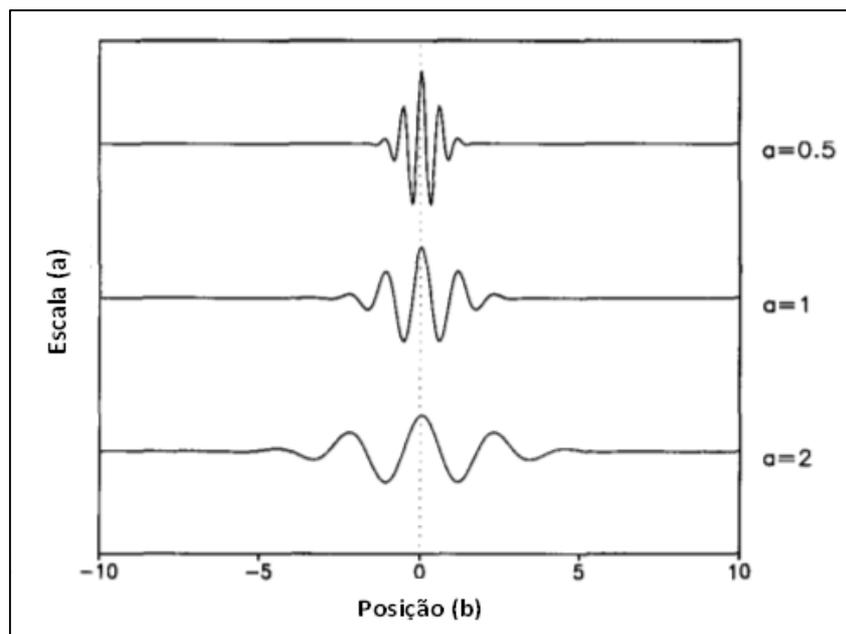


Figura 2.2 - Exemplo da ondeleta de Morlet com diferentes valores de escala (a).
 Fonte: Adaptada de Lau e Weng (1995).

O espectro de potência de ondeleta é a representação gráfica que apresenta a variação da série temporal na dimensão frequência-tempo resultante da transformada. A Figura 2.3 mostra o espectro de potência gerado pelo trabalho de Lau e Weng (1995) referente aos dados de temperatura da superfície no Hemisfério Norte. Observa-se que o espectro indica a potência de energia ligada à amplitude do sinal observado (em cores) ao longo do tempo (eixo das abcissas) e em relação à escala de periodicidade, que equivale à frequência do sinal (eixo das ordenadas). Deste modo, é possível verificar padrões de periodicidade nas escalas que são indicados pela variação de amplitude do sinal de temperatura ao longo da série temporal. Além da periodicidade dos eventos é possível identificar ainda o grau de suas intensidades através da variação de amplitude, registrada nos níveis de cores.

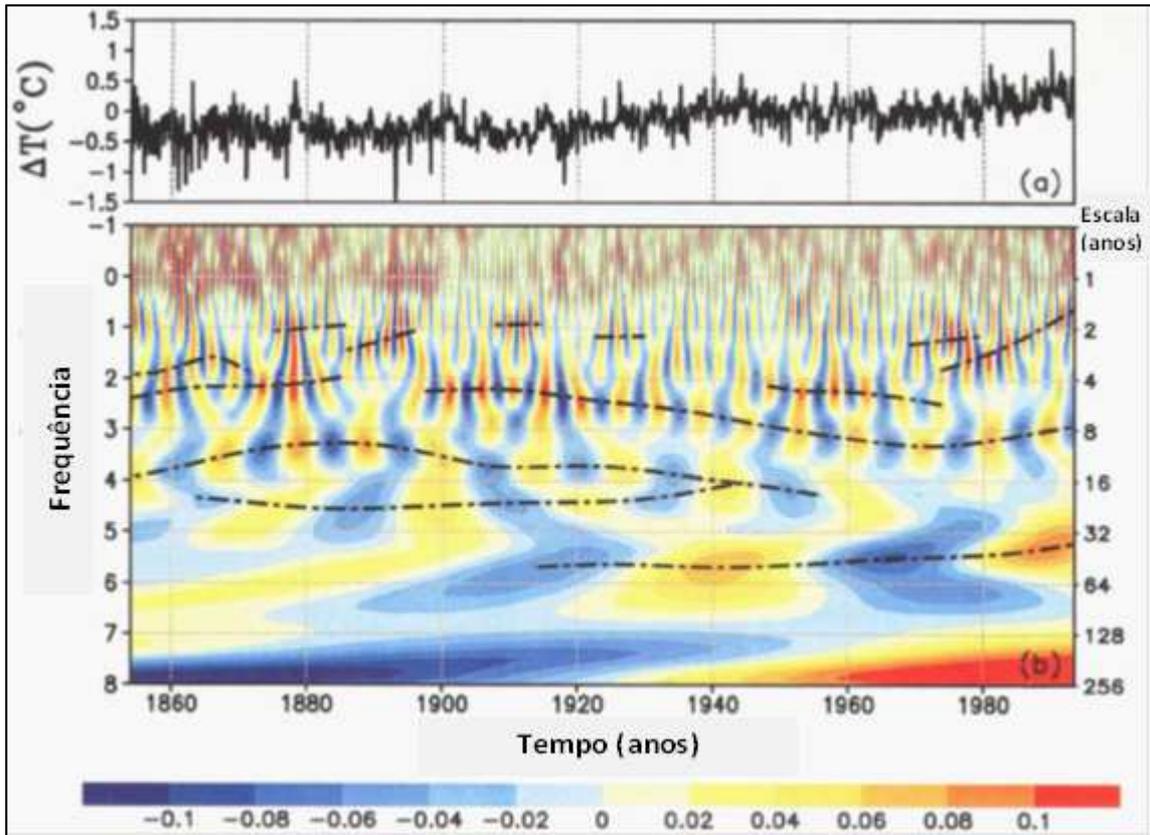


Figura 2.3 - Espectro de potência de ondeleta. Em (a) mostra-se a série histórica da temperatura da superfície no Hemisfério Norte. Em (b), a parte real dos coeficientes de ondeleta de Molert. As linhas tracejadas em (b) indicam a frequência das periodicidades dominantes.
 Fonte: Adaptada de Lau e Weng (1995).

2.7. Teste t- pareado

O teste t-pareado é utilizado para a comparação de médias de amostras dependentes. Em termos matemáticos o teste t-pareado considera duas variáveis aleatória X_i e Y_i pareadas, definindo-se $D_i = X_i - Y_i$, para $i = 1, \dots, n$, em que $D_i \sim N(\mu_D, \sigma_D^2)$. Considerando o teste de hipótese de igualdade de médias temos: $H_0: \mu_D = 0$ e $H_1: \mu_D \neq 0$. O parâmetro μ_D é estimado pela média amostral das diferenças \bar{D} , o parâmetro σ_D^2 é estimado pela variância amostral das diferenças dado pela Equação 2.11 (MAGALHÃES; LIMA, 2004; MODE, 1961; WALFORD, 2011):

$$S_D^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n-1} \quad (2.11)$$

Deste modo, o teste de hipóteses será dado pela Equação 2.12, em que, sob H_0 , segue uma distribuição t -Student com $n - 1$ graus de liberdade:

$$T = \frac{\bar{D} - \mu_D}{\frac{S_D}{\sqrt{n}}} \quad (2.12)$$

2.8. Padronização z em imagens de sensoriamento remoto

A padronização z consiste na conversão de uma variável aleatória normal X qualquer em uma variável normal padronizada (z). Desta maneira, converte-se a diferença efetiva entre a média e algum outro valor da distribuição para uma diferença relativa exprimindo-a em termos do número de desvios padrões a contar da média. Deste modo, a nova variável z terá média igual a zero e desvio padrão igual a 1. Assim, quanto mais próximo z estiver de zero, mais próximo a variável arbitrária estará da média (PETERS; SUMMERS, 1973; STEVENSON, 2001; VIALI, 2013). Algebricamente, a padronização é dada pela Equação 2.13:

$$z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (2.13)$$

Onde, Z é o numero de desvios padrões a contar da média; X é o valor da medida; μ é a média da distribuição normal; σ é o desvio padrão (STEVENSON, 2001). Com essa padronização, é possível comparar diferentes atributos de natureza distinta.

Em sensoriamento remoto, diversos estudos têm utilizado a padronização z para identificar possíveis anomalias em séries temporais de imagens como, por exemplo, os trabalhos de Saleska et al. (2007), Samanta et al. (2010), Atkinson et al. (2011) e Moura et al. (2012). No trabalho de Atkinson et al. (2011), o método foi aplicado para caracterizar a variação temporal dos IV e detectar possíveis anomalias para os anos de seca e não seca na Amazônia. A Figura 2.4 apresenta a distribuição espacial da anomalia normalizada para o NDVI e EVI nos de 2005, 2009 e 2010, mostrada no trabalho de Atkinson et al. (2011).

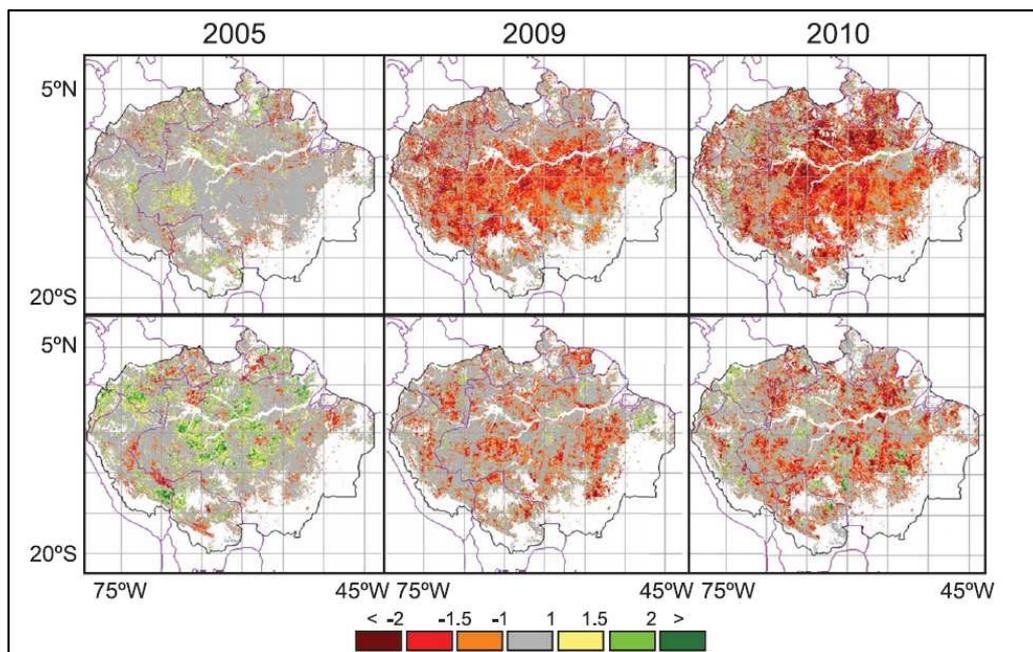


Figura 2.4 - Distribuição espacial da anomalia padronizada para o NDVI (parte superior) e EVI (parte inferior) para 2005, 2009 e 2010. Em 2005 (ano de seca severa), áreas centrais na bacia amazônica mostraram anomalias padronizadas positivas de EVI (“greening”). No entanto, tanto em 2009 (ano regular) quanto em 2010 (outro ano de seca severa), estas anomalias positivas não foram observadas, predominando as de valores negativos (“browning”).

Fonte: Atkinson et al. (2011)

3 ÁREA DE ESTUDO

O Parque Estadual do Turvo (PET) é uma unidade de conservação de proteção integral criada em 11 de março de 1947, pelo Decreto Estadual nº 2.312 - RS. Ele abriga um remanescente florestal do bioma Mata Atlântica, sendo composto predominantemente por Floresta Estacional Decidual, abrangendo uma área total de 17.491,4 ha. O PET está localizado no município de Derrubadas, no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, fazendo divisa, através do rio Uruguai, com o Estado de Santa Catarina e a província argentina de Misiones, ao norte; com os rios Turvo e Parizinho a oeste e a leste, respectivamente; e com os rios Calixto e Bonifácio ao sul (Figura 3.1) (SEMA, 2005).

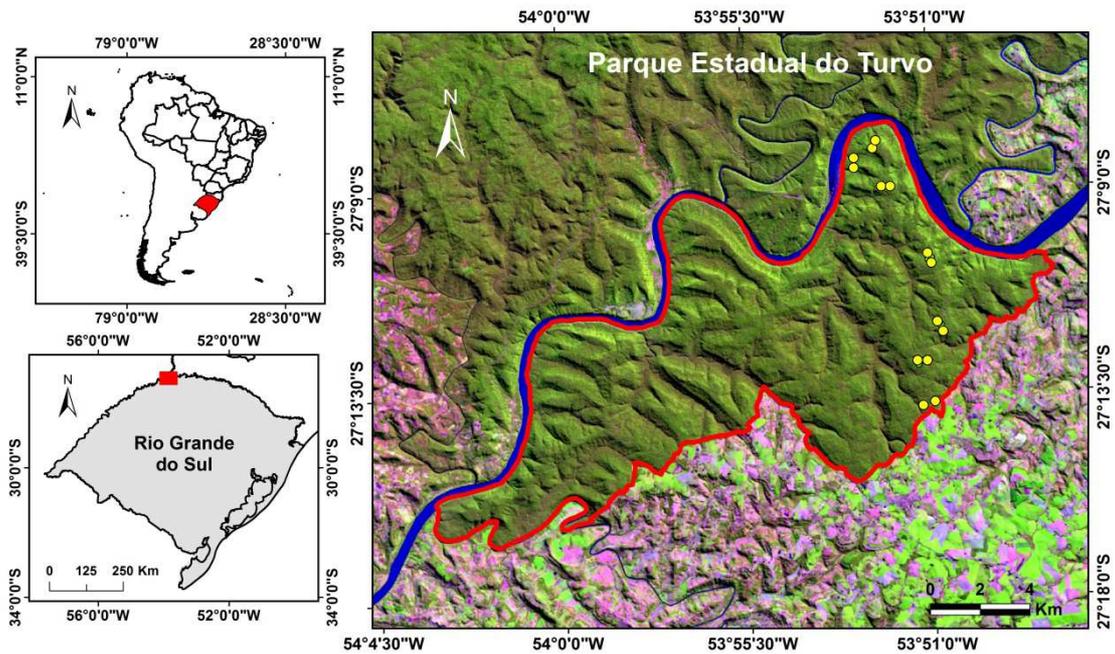


Figura 3.1 - Localização do Parque Estadual do Turvo (PET) no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (RS). Os pontos em amarelo indicam a localização das parcelas inventariadas. A imagem é uma composição falsa cor (654) do sensor OLI/Landsat-8 (06/02/2014).

A geologia do PET é constituída pelas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, inserida na Província Basáltica do Rio Grande do Sul. A constituição destas rochas se deu por sucessivos derrames basálticos durante o período Jurássico-Cretáceo (190 a 90 milhões de anos). A área possui um relevo dissecado com forte controle estrutural, tendo também morros suaves. As altitudes variam entre 100 e 400 m. Os solos presentes na área são compostos de variações do Latossolo Roxo distrófico (LRd1) e Cambissolo eutrófico (Ce1) (IBGE, 2002; SEMA, 2005)

A Figura 3.2 apresenta o climograma referente aos dados da Estação Meteorológica de Iraí (RS), a mais próxima do PET (50 km). Pode-se constatar que a referida região possui uma precipitação média de 1810 mm/ano, com chuvas distribuídas regularmente durante todo o ano. A temperatura média anual é em torno 19 °C, com uma significativa variação térmica entre os meses de verão e inverno. As médias anuais mínimas perpassam os 14°C, enquanto que as máximas estão em torno de 27°C. A média anual da umidade relativa do ar é de 78% (WORLD CLIMATE, 2014). Deste modo, de acordo com as

características apresentadas, o clima da área pode ser classificado, segundo o Modelo de Classificação Climática de Köppen, como Cfa - Clima Temperado Húmido com Verão Quente (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

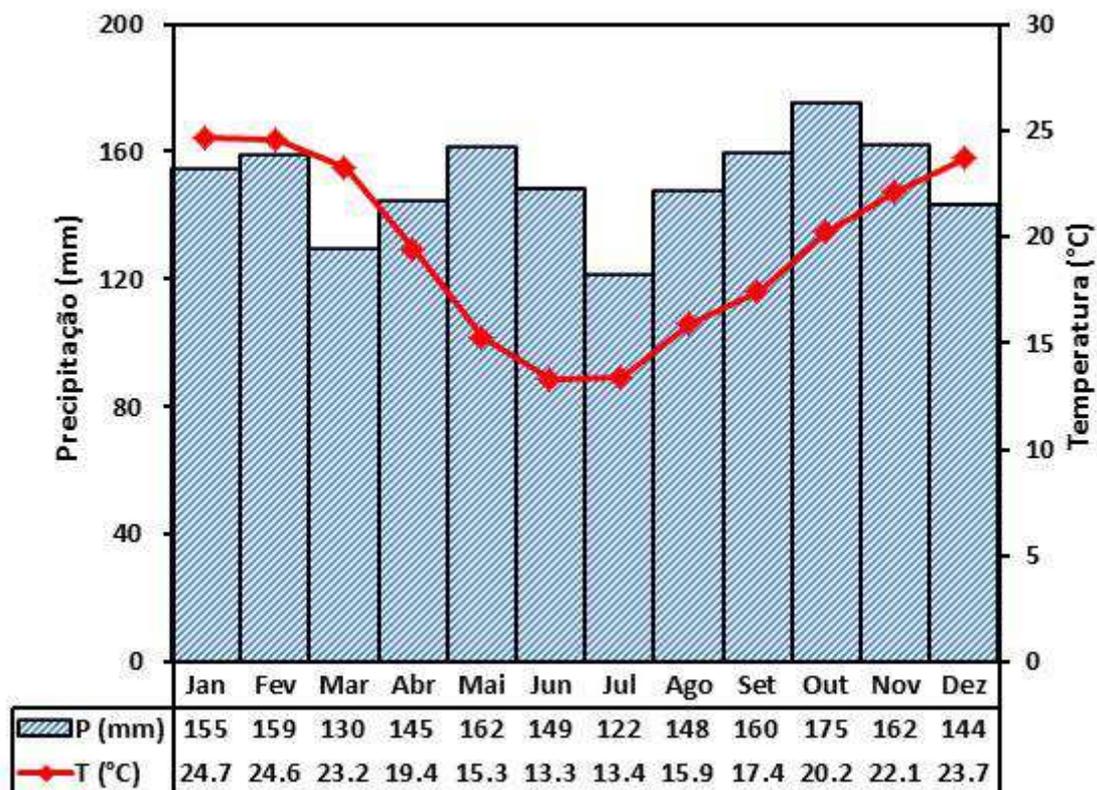


Figura 3.2 – Valores médios mensais (1961-1990) de precipitação e temperatura da estação de Iraí-RS.

Fonte: Dados extraídos do World Climate (2014). Estação Meteorológica de Iraí: NOAA Station BZ83881; Latitude: 27°11'S; Longitude: 053°14'W; Elevação: 247m, 810'.

Em termos hidrológicos, o parque encontra-se inserido na bacia do rio Uruguai, sendo drenado por diversos afluentes que compõem pequenas sub-bacias, como por exemplo, as do rio Parizinho, arroio Mairoso, arroio Calixto e rio Turvo. Também são encontradas no PET pequenas lagoas nas zonas mais elevadas formadas a partir do acúmulo das águas pluviais (SEMA, 2005).

O Parque insere-se no conjunto da selva *misioneira* (aproximadamente 10 mil km²), compondo o maior maciço florestal de Floresta Atlântica de interior do planeta, juntamente com os territórios da Argentina e Paraguai. A composição fito-ecológica da área é de Floresta Estacional Decidual Submontana (BULFE,

2008; IBGE, 2012). Segundo Brack (1985), são encontradas pelo menos cinco formações vegetais com características fisionômicas e florísticas próprias: Vegetação de mata; Vegetação de banhados; Vegetação de campestres; Vegetação de lajeado e Vegetação secundária.

Já Guadagnin (1994) classificou as formações vegetais da área em dois grupos: o de vegetação primária e o de vegetação secundária. No primeiro encontram-se: a floresta de solos profundos, floresta de solos rasos, “Jaboticabal”, banhados e lagoas, vegetação rupestre e vegetação reófila. As formações secundárias são sucessões antigas, ocorrendo de forma restrita nas bordas do PET.

4 METODOLOGIA DE TRABALHO

Os principais procedimentos metodológicos executados no trabalho estão resumidos no fluxograma da Figura 4.1. As etapas estão descritas nas seções subsequentes indicadas pela numeração.

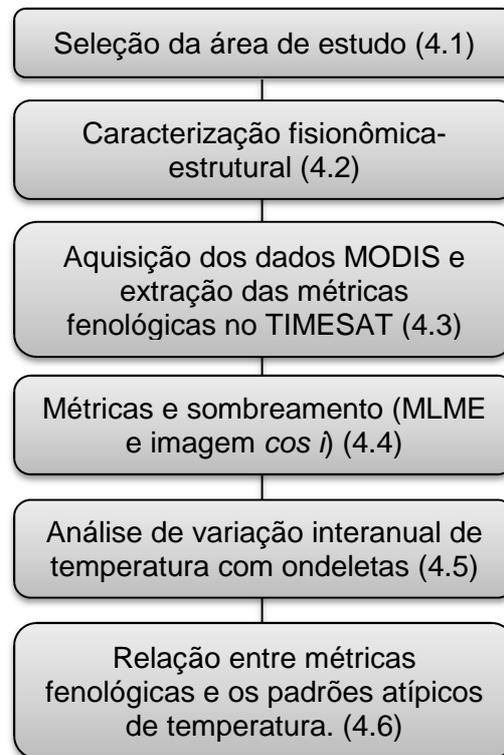


Figura 4.1 - Fluxograma metodológico.

4.1. Seleção da área de estudo

A seleção do PET se deu por sua importância ecológica no contexto local e regional, pois integra parte do conjunto da selva *misioneira*, que se estende por todo nordeste da Argentina até Foz do Iguaçu-PR.

Do ponto de vista de fenologia por satélites, o PET é um interessante estudo de caso. Do verão para o inverno, o IAF diminui principalmente para espécies do estrato superior do dossel, em decorrência, sobretudo, da amplitude térmica presente na área. Por sua vez, o AZS aumenta, provocando modificações na quantidade de sombras vistas pelo MODIS associadas com a estrutura do dossel ou com mudanças relativas na orientação de vertentes (superfícies

iluminadas e sombreadas) devido ao relevo dissecado do PET. Ambos os fatores (IAF e sombras) afetam o comportamento sazonal do EVI para um dado pixel. Além disso, o PET está sujeito à forte influência de eventos meteorológicos em escala regional como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS).

4.2. Caracterização fisionômica-estrutural da vegetação

Para a caracterização fisionômica e estrutural da vegetação do PET, uma campanha de campo foi realizada em setembro de 2013. Foram inventariadas catorze parcelas com dimensão de 50 x 20 m, totalizando uma área de 1,4 ha. Elas foram posicionadas ao longo da via principal de acesso ao parque e localizadas com GPS (*Global Positioning System*) (Figura 3.1).

Todos os indivíduos com diâmetro à altura do peito (DAP) superior a 10 cm foram amostrados e tiveram suas posições registradas nas parcelas. Estes indivíduos foram identificados por um botânico (Dr. Luciano Denardi) a partir dos seus nomes populares e científicos. Além disso, foram medidas: a altura total (AT) e a altura do ponto de inversão morfométrica (HPIM), por meio de estimativas visuais, diante da dificuldade de usar clinômetros para tal finalidade; e a circunferência à altura do peito (CAP), com o auxílio de uma trena, posteriormente convertido em DAP.

Por meio destas medidas foram extraídos os parâmetros fitossociológicos de densidade, dominância e frequência. A densidade absoluta (DA) é o número de indivíduos de uma dada espécie por unidade de área. A densidade relativa (DR) relaciona estes indivíduos ao número total de todas as espécies. A dominância absoluta (DoA) refere-se a soma das áreas basais dos indivíduos pertencentes a uma espécie, por unidade de área, enquanto que a dominância relativa (DoR) é a proporção percentual da área basal de uma dada espécie em relação ao total de indivíduos inventariados. A frequência absoluta (FA) é a porcentagem de parcelas em que cada espécie ocorre e a frequência relativa (FR) é a porcentagem de ocorrência de uma espécie em relação à soma das frequências absolutas de todas as espécies (MUELLER-DOMBOIS;

ELLENBERG, 1974). Estes parâmetros estão expressos matematicamente nas Equações 4.1 a 4.6:

$$DA_i = \frac{n_i}{A_{ha}} \quad (4.1)$$

$$DR_i = 100 \frac{DA_i}{\sum_{i=1}^S DA_i} \quad (4.2)$$

$$DoA_i = \frac{G_i}{A_{ha}} \quad (4.3)$$

$$DoR_i = 100 \frac{G_i}{\sum_{i=1}^S G_i} \quad (4.4)$$

$$FA_i = 100 \frac{u_i}{u_t} \quad (4.5)$$

$$FR_i = 100 \frac{FA_i}{\sum_{i=1}^S FA_i} \quad (4.6)$$

Onde, D , Do e F correspondem à densidade, dominância e frequência, respectivamente; A e R correspondem às estimativas absolutas e relativas da espécie i ; n_i é o número de indivíduos da espécie i ; A_{ha} é a área total dada em hectares; S é o número total de espécies amostradas; G_i é a área basal da espécie i em metros quadrados; u_i é o número de parcelas amostrais onde a espécie i ocorre; e u_t é o número total de parcelas.

A partir dos valores relativos indicados anteriormente foi calculado o Índice de Valor de Importância (IVI) (Equação 4.7), a fim de caracterizar a importância de cada espécie no conjunto florístico da área (CURTIS; MCINTOSH, 1951):

$$IVI = DR_i + FR_i + DoR_i \quad (4.7)$$

Para a análise da composição florística da área quanto à diversidade foram calculados os Índices de Shannon-Weaver (H') e o de Equabilidade de Pielou (J) (ODUM, 1983; MAGURRAN, 1988). O Índice de Shannon-Weaver trata a população como uma probabilidade e, portanto, indica o grau de incerteza em prever a que espécie pertencerá o indivíduo selecionado aleatoriamente. Quanto maior for o índice, menor é a probabilidade de se selecionar um

indivíduo, e, portanto, mais diversa é a comunidade analisada. A formulação matemática do índice está descrita na Equação 4.8:

$$H' = - \sum_{i=1}^S [p_i \ln(p_i)], \text{ com } p_i = \frac{n_i}{N} \quad (4.8)$$

Onde, n_i é o número de indivíduos da espécie i ; N é o número total de indivíduos; S é o número total de espécies amostradas, e \ln corresponde ao logaritmo neperiano.

Já o Índice de Equabilidade de Pielou (Equação 4.9) mede a uniformidade da comunidade analisada, refletindo o grau de dominância de espécies nesta comunidade. Quando o índice é baixo, há poucas espécies altamente dominantes em meio a um grande número de espécies:

$$J = \frac{H'}{\ln(S)} \quad (4.9)$$

Onde: H' é Índice de Shannon e S é o número total de espécies.

4.3. Aquisição dos dados MODIS e extração de métricas fenológicas com o TIMESAT

As imagens MODIS utilizadas neste trabalho são referentes ao produto MOD13Q1 (MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid) com resolução espacial de 250 m e composição temporal de 16 dias. O uso destas composições foi adotado para minimizar problemas advindos das variações na geometria de aquisição dos dados e da qualidade atmosférica dos pixels. As imagens utilizadas compreendem o período entre 2002 e 2012, totalizando 253 imagens, disponibilizadas gratuitamente no website: <http://earthexplorer.usgs.gov>. As imagens foram convertidas para o formato tif, tendo sua projeção sinusoidal transformada para coordenadas planares (*Universal Transverse Mercator* - UTM) através do algoritmo *MODIS Reprojection Tools* (MRT) (DWYER; SCHMIDT, 2006). O produto MOD15A2 (MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 1 km SIN Grid V005) também foi usado complementarmente para obter informação sobre as variações sazonais no IAF no PET, usando pixels com valores de IAF

calculados pelo Algoritmo Principal (modelo de transferência radiativa) e livres de contaminação atmosférica.

Do produto MOD13Q1, foi selecionado exclusivamente o EVI para a extração das métricas fenológicas no TIMESAT. Segundo Breunig et al. (2015), quando comparado ao NDVI, o EVI possui maior sensibilidade à variação do IAF, de acordo com resultados de simulação PROSAIL para a área do PET. Por outro lado, o EVI também é mais sensível aos efeitos de iluminação solar do que o NDVI. Tais efeitos, no entanto, não sofrem fortes variações interanuais porque o AZS não muda para uma mesma data entre anos.

Deste modo, foram utilizados como *input* no TIMESAT as imagens de EVI e *Pixel Reliability* do MODIS para a extração das métricas fenológicas. Para isso, foi necessário primeiramente a conversão destas imagens para formato binário (rst) no software TWtools disponível em: <http://www.gdal.org/>. O produto de qualidade *Pixel Reliability* serviu para ponderar os pesos na suavização da série temporal, onde os pixels de melhor qualidade receberam maiores pesos, enquanto que os de pior qualidade receberam menores pesos ou peso nulo. Os pesos de ponderação do TIMESAT foram adotados com base no trabalho de Jönsson e Eklundh (2004). A Tabela 4.1 apresenta a descrição das categorias do produto *Pixel Reliability* e mostra os pesos atribuídos no TIMESAT para análise de dados. O Apêndice A apresenta, de forma exemplificada, a variação das porcentagens das categorias de *Pixel Reliability* para os anos 2011 e 2012 na área do PET.

Tabela 4.1 - MOD13Q1 *Pixel Reliability* e pesos de ponderação no TIMESAT

Categoria do pixel	Resumo QA	Descrição	Pesos atribuídos no TIMESAT
-1	Sem dado	Não processado	-
0	Bom	Usar com confiança	1
1	Marginal	Útil, mas verificar para outras informações QA	0,5
2	Neve/gelo	Alvo coberto de neve / gelo	-
3	Nuvens	Alvo não visível, coberto com nuvem	0

Fonte: A descrição da categoria foi extraída da Nasa (2014).

A série temporal de imagens EVI, ponderada com as imagens *Pixel Reliability*, foi suavizada por meio do filtro Gaussiano assimétrico, selecionado por ser de natureza local e ter maior sensibilidade às variações bruscas nos índices, sendo assim, mais apropriado para a detecção de padrões atípicos. Além disso, o filtro Gaussiano possui menor dependência de ruídos presentes na série do que o filtro Savitzky-Golay (JÖNSSON; EKLUNDH, 2012). Foi escolhido o nível de 20% para a variação que marca o Início e o Final do Ciclo Sazonal (seção 2.3) (JÖNSSON; EKLUNDH, 2004). Após a suavização da série, foram extraídas as imagens que representam os marcadores fenológicos dos ciclos sazonais 2002/03, 2003/04, 2004/05, 2005/06, 2006/07, 2007/08, 2008/09, 2009/10, 2010/11 e 2011/12. As 11 métricas extraídas do TIMESAT estão descritas na seção 2.3 e indicadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Métricas fenológicas extraídas pelo TIMESAT e selecionadas para estudo

	Métricas Fenológicas	Unidade	Significado Ecológico
1	Início do Ciclo Sazonal	Dia do Ano	Início da fase de verdejamento (“ <i>greenup</i> ”)
2	Final do Ciclo Sazonal	Dia do Ano	Final da fase de senescência foliar (“ <i>browndown</i> ”)
3	Duração do Ciclo Sazonal	Dias	Intervalo do ciclo vegetativo entre as fases de verdejamento e senescência foliar
4	Nível de Base	IV	Mínima atividade fotossintética
5	Data Central do Ciclo Sazonal	Dia do Ano	Período aproximado de máxima atividade fotossintética
6	Valor Máximo	IV	Máxima atividade fotossintética
7	Amplitude Sazonal	IV	Variação sazonal da atividade fotossintética
8	Derivada da Borda Esquerda	Dia/IV	Taxa de variação do evento de verdejamento
9	Derivada da Borda Direita	Dia/IV	Taxa de variação do evento de senescência
10	Integral Maior	Dia-IV	Produtividade total da vegetação
11	Integral Menor	Dia-IV	Vegetação sazonalmente ativa

Fonte: Baseado em Jönsson e Eklundh, 2004; 2012; Pettorelli et al 2005; Tan et al 2011.

Para um determinado ciclo sazonal (2011/12), as imagens de cada uma das 11 métricas fenológicas do TIMESAT foram fatiadas em classes de valores, codificadas em cores e analisadas visualmente na região do PET. Os resultados foram discutidos qualitativamente diante da inexistência de um mapa de vegetação da área de estudo em escala apropriada.

4.4. Relações das métricas fenológicas com a fração-sombra do MLME e com a imagem relevo sombreado ($\cos \hat{i}$)

O MLME foi gerado para verificar a existência de relações entre as 11 métricas fenológicas do TIMESAT (EVI/MODIS) e a fração-sombra, cuja variação está associada tanto com a estrutura do dossel, quanto com efeitos topográficos locais. Para efetuar esta análise, as métricas fenológicas do ciclo sazonal 2011/12 foram utilizadas. Para a geração do MLME, a imagem reflectância de superfície do MODIS, obtida em 01 de julho de 2012, foi escolhida, por possuir elevado valor de AZS (57°), correspondendo ao período do inverno. Portanto, a data representa a maior quantidade de sombras vista pelo MODIS neste período.

Para a seleção dos membros de referência e geração do MLME (seção 2.4), aplicou-se inicialmente MNF sobre os valores de reflectância de superfície das bandas do azul (B3), vermelho (B1), infravermelho próximo (B2) e infravermelho de ondas curtas (B7) do MODIS. As duas primeiras componentes do MNF foram então usadas como dados de entrada para a técnica PPI. Os candidatos a membros de referência, representativos da vegetação verde e solo, foram analisados no visualizador n -dimensional do ENVI para fins de seleção final dos pixels puros (BOARDMAN et al. 1995; CARVALHO JÚNIOR et al. 1999). Para a sombra, seguindo procedimentos de ROBERTS et al. (1997), utilizou-se um espectro sintético com valores constantes nas quatro bandas do MODIS. Segundo estes autores, este procedimento é útil quando não há definição clara do membro de referência para a sombra, apresentando bons resultados na geração final das frações.

Obtidas as imagens-frações vegetação verde, solo e sombra, foram calculados coeficientes de correlação (r) entre os valores de fração-sombra e as 11 métricas fenológicas. Para tal finalidade, foram utilizados 100 pixels distribuídos aleatoriamente na área do PET através de um procedimento computacional automático, de modo a garantir a variabilidade das amostras.

Para análise dos efeitos topográficos locais sobre o cálculo das métricas fenológicas, utilizou-se as métricas do mesmo ciclo da etapa anterior (2011/12) e um MDE do SRTM disponibilizado pelo USGS. Procedeu-se então ao cálculo da imagem relevo sombreado (TEILLET et al., 1982), que corresponde ao cômputo do cosseno do ângulo de incidência i (Equação 2.7, seção 2.5), onde i é o ângulo entre o vetor apontado para o Sol e um vetor normal à superfície. Este procedimento foi executado com a ferramenta *Shaded Relief* do ENVI 4.8. Os valores de elevação (33°) e ângulo azimutal (27°) solar que serviram de *input* ao modelo foram referentes à imagem da data de 01 de julho de 2012. Posteriormente, os pixels foram reamostrados por média de 30 m para 250 m no ArcGis 10.1. Na imagem $\text{Cos } i$, pixels com valores próximos a zero representam superfícies sombreadas para o sensor, enquanto pixels com valores próximos a 1 representam superfícies iluminadas. Similar ao procedimento anterior, 100 pixels foram aleatoriamente selecionados de forma a representar as diferentes classes de iluminação na imagem de relevo sombreado. Seus valores equivalentes de métricas fenológicas foram então correlacionados com os valores de $\text{Cos } i$ para avaliar o impacto dos efeitos topográficos no cálculo de cada métrica.

4.5. Análise de variação interanual de temperatura com ondeletas entre 2002 e 2012.

Como os efeitos topográficos ou AZS para uma determinada data não variam entre anos, procurou-se identificar padrões atípicos de temperatura na área de estudo entre os anos 2002 e 2012, verificando sua possível influência sobre o comportamento interanual das métricas fenológicas. Conforme mencionado anteriormente, o regime de precipitações é regular e bem distribuído ao longo de todo o ano, sendo a temperatura um fator de sazonalidade marcante que afeta a deciduidade de muitas espécies da Floresta Estacional Decidual do PET (FRANCO, 2008; ROSA et al., 2013).

Para tal finalidade, foi empregada a análise da transformada em ondeletas. Os dados meteorológicos, alusivos à temperatura média diária, foram obtidos da estação meteorológica de Iraí (RS) por sua proximidade com o parque

(aproximadamente 50 km). Sua aquisição foi feita junto ao Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no website: <http://www.inmet.gov.br/>.

O aplicativo utilizado foi o IDL Wavelet Toolkit, que inclui ferramentas de análise de ondeletas (ITT, 2009). Os dados tabelados (data/ temperatura média diária) serviram de *input* no IDL Wavelet Toolkit, para o cálculo das funções ondeletas e para a geração do gráfico de espectro de potência. A função ondeleta selecionada foi a de Morlet, que é usualmente aplicada em dados meteorológicos (LAU; WENG, 1995; TORRENCE; COMPO, 1998). Foi selecionada heurísticamente a função de ordem 3, por melhor se adequar à variabilidade intra- e interanual de temperatura.

A utilização da transformada de ondeletas permitiu apontar a existência dos anos de referência, tendo comportamento atípico de temperatura na série temporal (2002-2012), para posterior análise da existência de possíveis relações com o comportamento interanual das métricas fenológicas.

4.6. Relação entre métricas fenológicas e padrões atípicos de temperatura

Com a finalidade de analisar se padrões anômalos de temperatura entre os anos de 2002 e 2012 influenciaram o comportamento de cada uma das 11 métricas fenológicas, foi realizada a análise exploratória da média de 100 pixels distribuídos aleatoriamente na área do PET, de modo a atender a variabilidade das amostras. Inicialmente foi feita a análise gráfica de cada métrica com *boxplots* para os diferentes anos.

A média destes 100 pixels, para cada métrica e ciclo sazonal, foi correlacionada com as médias das temperaturas máxima, média e mínima, de diferentes períodos para cada ciclo, semelhante ao procedimento realizado por Du et al. (2014). O Início do Ciclo Sazonal foi correlacionado com as médias de temperatura dos meses de agosto e setembro, onde eventualmente ocorre o período de verdejamento ("*green-up*"). O Final do Ciclo Sazonal foi

correlacionado com as médias de fevereiro e março, ocorrendo neste período o início do processo de senescência foliar (“*browndown*”). O Valor Máximo foi correlacionado com as médias de novembro e dezembro. As demais métricas foram correlacionadas com a temperatura média entre os meses de outubro e março, que compreendem ao período da estação de crescimento do ciclo vegetativo. Como a métrica Nível de Base representa uma média entre diferentes anos, ela foi substituída por um valor que representasse o EVI Mínimo de cada ano para o período de inverno. Neste caso, foi usada a imagem filtrada do dia 12 de julho, que teve os valores médios de EVI correlacionados com as médias de temperatura dos meses de junho e julho.

Nas métricas em que foram identificadas diferenças entre os anos de referência (resposta anômala de temperatura) e os demais anos regulares foram aplicados dois procedimentos de análise: o teste estatístico *t*-pareado e a padronização das imagens das métricas.

O teste *t*-pareado é utilizado para a comparação de médias de amostras dependentes (seção 2.7). No caso deste trabalho, ao serem fixados os 100 pixels aleatórios, com a mesma localização para os diferentes anos, as amostras tomaram um caráter de dependência, o que tornou esta estatística a mais adequada para a comparação das médias. O objetivo da aplicação do teste *t*-pareado foi verificar se a média de cada métrica fenológica nos anos de temperatura atípica, identificados pela análise de ondeletas, era estatisticamente diferente das métricas correspondentes nos anos regulares.

O outro procedimento realizado para analisar as diferenças entre os anos de temperatura atípica com os demais anos regulares foi a padronização *z* das imagens das métricas fenológicas. Nesta etapa, as imagens foram importadas para o Quantum GIS 2.2.0, onde foram calculadas as médias e os desvios padrões com a ferramenta ‘*r.series*’. Posteriormente, foi utilizada a ferramenta ‘*raster calculator*’ para a geração das imagens padronizadas (*Z*) a partir do método de padronização *z* para cada pixel, semelhante à metodologia aplicada por Atkinson et al. (2011). Conforme discutido na seção 2.8, o valor de uma dada métrica fenológica para um determinado ano foi subtraído da média desta

métrica de todos os anos, com exceção dos anos com temperatura atípica. O resultado foi então dividido pelo desvio padrão da métrica de todos os anos, com exceção daqueles atípicos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização fisionômico-estrutural da vegetação¹

O inventário florestal realizado no PET amostrou 674 indivíduos em uma área de 14.000 m². A densidade média das parcelas foi de 481,42 ($\pm 174,39$) indivíduos por hectare, obedecendo ao critério de inclusão daqueles cujo diâmetro à altura do peito (DAP) foi superior a 10 cm. A área basal das árvores amostradas foi de 21,92 m².ha⁻¹ ($\pm 10,62$). Foram identificados 74 espécies, pertencentes a 65 gêneros e 31 famílias botânicas (Tabela 5.1). Dados semelhantes foram encontrados no trabalho de Franco (2008), que identificou 70 espécies, 62 gêneros e 35 famílias, ao utilizar o mesmo critério de inclusão de DAP maior que 10 cm. Ruschel et al. (2007), por sua vez, identificaram um número maior de espécies, 78 no total, ao adotar DAP maior que 5 cm, pertencentes a 65 gêneros e 35 famílias.

A composição florística da área apresentou Índice de Shannon-Weaver (H') de 3,58, o que demonstra expressiva diversidade de sua flora. Segundo Vaccaro et al. (1995), valores próximos a este são comumente encontrados em florestas estacionais da região. Os autores supracitados obtiveram para a área em questão um valor de 3,71. Já o Índice de Equabilidade de Pielou (J) foi de 0,83 mostrando o baixo grau de uniformidade da comunidade em relação à dominância de dadas espécies. Valor aproximado (0,86) foi encontrado por Ruschel et al. (2007)

¹ Avaliação completa dos dados do inventário florestal no PET foi submetida por Balbinot et al. para publicação na revista Pesquisa Florestal Brasileira. O *status* no momento da defesa é "em avaliação pelos revisores".

Tabela 5.1 Parâmetros biofísicos das parcelas amostradas na área do PET

Parcelas amostrais	14 (20X50m)
Área amostral	14.000m ² (1,4 ha.)
Indivíduos amostrados (DAP>10cm)	674
Densidade (ind.ha⁻¹)	481,42 ±174,39
Altura total (m)	11,53 ± 8,47
Altura do ponto de inversão morfométrica (m)	6,03 ± 3,6
Área basal (m².ha⁻¹)	21,92 ± 10,62
Riqueza (esp.)	74
Índice de diversidade de Shannon- Weaver (H')	3,58
Equabilidade de Pielou (J)	0,83

A média da altura total (AT) dos indivíduos amostrados no inventário foi de 11,53 m (± 8,47). Na Figura 5.1 observa-se a distribuição de frequência em classes de AT, em que cerca 70% dos indivíduos possuem entre 5 e 15 m de altura. Aproximadamente 9% possuem menos de 5 m e aqueles acima de 15 m somam os demais 21%. Também se verificou a altura do ponto de inversão morfométrica (HPIM), ou seja, o ponto de bifurcação do fuste, cuja média foi de 6,03 m (± 3.6).

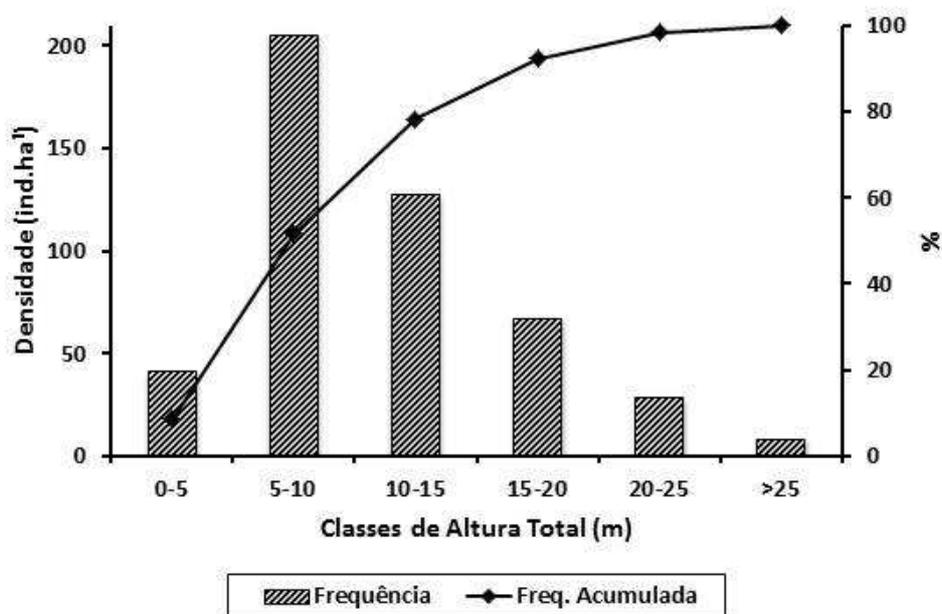


Figura 5.1 - Distribuição de frequência dos indivíduos amostrados em classes de Altura Total.

O DAP médio encontrado foi de 20,02 cm ($\pm 12,65$). A Figura 5.2 apresenta a distribuição de frequência dos indivíduos amostrados em classes de DAP. Pode-se observar o padrão diamétrico de “J-invertido” comum em florestas inequiâneas. Aproximadamente 43% dos indivíduos possuem DAP entre 10 e 15 cm e 38% estão entre 15-25 cm. Os indivíduos acima de 25 cm somam cerca de 19%.

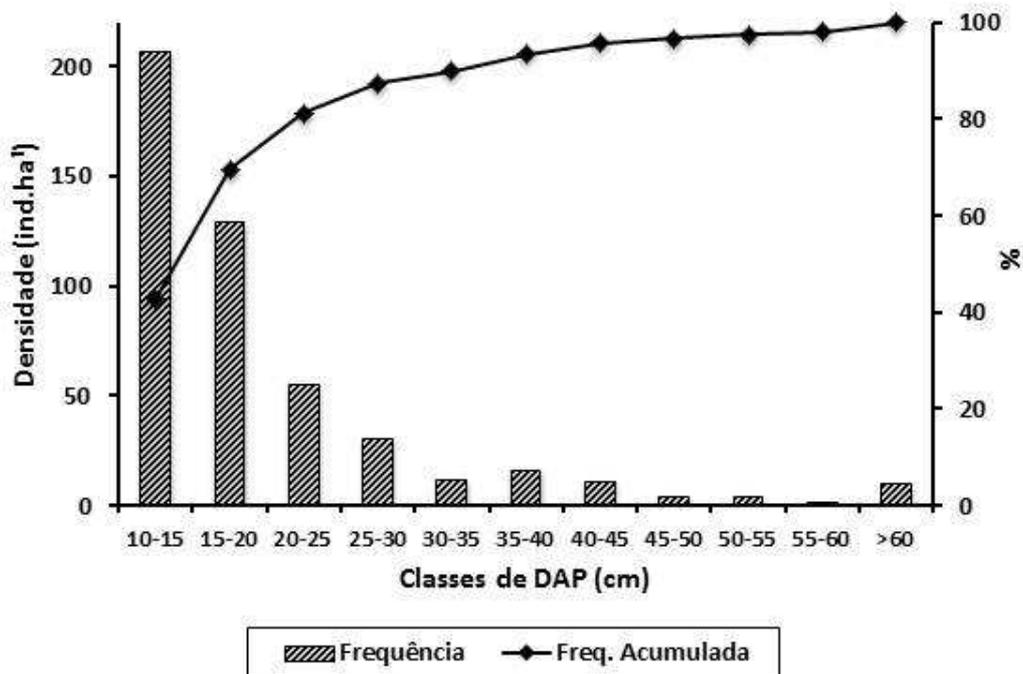


Figura 5.2 - Distribuição de frequência dos indivíduos amostrados em classes de DAP

As famílias que apresentaram as maiores densidades (ind. ha^{-1}) estão apresentadas na Figura 5.3. A família com maior densidade foi a Arecaceae com 79 ind. ha^{-1} , porém sendo representada por uma única espécie: *Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Glassman. Esta espécie obteve também o maior Valor de Importância (IVI) da comunidade amostrada (27,89). A família das Fabaceae apresentou a segunda maior densidade de indivíduos (64 ind. ha^{-1}) e também a maior riqueza (14 espécies), com destaque para *Lonchocarpus muehlbergianus* Hassl., cuja densidade foi de 31 ind. ha^{-1} e IVI de 16,07. Na Tabela 5.2 são apresentados os parâmetros fito-sociológicos das 20 espécies com maiores IVI no inventário e também sua fenologia foliar quanto à deciduidade. A

Lonchocarpus muehlbergianus e a *Sebastiania commersoniana* foram as espécies decíduas com os maiores IVI, 16,07 e 13,07 respectivamente.

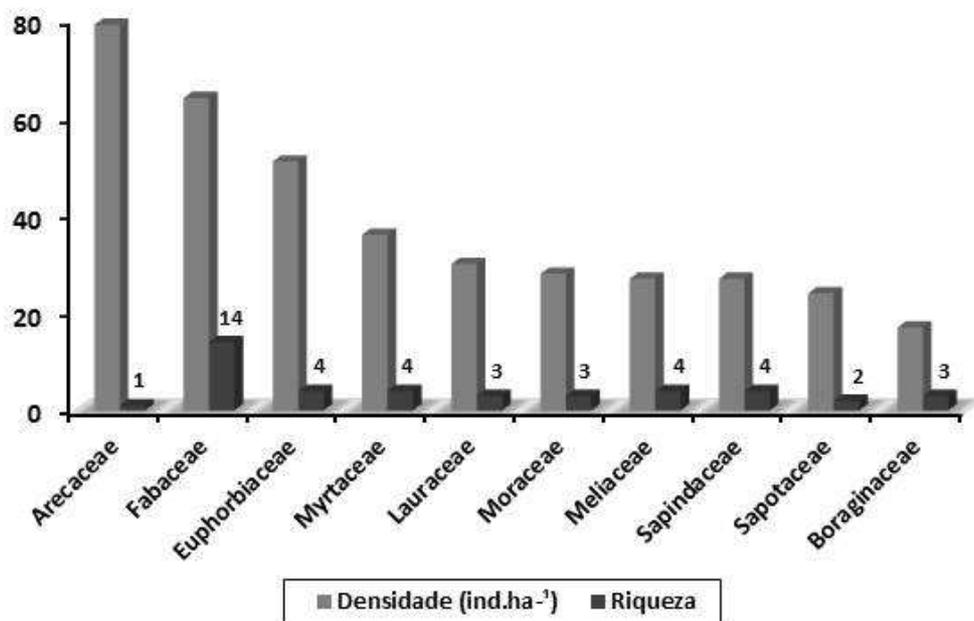


Figura 5.3 - Densidade (ind.ha⁻¹) e riqueza por família.

Tabela 5.2 – Parâmetros fito-sociológicos de algumas espécies inventariadas no PET. Grau de decíduidade: * perene; ** semidecidual; *** decidual, conforme especificado por Franco (2008).

Espécie	Família	DA	DR	DoA	DoR	FA	FR	IVI
<i>Syagrus romanzoffiana</i> (Cham.) Glassman*	Arecaceae	79	15,86	1,82	8,30	0,71	3,73	27,89
<i>Nectandra megapotamica</i> (Spreng.) Mez*	Lauraceae	25	5,02	1,88	8,59	0,54	2,80	16,41
<i>Lonchocarpus muehlbergianus</i> Hassl.***	Fabaceae	31	6,22	1,58	7,23	0,50	2,61	16,07
<i>Sebastiania commersoniana</i> (Baill.) L.B. Sm. & Downs***	Euphorbiaceae	38	7,63	0,58	2,64	0,54	2,80	13,07
<i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub.***	Fabaceae	3	0,60	1,55	7,09	0,14	0,75	8,43
<i>Diatenopteryx sorbifolia</i> Radlkofer*	Sapindaceae	11	2,21	1,02	4,66	0,25	1,31	8,17
<i>Eugenia subterminalis</i> DC.*	Myrtaceae	22	4,42	0,30	1,36	0,32	1,68	7,46
<i>Chrysophyllum gonocarpum</i> (Mart. & Eichler ex Miq.) Engl.*	Sapotaceae	14	2,81	0,47	2,16	0,43	2,24	7,21

Tabela 5.2 - Conclusão

<i>Cabralea canjerana</i> (Vell.) Mart.*	Meliaceae	9	1,81	0,71	3,25	0,32	1,68	6,74
<i>Maclura tinctoria</i> (L.) Don ex Steud.	Moraceae	10	2,01	0,62	2,85	0,29	1,49	6,35
<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arrab. ex Steud.***	Boraginaceae	7	1,41	0,62	2,85	0,32	1,68	5,93
<i>Sorocea bonplandii</i> (Baill.) W. C. Burger*	Moraceae	13	2,61	0,13	0,60	0,46	2,42	5,64
<i>Trichilia claussoni</i> D. DC.*	Meliaceae	12	2,41	0,25	1,14	0,39	2,05	5,60
<i>Chrysophyllum marginatum</i> (Hook. & Arn.) Radlk.*	Sapotaceae	10	2,01	0,34	1,57	0,36	1,86	5,44
<i>Ficus</i> sp.*	Moraceae	5	1,00	0,72	3,29	0,21	1,12	5,41
<i>Allophylus edulis</i> (St. Hil.) Radlk.***	Sapindaceae	11	2,21	0,24	1,08	0,39	2,05	5,34
<i>Holocalyx balansae</i> Micheli*	Fabaceae	4	0,80	0,69	3,15	0,21	1,12	5,08
<i>Inga marginata</i> Willd.*	Fabaceae	12	2,41	0,14	0,63	0,36	1,86	4,91
<i>Luehea divaricata</i> Mart. & Zucc.***	Malvaceae	8	1,61	0,30	1,37	0,29	1,49	4,47
<i>Balfourodendron riedelianum</i> Engler***	Rutaceae	8	1,61	0,30	1,35	0,25	1,31	4,26

5.2. Comportamento sazonal do EVI, IAF/MODIS e das métricas Fenológicas do TIMESAT

A Floresta Estacional Decidual do PET tem sua variação sazonal de EVI com máximos valores associados ao período do verão ($0,57 \pm 0,05$, dezembro) e os mínimos associados ao inverno do hemisfério ($0,39 \pm 0,02$, julho), acompanhando a variação sazonal de temperatura (Figura 5.4). A Figura 5.5 mostra que o Índice de Área Foliar (IAF) decresce nos períodos de máximo ângulo zenital solar (AZS) durante o inverno, o que está associado à diminuição do fotoperíodo e, conseqüentemente, da temperatura.

Franco (2008) indicou que a deciduidade foliar no PET é consequência das baixas temperaturas de inverno, pois não há períodos de estiagem na área, como observado no climograma da Figura 3.2. Mesmo em fases de baixas precipitações, os horizontes subsuperficiais se mantêm úmidos devido à composição argilosa de seus solos. O autor sugere que a deciduidade está

associada ao aumento na densidade e viscosidade da água na fase de baixas temperaturas, o que tornaria mais difícil de ser absorvida pelas raízes de algumas espécies, gerando um déficit hídrico mesmo com água disponível no solo. Outros autores ratificam a variação do IAF associado à temperatura como, por exemplo, Ferrera (2012), Rosa et al. (2013), Ruschel et al. (2007) e SEMA (2005).

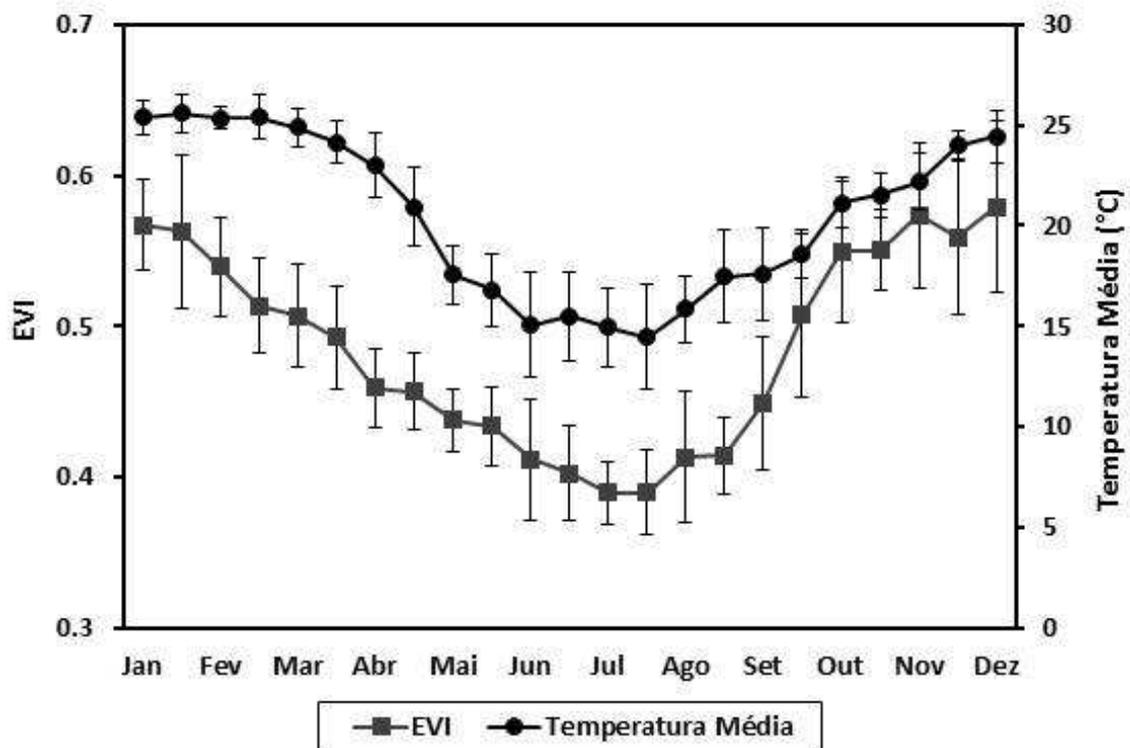


Figura 5.4 – Média da variação anual de temperatura e EVI. O eixo principal apresenta a média do EVI ($n = 100$ pixels) no PET entre 2002 e 2012 (produto MOD13Q1). O eixo secundário mostra a variação da temperatura média no intervalo de 16 dias referentes à estação de Irai-RS entre 2002 e 2012. As barras com o desvio padrão são indicadas.

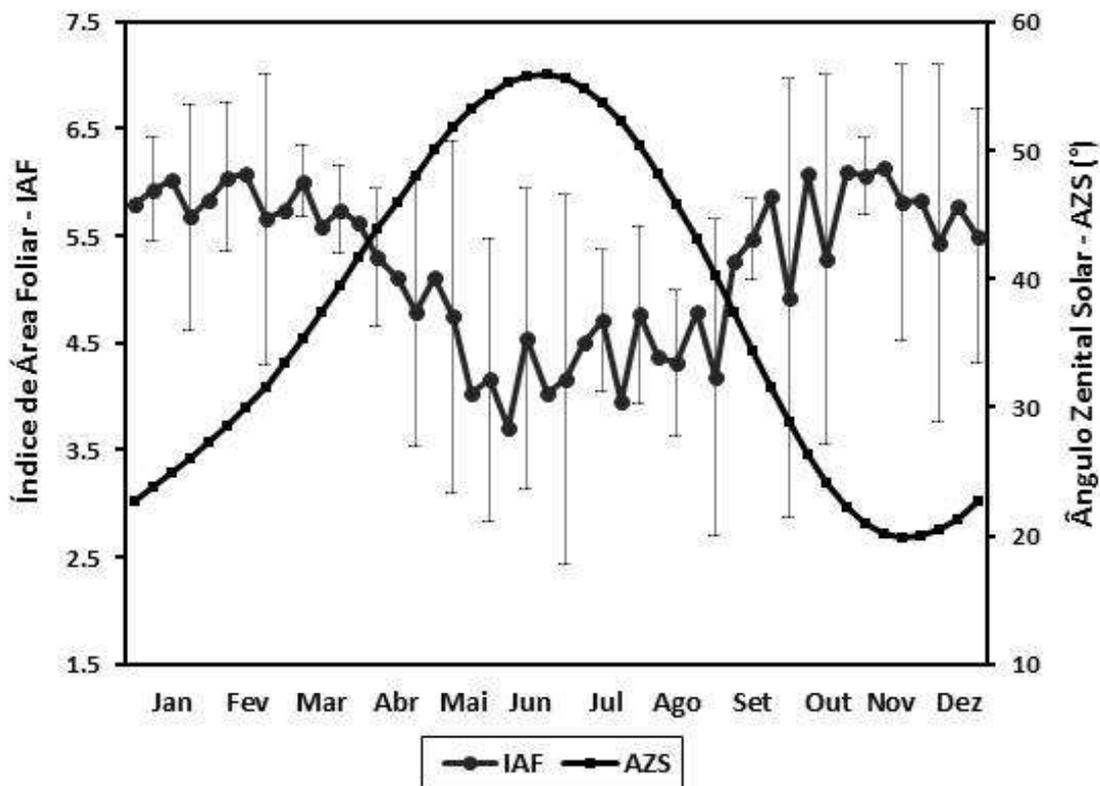


Figura 5.5 – Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) do Produto MOD15A2 e variações sazonais do ângulo zenital solar (AZS). O IAF corresponde à média de 50 pixels aleatórios distribuídos no PET para os anos de 2002 a 2012. O AZS corresponde à variação anual de 2012: lat.-27.21 log.-53.88., horário: 10:30 a.m., GMT: -3.5 (<http://www.sunearthtools.com>). As barras com o desvio padrão são indicadas para o IAF.

Sob a perspectiva do MODIS, a amplitude sazonal no AZS de aproximadamente 35°, entre o verão e inverno, representa diferenças importantes na quantidade de sombras vistas pelo sensor resultante da estrutura do dossel e das variações locais na iluminação do terreno. Como o relevo do PET é dissecado, a quantidade de energia refletida para o sensor apresenta maior variação no inverno devido aos efeitos topográficos locais. Segundo Galvão et al. (2011), o EVI/MODIS tende a diminuir com o aumento do AZS na floresta Amazônica. Isto ocorre devido ao sombreamento projetado no dossel no período de maior AZS que gera, conseqüentemente, diminuição na reflectância da banda do infravermelho próximo. Como o EVI é fortemente afetado pela resposta espectral desta banda, o índice apresenta menores valores no período de máximo AZS (maior sombreamento). Além disso, a

topografia local, variante entre 100 e 400 m, acentua este efeito nas encostas sombreadas (MATSUSHITA et al. 2007). Breunig et al. (2015) mostraram estes efeitos ao investigar a variação de IV relacionada ao AZS na área do PET.

A Figura 5.6 mostra as imagens EVI no verão e no inverno na área do PET. Decorrente do aumento do AZS do verão (22° na Figura 5.6A) para o inverno (57° na Figura 5.6B), as feições topográficas são mais bem delineadas na imagem do inverno devido a maior quantidade de sombras vistas pelo MODIS.

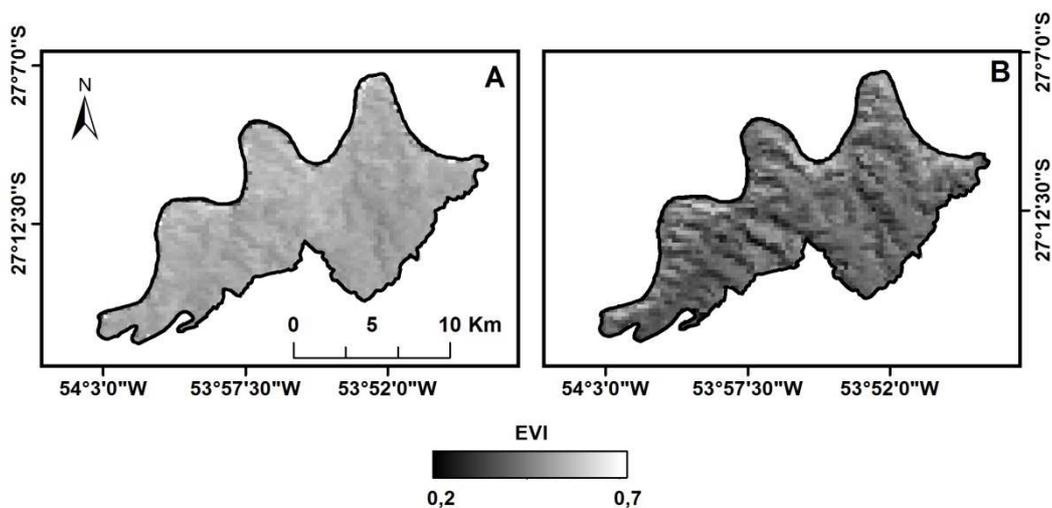


Figura 5.6 – Imagens EVI/MODIS do verão (dezembro de 2011) (A) e inverno (julho de 2012) (B) no PET, mostrando o realce das feições topográficas com a maior quantidade de sombras vistas pelo MODIS no inverno.

O comportamento sazonal das métricas fenológicas extraídas no TIMESAT para o ciclo sazonal 2011/12 é ilustrado na Figura 5.7. Para este ciclo, o Início do Ciclo Sazonal (Figura 5.7A) foi registrado entre os dias 26 de agosto e 3 de setembro, o que corresponde ao final do inverno e início da primavera, quando há o aumento progressivo do fotoperíodo e da temperatura (Figura 5.4). Ferrera (2012), ao analisar a fenologia de espécies arbóreas em uma comunidade com características fenológicas semelhantes a do PET no município de Santa Maria (RS), observou florescimento intenso no início da primavera. Segundo o autor, o florescimento se estendeu até o verão, quando as folhas maduras da comunidade apresentaram picos de plena capacidade fotossintética. A métrica que reflete este período de plena atividade fotossintética é a de Data Central do Ciclo Sazonal (Figura 5.7E), que para o

ciclo 2011/12 no PET, foi registrado entre o final de novembro e o início de dezembro. Neste período são observados os Valores Máximos de EVI (Figura 5.7F), associado a maior taxa de IAF resultante das temperaturas elevadas de verão.

O Final do Ciclo Sazonal (Figura 5.7B) variou entre a segunda quinzena de abril e a primeira de maio, associado à queda da temperatura e a diminuição do fotoperíodo no primeiro trimestre (Figuras 5.4 e 5.5). Segundo Franco (2008), devido às baixas temperaturas, a vegetação inicia um período de seca fisiológica, levando-a, assim, à senescência foliar das espécies caducifólias (Tabela 5.2). Os trabalhos de König et al. (2002), Schumacher et al. (2011) e Vogel et al. (2007), ao analisarem a deposição de serrapilheira em florestas decíduais do Rio Grande do Sul, destacaram dois períodos distintos de maior deposição: um de abril a junho e outro de setembro a outubro. O primeiro período compreende a deposição por espécies caducifólias, associado ao outono e início do inverno. Andreis et al. (2005) estudaram o comportamento fenológico de vegetação decidual em Santa Tereza (RS) (mesmo bioma), incluindo sucessões secundárias. Os autores observaram que a quantidade total de folhas diminuiu de aproximadamente 85%, no período de maior atividade vegetativa, para até 35% no inverno.

A Duração do Ciclo Sazonal (Figura 5.7C) foi em média de 247 dias (aproximadamente 8 meses), o que corresponde ao verão e partes da primavera e outono. Já a variação de Amplitude Sazonal (Figura 5.7G), ou seja, a diferença entre os Valores Máximos de EVI (Figura 5.7F) registrados no verão e o Nível de Base (Figura 5.7D) no inverno, evidenciou o marcante padrão sazonal da vegetação típico de florestas decíduais, também constatado no resultado da Integral Maior e Menor (Figuras 5.7J e L). Os resultados da Derivada da Borda Esquerda (Figura 5.7H) mostraram que a taxa de variação do período de brotamento foi mais acentuada do que a de queda foliar, associado a Derivada da Borda Direita (Figura 5.7I).

As métricas mais fortemente associadas com valores absolutos de EVI (p.ex., Nível de Base, Valor Máximo, Amplitude Sazonal, Derivadas e Integrais nas

Figuras 5.7D e F-L) sugerem maior influência dos efeitos topográficos locais, em decorrência da variação sazonal do AZS, do que as métricas associadas ao período de ocorrência dos eventos (p.ex., Início, Final, Duração e Data Central do Ciclo Sazonal nas Figuras 5.7A-C e E). Tais aspectos serão discutidos de forma quantitativa na seção seguinte.

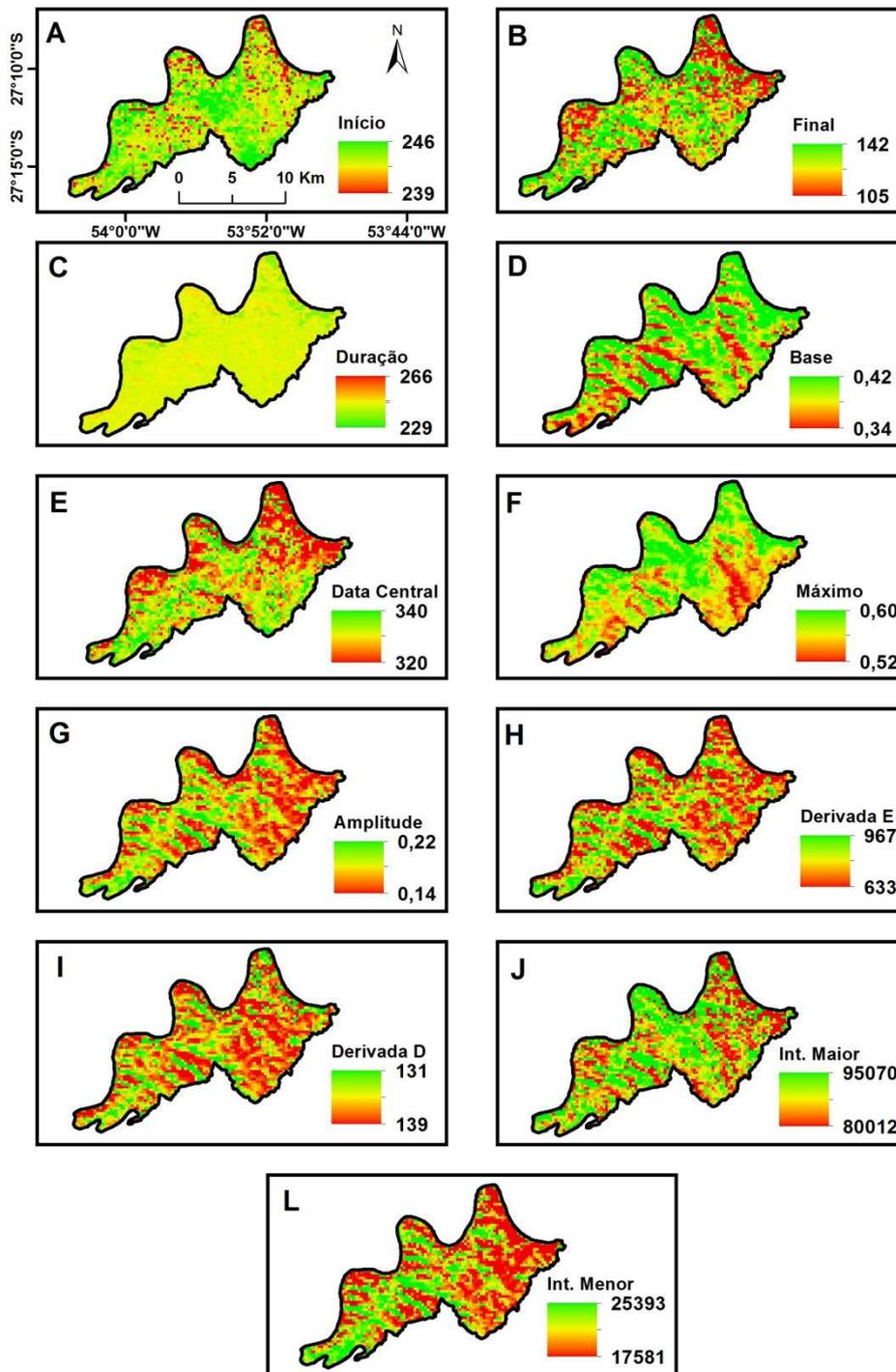


Figura 5.7 – Métricas fenológicas do ciclo sazonal 2011/12. A - Início do Ciclo Sazonal (Dia do Ano); B - Final do Ciclo Sazonal (Dia do Ano); C - Duração do Ciclo Sazonal (Dias); D - Nível de Base (IV); E - Data Central do Ciclo Sazonal (Dia do Ano); F - Valor Máximo (IV); G - Amplitude Sazonal (IV); H - Derivada da borda esquerda (Dia/IV); I - Derivada da borda direita (Dia/IV); J – Integral Maior (Dia-IV); L – Integral Menor (Dia-IV).

5.3. Relações das métricas fenológicas com a fração-sombra do MLME e com a imagem relevo sombreado da Modelagem Topográfica

Foi verificada a existência de possíveis relações entre as métricas fenológicas (ano 2011/12) e a fração-sombra do MLME (imagem composição MODIS de 26/06/2012). A imagem fração-sombra representa tanto o sombreamento produzido pela estrutura do dossel, quanto àquele resultante dos efeitos topográficos locais. Para um mesmo tipo de vegetação, superfícies sombreadas e iluminadas podem ser observadas nas imagens MODIS, especialmente no inverno, dependendo da orientação relativa das vertentes para o sensor.

Isto pode ser visto na Figura 5.8A, que apresenta a composição das frações vegetação verde (verde), solo (azul) e sombra (vermelho) projetada no MDE do SRTM. Os membros de referência selecionados são mostrados na Figura 5.8B. Percebe-se na Figura 5.8A uma significativa contribuição da fração sombra (tons avermelhados) associada com a Floresta Estacional Decidual do PET e com a topografia local, já que a imagem se refere ao período do inverno. O Rio Uruguai aparece em vermelho, visto que sua resposta espectral é mais parecida com o espectro de reflectância de uma área sombreada. Os maiores valores da fração vegetação verde ocorrem nas áreas das encostas próximas ao rio Uruguai, possivelmente associadas a solos mais rasos em encostas, com estrutura de dossel mais homogênea e de baixa rugosidade (menor sombreamento), predominando a resposta espectral mais alta do estrato inferior para o MODIS (Figura 5.9).

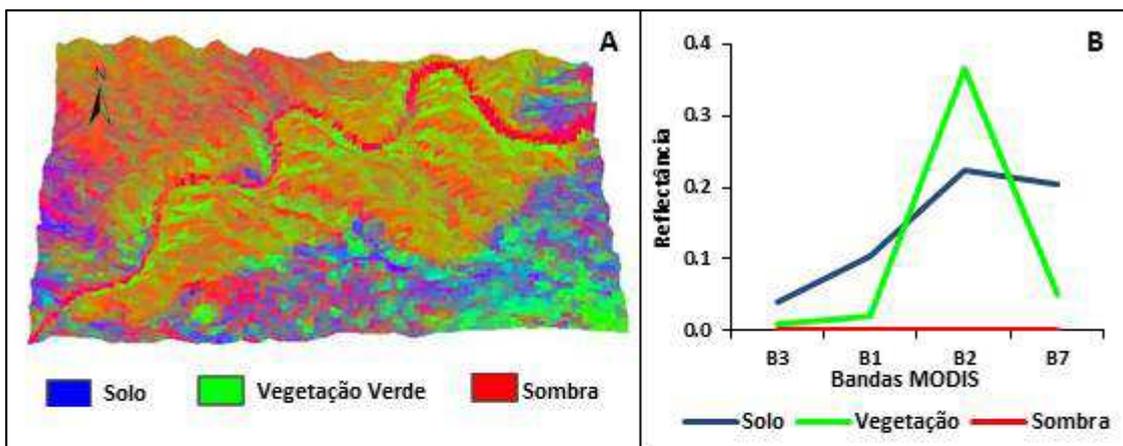


Figura 5.8 – A: Composição das frações vegetação verde, solo e sombra do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) para a imagem-composição MODIS de 26 de junho de 2012. Os resultados foram projetados sobre um modelo digital de elevação (MDE) do SRTM. B: Espectro de reflectância dos membros de referência do MLME, considerando apenas as 4 bandas do produto MOD13.



Figura 5.9 – Estrutura da vegetação de maior reflectância (maior fração de vegetação verde no MLME) que ocorre próximo às margens do rio Uruguai (lado Argentino). Fotografia adquirida em 14/09/2013.

A Tabela 5.3 mostra que as métricas atreladas ao período de ocorrência dos eventos (Início, Final, Duração e Data Central do Ciclo Sazonal) não apresentaram relações significativas com a fração-sombra do MLME. As demais métricas, que estão associadas com as variações nos valores

absolutos de EVI, apresentaram correlações significativas com a fração-sombra. Diagramas de dispersão para as métricas que apresentaram melhores correlações com a fração-sombra na Tabela 5.3 são apresentados na Figura 5.10.

Tabela 5.3 – Correlação entre as 11 métricas fenológicas do TIMESAT (ciclo 2011/12) e a fração-sombra do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME).

	Métricas Fenológicas	Coefficiente de Correlação (<i>r</i>)
1	Início do Ciclo Sazonal	+0,02
2	Final do Ciclo Sazonal	+0,13
3	Duração do Ciclo Sazonal	+0,12
4	Nível de Base	-0,92
5	Data Central do Ciclo Sazonal	+0,33
6	Valor Máximo	-0,76
7	Amplitude Sazonal	+0,79
8	Derivada da Borda Esquerda	+0,81
9	Derivada da Borda Direita	+0,56
10	Integral Maior	-0,36
11	Integral Menor	+0,80

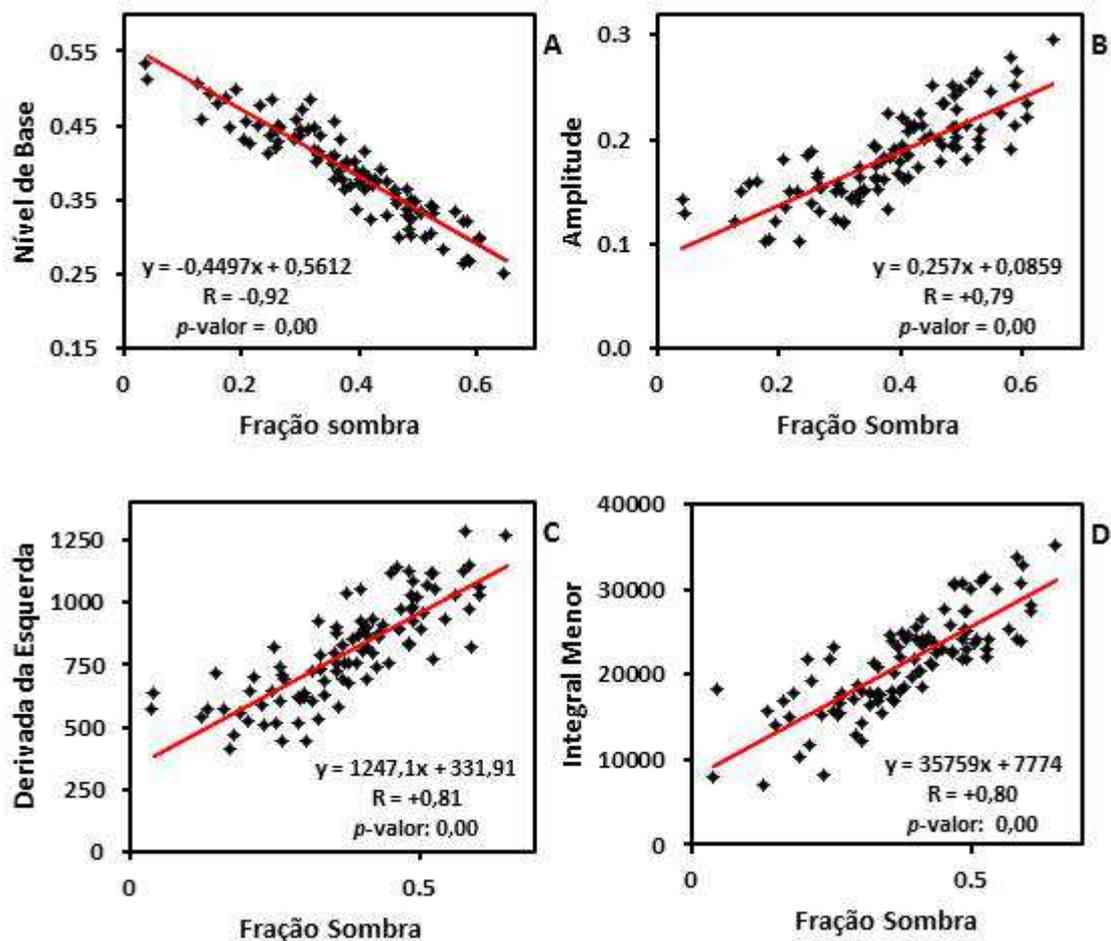


Figura 5.10 – Diagramas de dispersão da relação entre a fração sombra do MLME e as métricas: Nível de Base (A), Amplitude Sazonal (B); Derivada da borda da Esquerda (C) e Integral Menor (D) do ciclo 2011/12.

Conforme a Tabela 5.3, os marcadores de Nível de Base (Figura 5.10A) e Valor Máximo tiveram correlações negativas com a fração sombra, -0,92 e -0,76, respectivamente, em resposta a variação local do EVI durante o inverno, como descrito na seção 5.2. A Integral Maior, por estar ligada diretamente aos valores absolutos de EVI e à Duração do Ciclo Sazonal, também apresentou coeficiente de correlação negativo (-0,36) com a fração sombra. Isto ocorreu porque nas áreas com maior sombreamento os valores absolutos de EVI são menores.

A Amplitude Sazonal (Figura 5.10B), ou seja, a diferença entre o Valor Máximo e o Nível de Base, apresentou correlação positiva com a fração sombra (+0,79) em resposta à variação do EVI aos efeitos associados de IAF e AZS. Os

maiores valores de Amplitude Sazonal nas áreas sombreadas influenciaram diretamente na maior taxa de variação das Derivadas da Borda da Esquerda (Figura 5.10C) e da Direita nestas áreas, sendo que a primeira apresentou maior correlação (+0,81) que a segunda (+0,56). Como descrito na seção 5.2, a taxa de variação do período de brotamento foi mais acentuada do que a de queda foliar no ciclo 2011/12.

A Integral Menor (Figura 5.10D) também apresentou coeficiente de correlação positivo (+0,80) com a fração sombra. Sua maior resposta em áreas sombreadas se dá pela variação sazonal do EVI, influenciada pela diminuição do IAF e do sombreamento topográfico, que acentua as diferenças entre as respostas do verão e do inverno nestas áreas.

Quando a análise enfatizou os efeitos topográficos, através da obtenção da imagem do cosseno do ângulo de incidência i (Figura 5.11), correlações foram observadas tanto para as 11 métricas fenológicas extraídas pelo TIMESAT, quanto para os valores de reflectância das bandas do MODIS (azul, vermelho e infravermelho próximo), que estão apresentadas na Tabela 5.4.

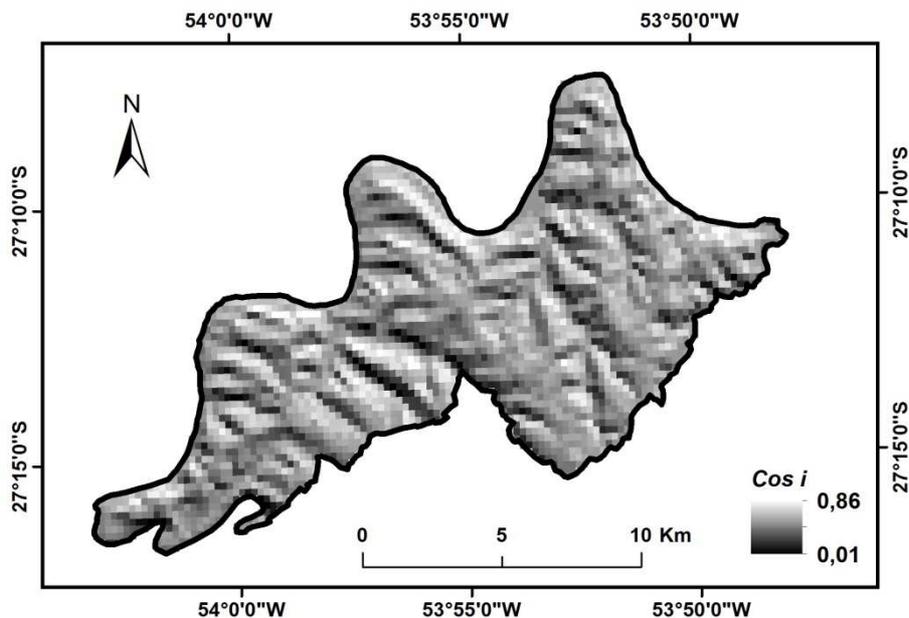


Figura 5.11 – Imagem do cosseno do ângulo de incidência ($\cos i$) da imagem SRTM reamostrada de 30 m para 250m.

Tabela 5.4 – Correlação dos valores da imagem relevo sombreado ($\cos i$) com as 11 métricas fenológicas do TIMESAT (ciclo 2011/12) e a reflectância das bandas MODIS.

	Métricas Fenológicas	Coefficiente de Correlação (r)
1	Início do ciclo sazonal	+0,13
2	Final do ciclo sazonal	+0,01
3	Duração do ciclo sazonal	+0,00
4	Nível de base	+0,88
5	Data central do ciclo sazonal	-0,27
6	Valor máximo	+0,65
7	Amplitude sazonal	-0,82
8	Derivada da borda esquerda	-0,76
9	Derivada da borda direita	-0,65
10	Integral Maior	+0,43
11	Integral Menor	-0,78
Bandas MODIS		
1	Azul (Banda 3)	+0,37
2	Vermelho (Banda 1)	+0,69
3	Infravermelho próximo (Banda 2)	+0,84

Assim como nas correlações obtidas através do MLME, aquelas métricas diretamente associadas aos valores absolutos de EVI, foram as que obtiveram os melhores resultados. As métricas de Nível de Base (Figura 5.12A), Amplitude Sazonal (Figura 5.12B); Derivada da borda da Esquerda (Figura 5.12C) e Integral Menor (Figura 5.12D) foram as que também apresentaram as melhores correlações com o $\cos i$ da imagem relevo sombreado.

As bandas do sensor MODIS (azul, vermelho e infravermelho próximo) apresentaram correlações positivas com o cosseno do ângulo de incidência (Tabela 5.4). A diminuição do AZS, associada ao efeito de topografia local, gera a diminuição da quantidade de radiação nas encostas sombreadas e, conseqüentemente, a diminuição da reflectância do dossel em todas estas bandas, sendo a do infravermelho próximo (Figura 5.12F) e a do vermelho (Figura 5.12E) as mais fortemente correlacionadas, respectivamente.

As métricas que expressam marcadores de data, como Início, Final, Duração e Data Central do Ciclo Sazonal, não apresentaram correlações significativas com o efeito topográfico de iluminação, de forma similar aos resultados apresentados pela fração-sombra do MLME. Deste modo, a variabilidade

espacial destes eventos, observada na Figura 5.7 (A, B, C e D), sugere a influência dos aspectos biofísicos inerentes à resposta da fenologia foliar das espécies deciduais presentes na área (Tabela 5.2).

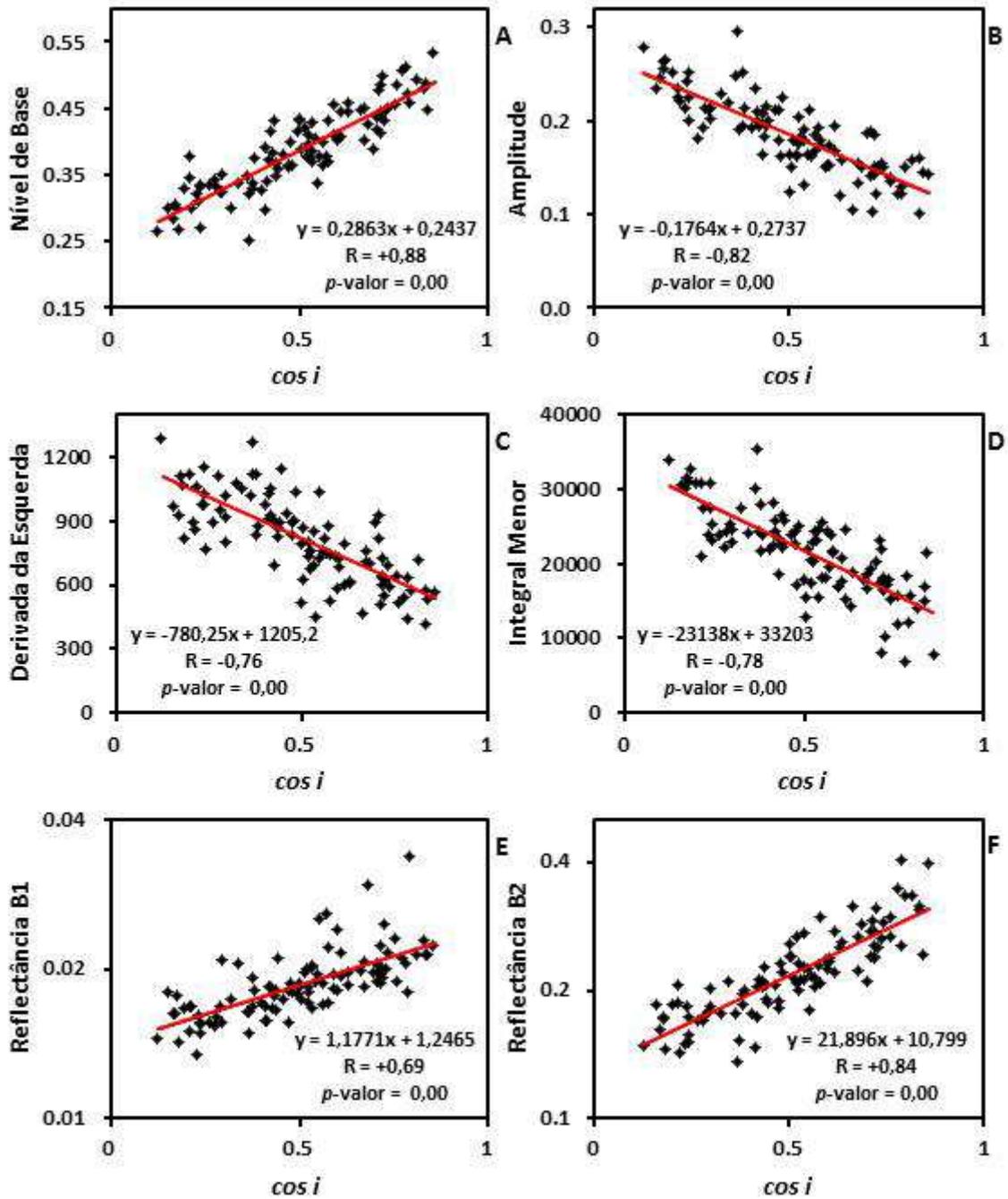


Figura 5.12 – Diagramas de dispersão da relação do $\cos i$ da imagem relevo sombreado com as métricas do ciclo 2011/12: Nível de Base (A), Amplitude Sazonal (B); Derivada da borda da Esquerda (C) e Integral Menor (D) e reflectância das Bandas Vermelho (E) e Infravermelho próximo (F).

5.4. Detecção de padrões atípicos de temperatura na série temporal (2002-2012) usando análise de Ondeletas

Na Figura 5.13 é apresentado o espectro de potência da ondeleta de Morlet para os dados de temperatura média diária da estação meteorológica de Iraí (RS) entre os anos 2002 e 2012. O espectro mostra a variação de potência do sinal de temperatura (escala em cores) ao longo do tempo (eixo das abcissas) e sua escala de ocorrência, ou seja, sua periodicidade (eixo das ordenadas).

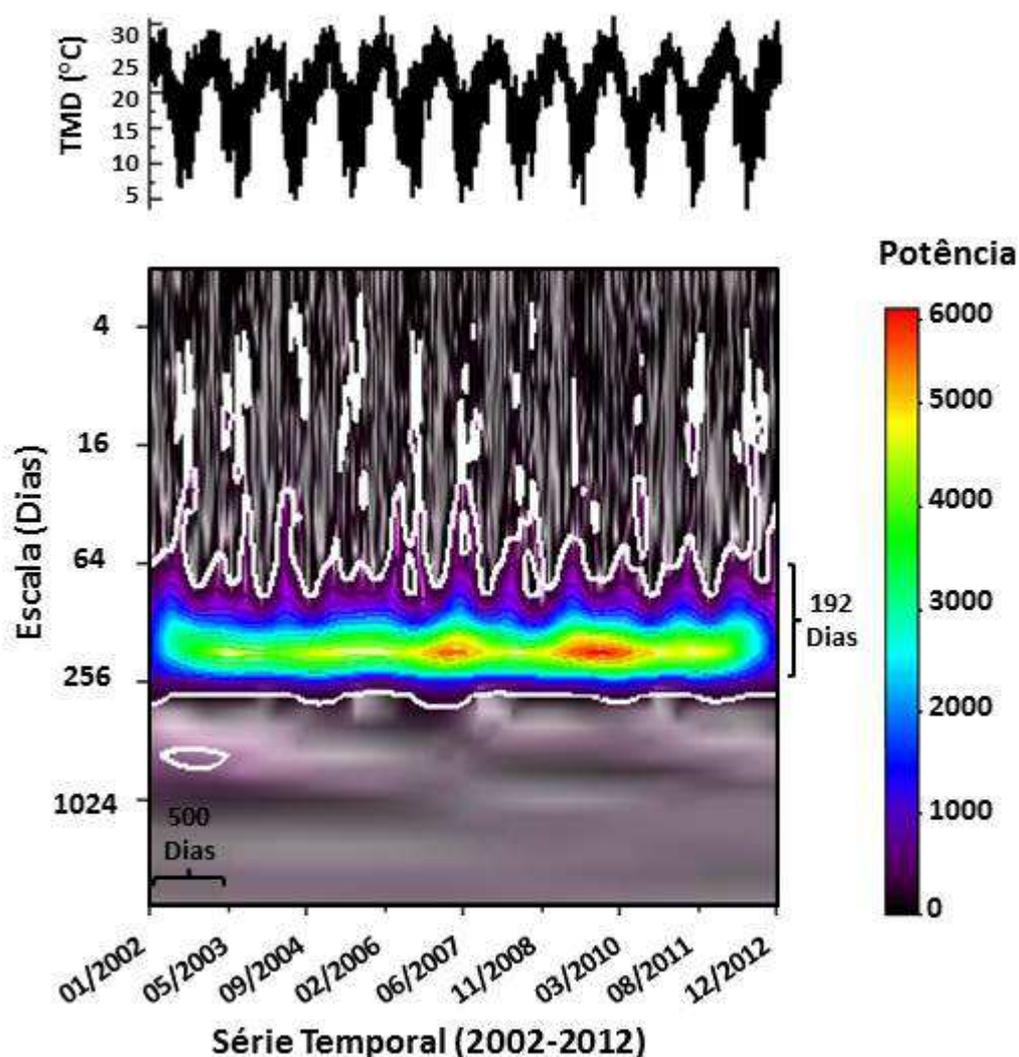


Figura 5.13 - Espectro de Potência da Ondeleta Morlet (ordem 3) para os dados de Temperatura Média Diária (TMD) entre os anos de 2002 e 2012. A série de TMD (°C) é apresentada na parte superior. No espectro, o eixo x corresponde à variação temporal do sinal. O eixo y é a escala de variação do sinal dada em dias. A linha branca representa a significância dos dados com nível estatístico de 0,01.

Pode-se observar que as potências mais significativas (nível estatístico de 0,01), delimitadas pela linha branca, ocorrem ao longo de toda a série com periodicidade aproximada de 190 dias, o que corresponde à variação sazonal dos períodos de verão e inverno. Observam-se dois períodos de maior potência do sinal ao longo da série (cor vermelha na Figura 5.13), relacionados às variações sazonais dos anos 2006/07 e 2009/10, e um período de baixa potência em 2003/2004 (cor verde/ciano truncando a linha amarela em torno de 750 dias). Tal fato decorre da diferença de amplitude do sinal entre os períodos de máxima e mínima temperatura nos anos indicados.

Na Figura 5.14A-B, ao se analisar a média dos meses mais quentes (dezembro e janeiro) e dos meses mais frios (junho e julho), verifica-se que a diferença de amplitude entre as elevadas temperaturas do verão dos ciclos 2006/07 e 2009/10 (Figura 5.14A) e as baixas temperaturas do inverno em 2007 e 2009 (Figura 5.14B) ocasionaram as altas potências detectadas pelo espectro de ondeletas. Por outro lado, as baixas temperaturas do verão em 2003/04 foram detectadas pelas ondeletas como um período de menor potência em relação à série.

As temperaturas mais elevadas dos ciclos de 2006/07 e 2009/10 estão possivelmente associadas aos eventos de El Niño-Oscilação Sul (ENOS), ocorridos nestes períodos (CPTEC, 2014; CPC/NOAA, 2014). Como reportado na literatura, o El Niño provoca a elevação da temperatura na região sul do Brasil durante o verão (BERLATO; FONTANA, 2003). Nestes dois anos, a média da temperatura dos meses de dezembro e janeiro (Figura 5.14A) foi aproximadamente 1°C e 0,5°C, respectivamente, superiores à média dos demais anos. Em 2003/04, para o mesmo período, ela foi aproximadamente 1°C inferior à média dos demais ciclos.

Desta forma, a análise de ondeletas mostrou que os ciclos de 2006/2007 e 2009/2010 mostraram comportamento sazonal antagônico de temperatura (valores altos de potência) em relação ao período de 2003/2004 (valores baixos). A influência deste comportamento sobre as métricas fenológicas do TIMESAT será discutida a seguir.

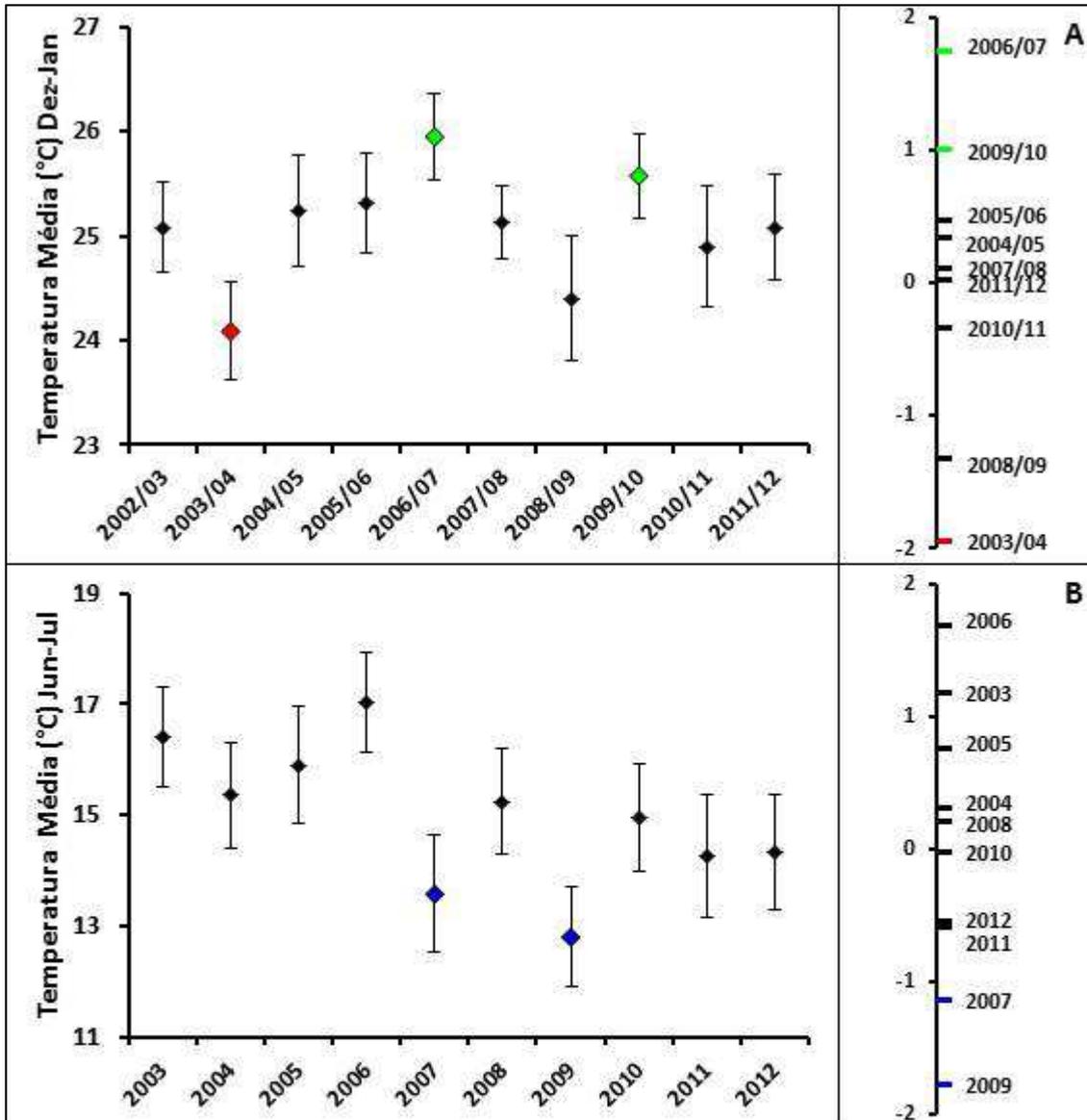


Figura 5.14 – Temperatura média diária. A: Média da temperatura diária para os meses de dezembro e janeiro; B: Média da temperatura diária para os meses de junho e julho. No eixo direito do gráfico, dados de temperatura, padronizados com relação a média, são apresentados.

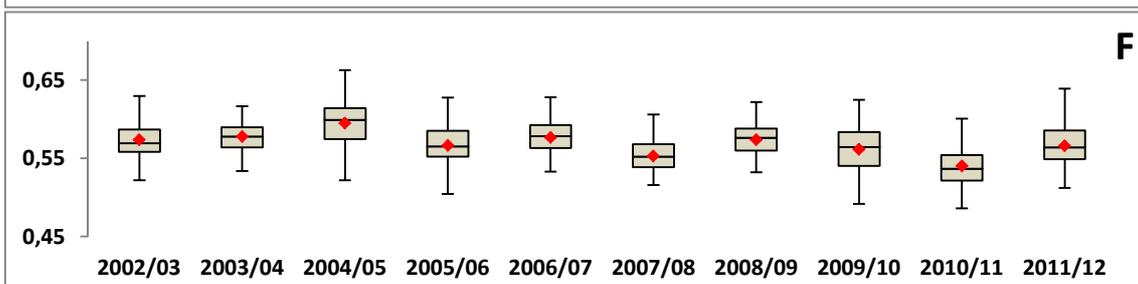
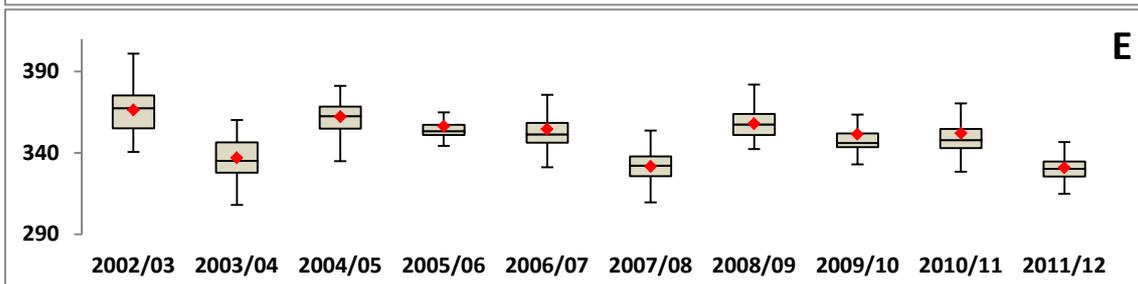
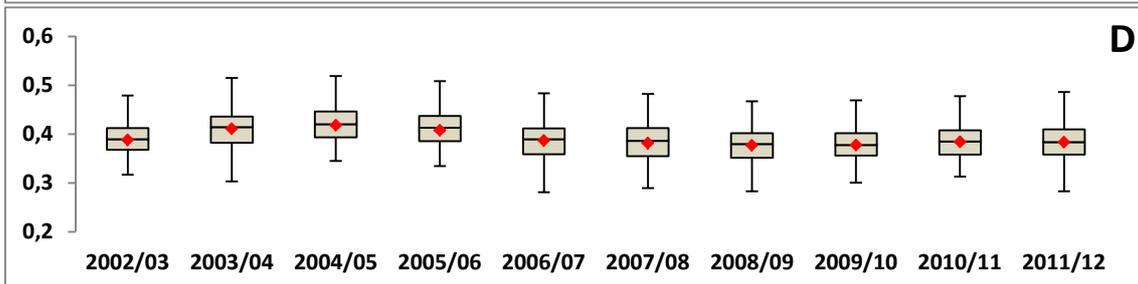
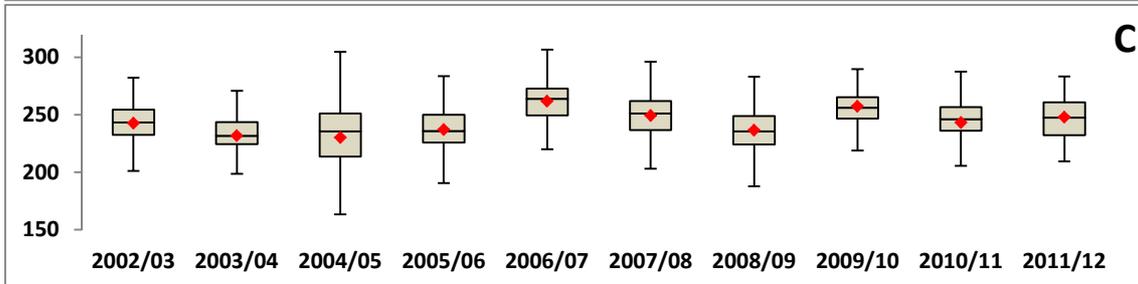
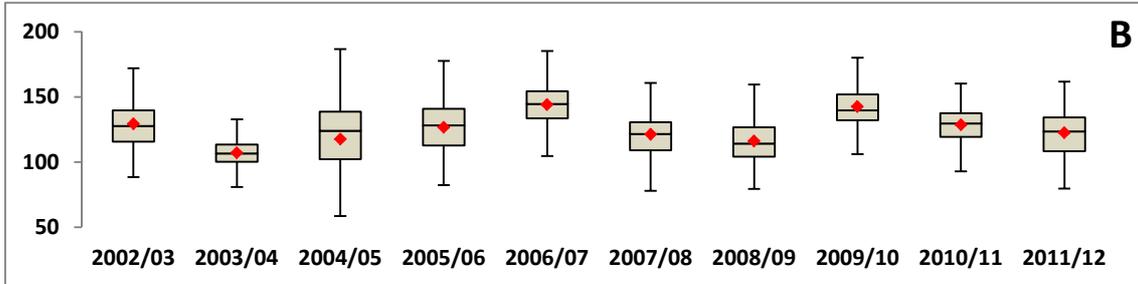
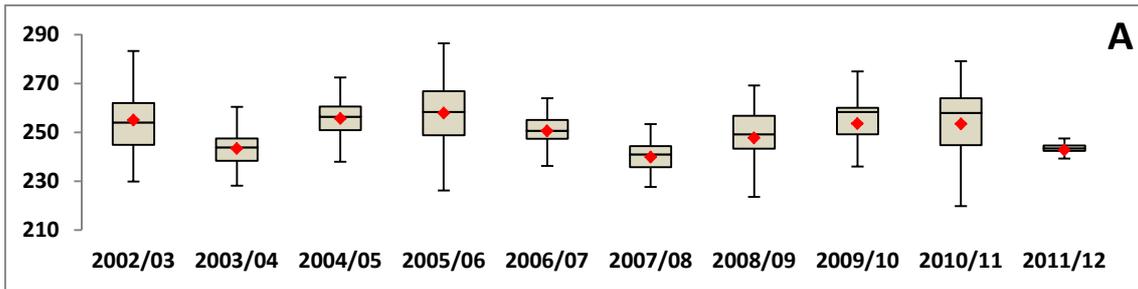
5.5. Variabilidade interanual das métricas fenológicas relacionadas aos padrões atípicos de temperatura.

Na Figura 5.15 são apresentados os *boxplots* das 11 métricas fenológicas calculadas pelo TIMESAT usando o EVI/MODIS dos ciclos sazonais entre 2002 e 2012. A média dos marcadores de cada ciclo está sinalizada em vermelho. O Início do Ciclo Sazonal (Figura 5.15A) variou em média entre os meses de agosto e setembro, o que corresponde ao final do inverno e início da

primavera, em resposta à elevação da temperatura deste período. O ciclo 2005/06 apresentou o maior atraso de Início do Ciclo, com média registrada por volta do dia 15 de setembro, enquanto que 2007/08 foi o mais adiantado, com sua média em torno de 27 de agosto. Após o período de Início do Ciclo, ocorre o aumento gradual do EVI até alcançar a Data Central do Ciclo Sazonal (Figura 5.15E) em torno de dezembro, onde são registrados os Valores Máximos (Figura 5.15F), cujas médias foram entre 0,54 e 0,59.

Ainda no primeiro trimestre do ano subsequente do ciclo (janeiro, fevereiro e março) se inicia o decréscimo do EVI devido à redução do IAF ocasionada pela diminuição da temperatura e do foto-período, até alcançar o Final do Ciclo Sazonal (Figura 5.15B), que variou entre os meses de abril e maio. O ciclo de 2003/04 foi o que registrou o Final do Ciclo mais adiantado, por volta do dia 17 de abril. Já os ciclos 2006/07 e 2009/10 foram os de maior atraso, com médias em torno dos dias 24 e 22 de maio, respectivamente.

A Duração do Ciclo Sazonal (Figura 5.15C), ou seja, o período que compreende o intervalo entre o Início e o Final do Ciclo, variou em torno 230 e 260 dias (7 e 8 meses e meio), o que corresponde ao verão e partes da primavera e outono. A métrica de Nível de Base (Figura 5.15D) registrou médias em torno de 0,37 a 0,41. Já a variação de Amplitude Sazonal (Figura 5.15G), ou seja, a diferença entre o Valor Máximo de EVI e o Nível de Base, alcançou valores entre 0,15 e 0,19 evidenciando o marcante padrão sazonal da vegetação entre o verão e inverno. Nas Figuras 5.15H-L são apresentadas ainda as métricas de Derivada da Borda Esquerda, Derivada da Borda Direita, Integral Maior e Integral Menor, respectivamente.



Continua

Figura 5.15 - Conclusão

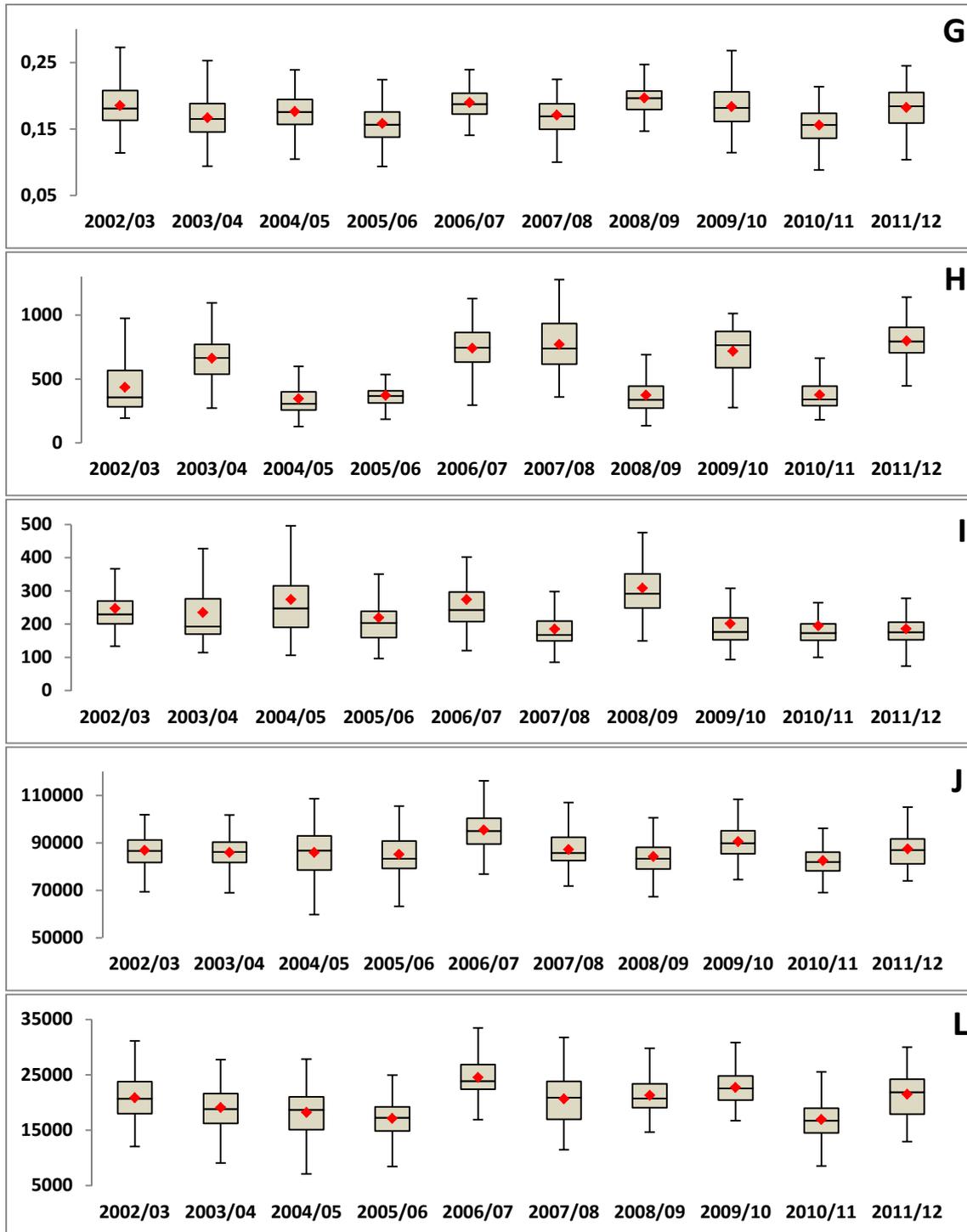


Figura 5.15 – *Boxplot* das 11 métricas fenológicas do TIMESAT entre 2002 e 2012. Os dados de 100 pixels escolhidos aleatoriamente. As médias são mostradas em vermelho. A - Início do ciclo sazonal (Dia do Ano); B - Final do ciclo sazonal (Dia Juliano); C - Duração do ciclo sazonal (Dia do Ano); D - Nível de base (IV); E - Data central do ciclo sazonal (Dia do Ano); F - Valor máximo (IV); G - Amplitude Sazonal (IV); H - Derivada da borda Esquerda (IV/Dia); I - Derivada da borda Direita (IV/Dia); J – Integral Maior (IV-Dia); L - Integral Menor (IV-Dia).

Obtiveram-se as correlações entre as médias de temperatura máxima, média e mínima e as métricas fenológicas dos ciclos sazonais entre 2002 e 2012 (Tabela 5.5). Usando um procedimento similar ao de Du et al. (2014), os valores médios de temperatura máxima, temperatura média e temperatura mínima foram correlacionados com as métricas do TIMESAT e com o EVI mínimo para diferentes períodos mensais mostrados na Tabela 5.5, conforme descrito na Metodologia de Trabalho.

Tabela 5.5 – Coeficientes de correlação das métricas fenológicas do TIMESAT e do EVI mínimo (média de 100 pixels) com as médias das temperaturas máximas, médias e mínimas para períodos distintos nos diferentes ciclos sazonais. *Nível de significância: $p < 0,05$

	Métricas Fenológicas	Média da Temperatura Máxima (°C)	Média da Temperatura Média (°C)	Média da Temperatura Mínima (°C)
1	Início do Ciclo Sazonal	-0,44 (ago-set)	-0,12 (ago-set)	+0,12 (ago-set)
2	Final do Siclo Sazonal	-0,08 (fev-mar)	+0,36 (fev-mar)	+0,76* (fev-mar)
3	Duração do Ciclo Sazonal	+0,30 (out-mar)	+0,64* (out-mar)	+0,68* (out-mar)
4	Nível de Base	-	-	-
5	Data Central do Ciclo Sazonal	-0,06 (out-mar)	+0,32 (out-mar)	+0,51 (out-mar)
6	Valor Máximo	-0,10 (nov-dez)	+0,05 (nov-dez)	0,09 (nov-dez)
7	Amplitude Sazonal	+0,49 (out-mar)	+0,57 (out-mar)	+0,45 (out-mar)
8	Derivada da Borda Esquerda	+0,36 (out-mar)	+0,26 (out-mar)	+0,08 (out-mar)
9	Derivada da Borda direita	+0,19 (out-mar)	+0,22 (out-mar)	+0,16 (out-mar)
10	Integral Maior	+0,57 (out-mar)	+0,78* (out-mar)	+0,64* (out-mar)
11	Integral Menor	+0,51 (out-mar)	+0,69* (out-mar)	+0,59 (out-mar)
	EVI Mínimo	+0,74* (jun-jul)	+0,77* (jun-jul)	+0,73* (jun-jul)

Na Figura 5.16 são apresentados os diagramas de dispersão das melhores correlações indicadas na Tabela 5.5. As métricas de Final do Ciclo Sazonal (Figura 5.16A), Duração do Ciclo Sazonal (Figura 5.16B), Integral Maior (Figura 5.16C) e Integral Menor (Figura 5.16D) indicaram correlações positivas e estatisticamente significantes com a variação interanual das temperaturas

mínimas e médias. Du et al. (2014), ao estabelecerem de forma semelhante correlações entre as métricas fenológicas e parâmetros meteorológicos em floresta de coníferas na China, mostraram o papel primordial das temperaturas mínimas no controle da dinâmica fenológica da área.

Diferente dos Valores Máximos de EVI, que não apresentaram correlação com os dados de temperatura para os meses mais quentes (Tabela 5.5), os valores de EVI mínimo para o mês de julho foram estatisticamente significantes para os meses mais frios. Quanto menores as temperaturas neste período, menores foram os valores de EVI (Figura 5.16E). Deste modo, os anos de 2007 e 2009, indicados na seção 5.4 como tendo as menores temperaturas de inverno, foram os que apresentaram os menores valores de EVI da série (pontos azuis na Figura 5.16E).

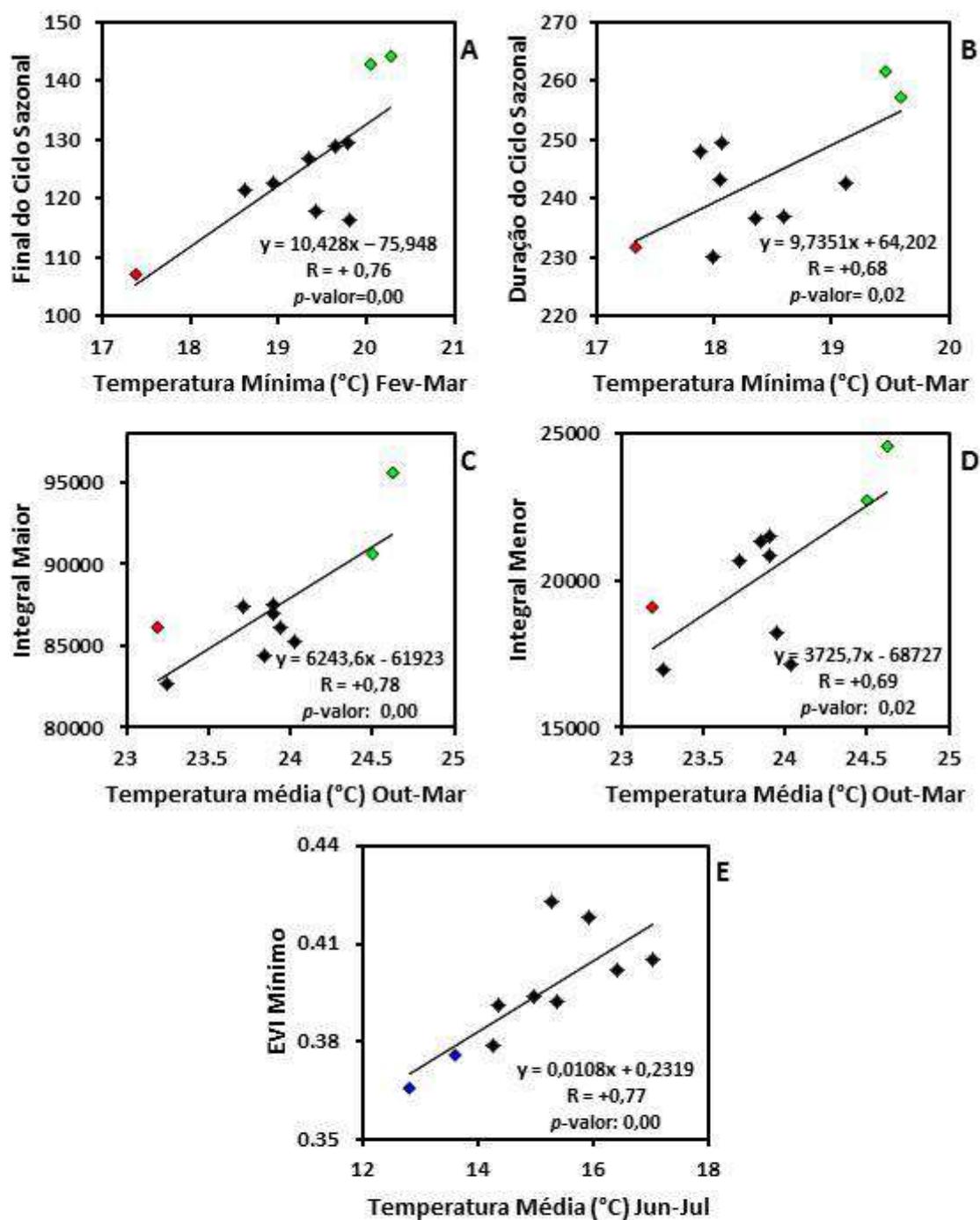


Figura 5.16 – Diagrama de dispersão da relação entre valores médios de temperatura e das métricas fenológicas Final do Ciclo Sazonal (A), Duração do Ciclo Sazonal (B), Integral Maior (C), Integral Menor (D) e EVI mínimo (E) (referente à média dos 100 pixels aleatórios para cada ciclo apresentada na Figura 5.15). Os ciclos 2006/07 e 2009/10 são indicados pelos símbolos verdes e o ciclo 2003/04 pelo símbolo vermelho. Os dados dos invernos de 2007 e 2009 são indicados em azul em (E).

Na seção anterior, a análise de ondeletas mostrou a existência de dois ciclos de temperatura atípica (2006/2007 e 2009/2010) com maiores potências e de outro ciclo (2003/2004) com menores potências. Tendo em vista a variabilidade interanual das métricas fenológicas do TIMESAT, verificou-se, através das Figuras 5.15 e 5.16, que as métricas de Final do Ciclo Sazonal, Duração do Ciclo Sazonal, Integral Maior e Integral Menor, para os ciclos 2006/07 e 2009/10, apresentaram médias superiores às verificadas nos demais anos. Por sua vez, o ciclo 2003/04 apresentou o menor valor para a métrica de Final do Ciclo Sazonal.

Nos anos de referência (2006/07 e 2009/10), verificou-se que métrica fenológica Final do Ciclo Sazonal indicou um atraso de aproximadamente 17 dias com relação à média dos demais anos, enquanto que em 2003/04 ela foi antecipada em torno de 18 dias. Em 2003/04 sua ocorrência se deu no final do mês abril e em 2006/07 e 2009/10 no final de maio. O atraso no Final dos Ciclos destes dois anos deve-se, possivelmente, aos maiores valores de temperatura mínima no primeiro trimestre de 2007 e 2010 (Figura 5.16A), que prolongaram o período de produtividade primária e atrasaram a perda de folhas.

Em decorrência do atraso no Final Ciclo Sazonal de 2006/07 e 2009/10, a métrica Duração do Ciclo Sazonal sofreu prolongamento em torno de 21 e 18 dias, respectivamente, em relação à média dos demais anos. Como a resposta das métricas Integral Maior e Menor está relacionada diretamente com a Duração do Ciclo Sazonal, seus resultados para 2006/07 e 2009/10 também foram superiores aos dos demais anos. Deste modo, pode-se inferir que nos ciclos sazonais de 2006/07 e 2009/10, marcados pelas elevadas temperaturas durante o verão, possivelmente associadas à ocorrência do ENOS, o período de produtividade primária foi maior, comparado com aquele verificado em 2003/04 e nos demais anos, devido ao prolongamento do ciclo sazonal, como indicado pela métrica fenológica de Final do Ciclo Sazonal.

A fim de se averiguar se as médias destes anos de comportamento atípico, para as métricas indicadas, foram significativamente diferentes dos demais anos, aplicou-se o teste estatístico de comparação de média *t*-pareado.

A Tabela 5.6 apresenta o *p*-valor da estatística, onde se constata que as médias das métricas Final do Ciclo Sazonal, Duração do Ciclo Sazonal, Integral Maior e Integral Menor, para os anos de referência 2006/07 e 2009/10, são estatisticamente diferentes não apenas de 2003/2004, como também dos demais anos a 0,05 de significância estatística. O ciclo 2003/04, que apresentou a menor média para o Final do Ciclo Sazonal, também foi significativamente diferente dos demais anos para esta métrica.

Tabela 5.6 – Resultado do *p*-valor da estatística *t*-pareada de comparação de médias de 2003/04, 2006/07 e 2009/10 com os demais anos.

Métricas fenológicas	Ciclos sazonais	2003/04	2006/07	2009/10
Final do ciclo sazonal	2002/03	0,000	0,000	0,000
	2003/04	-	0,000	0,000
	2004/05	0,000	0,000	0,000
	2005/06	0,000	0,000	0,000
	2006/07	0,000	-	0,581
	2007/08	0,000	0,000	0,000
	2008/09	0,000	0,000	0,000
	2009/10	0,000	0,581	-
	2010/11	0,000	0,000	0,000
	2011/12	0,000	0,000	0,000
Duração do ciclo sazonal	2002/03	-	0,000	0,000
	2003/04	-	0,000	0,000
	2004/05	-	0,000	0,000
	2005/06	-	0,000	0,000
	2006/07	-	-	0,131
	2007/08	-	0,000	0,000
	2008/09	-	0,000	0,000
	2009/10	-	0,131	-
	2010/11	-	0,000	0,000
	2011/12	-	0,000	0,000

Tabela 5.6 - Conclusão

Integral Maior	2002/03	-	0,000	0,000
	2003/04	-	0,000	0,000
	2004/05	-	0,000	0,000
	2005/06	-	0,000	0,000
	2006/07	-	-	0,000
	2007/08	-	0,000	0,001
	2008/09	-	0,000	0,000
	2009/10		0,000	-
	2010/11	-	0,000	0,000
	2011/12	-	0,000	0,000
	Integral Menor	2002/03	-	0,000
2003/04		-	0,000	0,000
2004/05		-	0,000	0,000
2005/06			0,000	0,000
2006/07		-	-	0,000
2007/08		-	0,000	0,000
2008/09		-	0,000	0,000
2009/10		-	0,000	-
2010/11		-	0,000	0,000
2011/12		-	0,000	0,001

Para melhor dimensionar os resultados destas métricas na área do PET em relação à média dos demais anos, imagens padronizadas (z) foram geradas para os ciclos de 2006/07 e 2009/10 (maiores temperaturas de verão) e 2003/04 (menores temperaturas de verão) (Figura 5.17). A padronização interanual minimiza os efeitos topográficos sobre as métricas. Verificou-se que 2006/07 e 2009/10 tiveram desvios positivos com relação à média dos demais anos, sendo os desvios registrados em 2006/07 maiores do que em 2009/10. Para o ciclo de 2003/04, a métrica Final do Ciclo Sazonal apresentou desvios negativos com relação à média, enquanto que para as demais métricas seu comportamento ficou em torno da média geral.

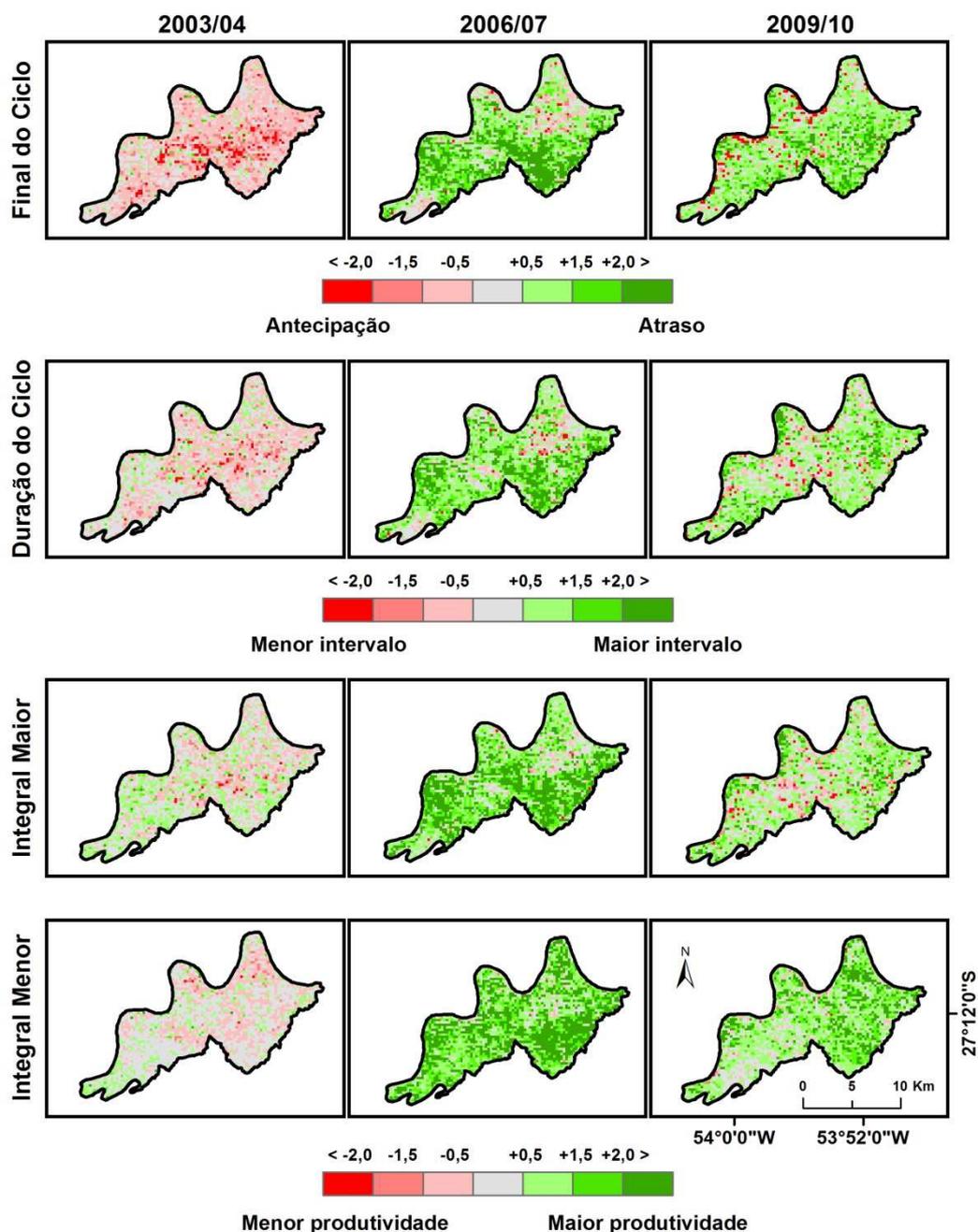


Figura 5.17 – Imagens padronizadas das Métricas fenológicas EVI/MODIS, calculadas usando o TIMESAT, para os ciclos sazonais de 2003/04 (valores baixos de potência na análise de ondeletas de dados de temperatura) e 2006/07-2009/10 (valores atipicamente altos de potência). As métricas foram padronizadas para o restante da série temporal entre 2002 e 2012.

Deste modo, os dados apontam que os padrões atípicos de temperaturas mais elevadas durante a estação de crescimento dos ciclos sazonais 2006/07 e 2009/10 influenciaram no seu prolongamento e, conseqüentemente, na maior

produtividade primária da vegetação quando comparados ao ciclo de 2003/04 e aos demais anos.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em geral, os resultados deste estudo mostraram que algumas métricas fenológicas do TIMESAT, quando aplicado aos dados EVI/MODIS, foram influenciadas pelo sombreamento dos dosséis e por efeitos topográficos locais no PET. Entretanto, independente de tais efeitos, o comportamento interanual das métricas Final do Ciclo Sazonal, Duração do Ciclo Sazonal, Integral Maior e Integral Menor foram relacionadas com padrões atípicos de temperatura na série temporal, detectados pela análise de ondas nos ciclos sazonais 2006/07, 2009/10 (potência alta) e 2003/04 (potência baixa). O comportamento destas métricas sugere que as temperaturas mais elevadas dos verões dos ciclos 2006/07 e 2009/10 prolongaram o período de produtividade primária em relação ao ciclo 2003/04 e em relação aos anos com temperaturas normais. Os valores absolutos de EVI mínimo para julho (inverno) indicaram significativa correlação com as temperaturas do período de inverno.

A variação anual de EVI apresentou máximos valores ($0,57 \pm 0,05$, dezembro) registrados no verão e os mínimos ($0,39 \pm 0,02$, julho) no inverno, estando associada à sazonalidade da vegetação. A resposta do EVI no inverno é resultado do efeito associado da variação do IAF, do AZS e do efeito de sombra topográfica. A amplitude sazonal no AZS entre o verão e inverno indica diferenças importantes na quantidade de sombras vistas pelo sensor MODIS resultante da estrutura do dossel e de variações locais na iluminação do terreno.

A análise do comportamento sazonal das métricas fenológicas extraídas no TIMESAT para o ciclo sazonal 2011/12 indicou: (a) o Início do Ciclo Sazonal entre os meses de agosto e setembro, influenciado pelo aumento progressivo do fotoperíodo e da temperatura no brotamento foliar; (b) o Final do Ciclo Sazonal registrado entre a segunda quinzena de abril e a primeira de maio, associado à diminuição do IAF pela queda da temperatura e diminuição do fotoperíodo no primeiro trimestre de 2012; (c) a Duração do Ciclo Sazonal de aproximadamente 8 meses, entre setembro e abril; (d) a variação de Amplitude

Sazonal do EVI entre o inverno e verão evidenciando o marcante padrão sazonal da vegetação típico de florestas decíduais.

Foi verificada a sensibilidade das métricas fenológicas extraídas no TIMESAT aos efeitos de sombreamento por meio da fração-sombra do MLME e da imagem relevo sombreado ($\cos i$). Os resultados indicaram que os marcadores fenológicos de data (Início, Final, Duração e Data Central do Ciclo Sazonal) não tiveram correlações significativas com o sombreamento das copas ou dos efeitos topográficos locais. O contrário ocorreu para as métricas mais diretamente associadas aos valores absolutos de EVI (Nível de Base, Valor Máximo, Amplitude Sazonal, Derivadas e Integrais). Quando foram verificadas as relações entre a reflectância das bandas do sensor MODIS (azul, vermelho e infravermelho próximo) e o $\cos i$, observou-se uma associação positiva entre o fator cosseno e a reflectância das três bandas do MODIS, sendo a banda do infravermelho próximo a mais fortemente correlacionada com o $\cos i$.

A análise do espectro de ondeleta dos dados de temperatura média diária da estação meteorológica de Iraí-RS, entre os anos 2002 e 2012, permitiu identificar dois períodos de maior potência no sinal relacionados às variações sazonais dos anos 2006/07 e 2009/10 e um de menor potência em 2003/04. Isto se deu pela diferença de amplitude entre as elevadas temperaturas do verão dos ciclos 2006/07 e 2009/10 e as baixas temperaturas do inverno em 2007 e 2009, ocasionando as altas potências detectadas pelo espectro de ondeletas. Por sua vez, as baixas temperaturas do verão em 2003/04 foram detectadas pelas ondeletas como o período de menor potência da série temporal. As temperaturas mais elevadas dos ciclos de 2006/07 e 2009/10 estão possivelmente associadas aos eventos de El Niño-Oscilação Sul (ENOS).

Ao serem verificadas as relações entre temperatura e a variação interanual das métricas fenológicas dos ciclos sazonais entre 2002 e 2012, verificou-se que os marcadores fenológicos Final do Ciclo Sazonal, Duração do Ciclo Sazonal, Integral Maior e Integral Menor apresentaram correlações positivas e estatisticamente significantes com a variação interanual das temperaturas

mínimas e médias. Os valores absolutos de EVI mínimo para julho foram estatisticamente correlacionados com a média das temperaturas dos meses de junho e julho, indicando que quanto menores as temperaturas no inverno, menores são os valores de EVI, sendo 2007 e 2009 os anos que apresentaram os mais baixos valores da série.

As métricas de Final do Ciclo Sazonal, Duração do Ciclo Sazonal, Integral Maior e Integral Menor, para os ciclos 2006/07 e 2009/10 (valores de alta potência na análise de ondeletas), apresentaram médias superiores às verificadas nos demais anos. O ciclo 2003/04 (baixa potência) apresentou o menor valor para a métrica Final do Ciclo Sazonal. As médias destes anos de comportamento atípico, para as métricas indicadas, foram significativamente diferentes ($p < 0,05$) dos demais anos, de acordo com o teste estatístico de *t*-pareado. De forma consistente, as imagens padronizadas destas métricas fenológicas indicaram desvios positivos com relação à média para 2006/07 e 2009/10 no PET, sendo o primeiro desvio maior do que o segundo. Para o ciclo de 2003/04, a métrica Final do Ciclo Sazonal apresentou desvios negativos com relação à média, enquanto que as demais métricas mostraram comportamento em torno da média geral.

Como recomendações, futuros trabalhos de fenologia por satélite no PET poderão se beneficiar do uso combinado do MODIS (alta resolução temporal) com outros sensores de melhor resolução espacial ou espectral. Este é o caso dos dados da constelação de satélites RapidEye (5 m de resolução espacial), que possibilita a aquisição programada de várias imagens ao longo de um determinado ano sobre uma mesma área de estudo. Este também é o caso de futuros sensores hiperespectrais como o EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program) ou HypsIRI (Hyperspectral Infrared Imager), que irão possibilitar o cálculo de dezenas de novos IV de bandas estreitas potencialmente úteis como marcadores fenológicos. Há também a necessidade premente de estudos fenológicos de campo de longa duração no PET, que possam ser correlacionados com as informações geradas por estes instrumentos.

O uso de composições MODIS de 8 dias poderia ser testada com o TIMESAT para melhor caracterização de eventos fenológicos dinâmicos, que variam entre espécies em curto espaço de tempo. Entretanto, é possível antecipar que o nível de incertezas nos dados, resultante dos efeitos atmosféricos e dos de geometria de iluminação e visada de cena sobre os IV, aumentará bastante. Neste caso, haverá necessidade do desenvolvimento de procedimentos mais eficientes de correção atmosférica e mascaramento de nuvens como o proposto pelo algoritmo *Multi-angle implementation of atmospheric correction for MODIS* (MAIAC) (LYAPUSTIN et al., 2012).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, J. B.; GILLESPIE, A. R. **Remote sensing of landscapes with spectral images: a physical modeling approach**. Cambridge, UK: Cambridge University, 2006. 362p. ISBN (0-521-66221-4).
- ANDERSON, L. O. Biome-Scale Forest Properties in Amazonia Based on Field and Satellite Observations. **Remote Sensing**, v. 4, n. 5, p. 1245-1271, 2012.
- ANDERSON, L.O.; ARAGÃO, L.; SHIMABUKURO, Y.E.; ALMEIDA, S.; HUETE, A. Fraction images for monitoring intra-annual phenology of different vegetation physiognomies in Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, p. 387-408, 2011.
- ANDRADE, F. M. **Influências remotas na previsibilidade, estrutura e ciclo de vida da Zona de Convergência do Atlântico Sul**. 2011. 175 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/02.24.21.46-TDI). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2011.
- ANDREIS, C.; LONGHI, S. J.; BRUN, E. J.; WOJCIECHOWSKI, J. C.; MACHADO A. A.; VACCARO, S.; CASSAL, C. Z. Estudo Fenológico em três fases sucessionais de uma Floresta Estacional Decidual no município de Santa Tereza, RS, Brasil. **Árvore**, v. 29, n. 1, p. 55-63, 2005.
- ANDREW, M.E.; USTIN, S.L. Effects of microtopography and hydrology on phenology of an invasive herb. **Ecography**, v. 32, n. 5, p. 860-870, 2009.
- ARAÚJO, L. E.; SILVA, D. Influência da variabilidade climática sobre a distribuição espaço-temporal da precipitação no Baixo Paraíba (PB). **Caminhos de Geografia**, v. 12, n. 37, p. 289-304, 2011.
- ATKINSON, P. M.; DASH, J.; JEGANATHAN, C. Amazon vegetation greenness as measured by satellite sensors over the last decade. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 19, p. 1-6 (L19105), 2011.
- ATZBERGER, C.; EILERS, P. H. C. A time series for monitoring vegetation activity and phenology at 10-daily time steps covering large parts of South America. **International Journal of Digital Earth**, v. 4, n. 5, p. 365-386, 2011.
- BAPTISTA, V. A.; OLIVEIRA, S. M.; LEAL-ZANCHET, A. M. Inventário de planárias terrestres (Platyhelminthes, Tricladida) em remanescente de Floresta Estacional Decidual do Sul do Brasil. **Biota Neotropica**, v. 10, n. 2, p.247-252, 2010.
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2003. 110p. ISBN (8570256876)
- BOARDMAN, J. W.; KRUSE, F. A.; GREEN, R. O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. In: JPL AIRBORNE EARTH SCIENCE

WORKSHOP, 5., 1995, Pasadena. **Summaries...** [S.1] JPL Publication. v. 1, p 23-26, 1995.

BOIASKI, N. T. **Variabilidade atmosférica intrassazonal na Península Antártica**. 2013. 136 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2013.

BORGES, E. F. **Discriminação das fitofisionomias de cerrado do oeste baiano por meio de dados multiangulares de sensoriamento remoto**. 2014. 136 p. Tese (Doutorado em Geociências aplicadas) - Instituto de Geociências/Universidade de Brasília (UNB), Brasília, 2014.

BORGES, E. F.; SANO, E. E.; MEDRADO, E. Radiometric quality and performance of TIMESAT for smoothing moderate resolution imaging spectroradiometer enhanced vegetation index time series from western Bahia State, Brazil. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 8, n. 1, p. 1-21 (083580), 2014.

BRADLEY, A. V.; GERARD, F. F.; BARBIER, N.; WEEDON, G. P.; ANDERSON, L. O.; HUNTINGFORD, C.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ZELAZOWSKI, P.; ARAI, E. Relationships between phenology, radiation and precipitation in the Amazon region. **Global Change Biology**, v. 17, n. 6, p. 2245-2260, 2011.

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, n. 1, p. 69-94, 1985.

BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. R. D.; GITELSON, A. A.; de 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.

BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. Directional effects on NDVI and LAI retrievals from MODIS: A case study in Brazil with soybean. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 1, p. 34-42, 2011.

BROWN, M. E.; BEURS, K. M.; MARSHALL, M. Global phenological response to climate change in crop areas using remote sensing vegetation, humidity, and temperature over 26 years. **Remote Sensing of Environment**, v. 126, p. 174-183, 2012.

BULFE, N. M. L. **Dinâmica de clareiras originadas de exploração seletiva de uma floresta estacional semidecidual na Província de Misiones, nordeste da Argentina**. 2008. 73 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2008.

CARVALHO JÚNIOR; O. A.; CARVALHO, A. P. F.; GUIMARÃES, R. F.; MENESES, P. R.; SHIMABUKURO, Y. E. Mistura espectral: (I) Detecção dos

membros finais utilizando a geometria do simplex. **Espaço & Geografia**, v. 6, n. 1, p. 147:173, 2003.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; BAPTISTA, G. M. M.; CARVALHO, A. P. F.; MADEIRA NETTO, J. S.; MENESES, P. R. Mineralogical differentiation in weathering profiles of lateritic Ni using AVIRIS data, in Niquelandia - GO, Brazil. In: JPL AIRBORNE EARTH SCIENCE WORKSHOP, 8, Pasadena, CA. **Summaries...**, JPL Publication 99-17. v. 1, p. 3-11, 1999.

CAPOZZOLI, C. R. **Estudo da variação temporal do fluxo de onda longa no Brasil utilizando análise de ondaletas**, 2011. Disponível em: <<http://professor.ufabc.edu.br/~leigui/disciplinas/grad/fenomenosondulatorios/programacao.html>> Acesso em: 20 Jan 2014.

CHEN, J.; SHEN, M.; ZHU, X.; TANG, Y. Indicator of flower status derived from in situ hyperspectral measurement in an alpine meadow on the Tibetan Plateau. **Ecological Indicators**. v. 9, n. 4, p. 818-823, 2009.

CHO, M. A.; DEBBA P.; MATHIEU R.; NAIDOO L.; VAN AARDT J.; G. P. ASNER. Improving discrimination of savanna tree species through a multiple-endmember spectral angle mapper approach: Canopy-level analysis. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 48, n. 11, p. 4133-4142, 2010.

CLARK, M. L.; AIDE, T. M.; GRAU, H. R.; RINER, G. A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data: A case study in the Dry Chaco ecoregion of South America. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 11, p. 2816-2832, 2010.

CLELAND, E. E.; CHUINE, I.; MENZEL, A.; MOONEY, H. A.; SCHWARTZ, M. D. Shifting plant phenology in response to global change. **Trends in Ecology and Evolution**. v. 22, n. 7, p. 357–365, 2007.

Climate Prediction Center/ National Oceanic and Atmospheric Administration (CPC/NOAA). **El Niño – Southern Oscillation (ENSO)**, 2014. Disponível em: <<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>>. Acesso em: 30 Jun 2014.

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). **El Niño e La Niña**, 2014. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/> Acesso em: 30 Jun 2014

CURTIS, J. T.; McINTOSH, R. P. An upland forest continuum in the prairie forest border region of Wisconsin. **Ecology**, v. 32, p. 476-496, 1951.

DENNISON, P. E.; ROBERTS, D. A. The effects of vegetation phenology on endmember selection and species mapping in southern California chaparral. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 2, p. 295-309, 2003.

DILLEN S.Y.; BEECK M. O.; HUFKENS K.; BUONANDUCI M.; PHILLIPS N.G. Seasonal patterns of foliar reflectance in relation to photosynthetic capacity and color index in two co-occurring tree species, *Quercus rubra* and *Betula papyrifera*. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 160, p. 60-68, 2012.

DU, J.; HE, Z.; YANG, J.; CHEN, L.; ZHU, X. Detecting the effects of climate change on canopy phenology in coniferous forests in semi-arid mountain regions of China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 17, p. 6490-6507, 2014.

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

DWYER, J.; SCHMIDT, G. The MODIS reprojection tool. In: QU, J. J.; GAO, W.; KAFATOS, M.; MURPHY, R. E.; SALOMONSON, V. V. **Earth Science Satellite Remote Sensing**, Berlin: Springer, 2006. cap. 13, p. 162-177.

FERRERA, T.S. **Fenologia de espécies arbóreas nativas no Jardim Botânico da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS**. 2012. 104 p. Dissertação (Mestrado em Agrobiologia) - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2012.

FRANCO, A.M.S. **Estrutura, diversidade e aspectos ecológicos do componente arbustivo e arbóreo em uma floresta estacional, Parque Estadual do Turvo, Sul do Brasil**. Tese (Doutorado em Ciências: Botânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2008.

GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. R.; ROBERTS, D. A.; BREUNIG, F. M.; TOOMEY, M.; MOURA, Y. M. On intra-annual EVI variability in the dry season of tropical forest: A case study with MODIS and hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 9, p. 2350-2359, 2011.

GALVÃO, L. S.; PIZARRO, M. A.; EPIPHANIO, J. C. N. Variations in reflectance of tropical soils: spectral-chemical composition relationships from AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 75, p. 245-255, 2001.

GANGULY, S.; FRIEDL, M. A.; TAN, B.; ZHANG, X.; VERMA, M. Land surface phenology from MODIS: Characterization of the Collection 5 global land cover dynamics product. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 8, p. 1805-1816, 2010.

GREEN, A. A.; BERMAN, M.; SWITZER, P., CRAIG, M. D. A transformation for ordering multispectral data in terms of images quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 1, p. 65-74. 1988.

GUADAGNIN, D.L. **Zonificación del Parque Estadual do Turvo, RS, Brasil, y directivas para el plan de manejo**. 1994. 49 p. Dissertação (Mestrado em Manejo da Vida Silvestre) - Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, 1994.

GUTIERREZ, C. E. C. **Eliminação do ruído por encolhimento de wavelets: uma aplicação à série de preço spot de energia elétrica do Brasil**. 2002. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUCRIO), Rio de Janeiro, 2002.

HESKETH, M.; SANCHEZ-AZOFEIFA G. A. The effect of seasonal spectral variation on species classification in the Panamanian tropical forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 118, p. 73-82, 2012.

HIRD, J.; MCDERMID, G. J. Noise reduction of NDVI time-series: An empirical comparison of selected techniques. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 1, p. 248-258, 2009.

HMIMINA, G.; DUFRENE, E.; PONTAILLER, J. Y.; DELPIERRE, N.; AUBINET, M.; CAQUET, B.; GRANDCOURT, A.; BURBAN, B.; FLECHARD, C.; GRANIER, A.; GROSS, P.; HEINESCH, B.; LONGDOZ, B.; MOUREAUX, C.; OURCIVAL, J. M.; RAMBAL, S.; SAINT ANDRE, L.; SOUDANI, K. Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 132, p. 145-158, 2013.

HOLBEN, B. N.; JUSTICE, C. O. The topographic effect on spectral response from nadir-pointing sensors. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 46, n. 9, p. 1191-1200, 1980.

HUETE, A. R.; KIM, Y.; RATANA, P.; DIDAN, K.; SHIMABUKURO, Y. E.; MIURA, T. Assessment of phenologic variability in Amazon tropical rainforests using hyperspectral Hyperion and MODIS satellite data. In: KALACSKA, M.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G.A. (Ed.). **Hyperspectral remote sensing of tropical and sub-tropical forests**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008. cap. 11, 320 p. ISBN (978-1-4200-5341-8)

HUETE, A.R.; DIDAN, K.; SHIMABUKURO, Y.E.; RATANA, P.; SALESKA, S.R.; HUTYRA, L.R.; YANG, W.; NEMANI, R.R.; MYNENI, R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical Research Letters**. v. 33, p. 1-4 (L06405), 2006.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa exploratório de solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro, 2002. Mapa escala 1:1.000.000. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/sistematizacao/sist_doc6.shtm> Acesso em: 20 Jan 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico da vegetação brasileira: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2ª ed., 2012, 275p.

ISAACSON, B.; SERBIN, S. P.; TOWNSEND, P. A. Detection of relative differences in phenology of forest species using Landsat and MODIS. **Landscape Ecology**, v. 27, n. 4, p. 529-543, 2012.

ITT Visual Information Solutions. **ENVI user's guide**, version 4.8, 2014.

ITT Visual Information Solutions. **IDL wavelet toolkit user's guide - wavelet version 7.1**. 2009.114p.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 8, p. 1824-1832, 2002.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT - a program for analysing time-series of satellite sensor data. **Computers and Geosciences**, v. 30, p. 833-845, 2004.

JÖNSSON, A. M.; EKLUNDH, L.; HELLSTRÖM, M.; BÄRRING, L.; JÖNSSON, P. Annual changes in MODIS vegetation indices of Swedish coniferous forests in relation to snow dynamics and tree phenology. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 2719-2730, 2010.

JÖNSSON, P. EKLUNDH, L. **TIMESAT 3.1 - software manual**. Lund: Lund University, 2012, 82 p. Disponível em:
<<http://www.nateko.lu.se/TIMESAT/timesat.asp>> Acesso em: 15 sep. 2014.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D. P.; MORISETTE, J. T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 3-15, 2002.

JUSTICE, C O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, P. D; HALL, D.K.; SALOMONSON, V.; PRIVETTE, J.L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R. B; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; WAN, Z.; HUETE, A. R.; LEEUWEN, W. V.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J. P; LEWIS, P.; BARNSLEY, M. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228-1247, 1998.

KNYAZIKHIN, Y.; GLASSY, J.; PRIVETTE, J. L.; TIAN, Y.; LOTSCH, A.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; MORISETTE, J. T.; VOTAVA, P.; MYNENI, R. B.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. **MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15) Algorithm Theoretical Basis Document**. Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center, 1999. 126 p. Disponível em:
<http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod15.pdf> Acesso em: 30 out 2014.

KÖNIG, F. G.; SCHUMACHER, M. V.; BRUN, E. J.; SELING, I. Avaliação da sazonalidade da produção de serapilheira numa floresta Estacional Decidual no município de Santa Maria-RS. **Revista Árvore**, v. 26, n. 4, p. 429-435, 2002.

KUPLICH, T. M.; MOREIRA, A.; FONTANA, D. C. Time series of vegetation index for different vegetation types in Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 17, p. 1116-1123, 2013.

LAU, K.-M.; WENG, H. Climate signal detection using wavelets transform: How to make a time series sing. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 76, n. 12, p. 2391-2402, 1995.

LIMA P. C. Wavelets: uma introdução. **Revista Matemática Universitária**, n. 33, p. 13-44, 2002.

LYAPUSTIN, A. I.; WANG, Y.; LASZLO, I.; HILKER, T.; HALL, F. G.; SELLERS, P. J.; TUCKER, C. J.; KORKIN, S. V. Multi-angle implementation of atmospheric correction for MODIS (MAIAC): 3. Atmospheric correction. **Remote Sensing of Environment**, v. 127, p. 385-393, 2012.

MAGURRAN, A. **Ecological diversity and its measurement**. Princeton: Princeton University Press, 1988. 179 p. ISBN (9780691084916).

MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. **Noções de probabilidade e estatística**. 6. ed. São Paulo, SP: USP. Instituto de Matemática e Estatística, 2004. 392 p. (Acadêmica 40). ISBN (85-314-0677-3).

MALDONADO, F. D. **Análise por componentes principais (ACP) na caracterização da dinâmica do uso da terra em área do semi-árido brasileiro**: Quixaba-PE. 1999. 134 p. (INPE-7180-TDI/680). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1999.

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**, v. 7, p. 2636-2651, 2007.

MELAAS, E. K.; FRIEDL, M. A.; ZHU, Z. Detecting interannual variation in deciduous broadleaf forest phenology using Landsat TM/ETM+ data. **Remote Sensing of Environment**, v. 132, p. 176-185, 2013.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206 p. ISBN (978-85-86238-54-3)

MENZEL, A. Phenology: its importance to the global change community - an editorial comment. **Climatic Change**, v. 54, p. 379-385, 2002.

MODE, E. B. **Elements of statistics**. 3. ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1961. 3191407. (Prentice-Hall Mathematics Series).

MOURA, Y. M. **Influência da geometria de aquisição de dados sobre o EVI na estação seca em floresta tropical utilizando dados MISR/TERRA**. 2012. 115 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.09.13.23-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012.

MOURA, Y.M.; GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. R.; ROBERTS, D.A.; BREUNIG, F.M. Use of MISR/Terra data to study intra- and inter-annual EVI variations in

the dry season of tropical forest. **Remote Sensing of Environment**. v. 127, p. 260–270, 2012.

MOURA, Y. M.; ARAI, E.; SHIMABUKURO, Y. E.; SANTOS, J. R.; FISCH, G. F.; NOVAES JUNIOR, R. A.; SOUZA, A. A. Aplicação do MLME em imagens MODIS para o estudo do comportamento de fitofisionomias da Floresta Atlântica e sua relação com a variabilidade pluviométrica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 2847-2854. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. (INPE- 15951-PRE/10561). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.10.18>>. Acesso em: 13 nov. 2014.

MOREIRA, E. P. **Correção radiométrica do efeito de iluminação solar induzido pela topografia**. 2014. 112 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2014/01.10.18.00-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014.

MOREIRA; E. P.; VALERIANO, M. M. Application and evaluation of topographic correction methods to improve land cover mapping using object-based classification. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 32, p. 208-217, 2014.

MORTON, D.C.; NAGOL, J.; CARABAJAL, C.C.; ROSETTE, J.; PALACE, M.; COOK, B.D.; VERMOTE, E.F.; HARDING, D.J.; NORTH, P.R.J. Amazon forests maintain consistent canopy structure and greenness during the dry season. **Nature**. v. 506, p. 221-224, 2014.

MUELLER-DOMBOIS, D.; ELLENBERG, H. **Aims and methods of vegetation ecology**. Wiley: New York, 1974. 547 p.

MYNENI, R. B.; HOFFMAN, S.; KNYAZIKHIN, Y.; PRIVETTE, J. L.; GLASSY, J.; TIAN, Y.; WANG, Y.; SONG, X.; ZHANG, Y.; SMITH, G. R.; LOTSCH, A.; FRIEDL, M.; MORISETTE, J. T.; VOTAVA, P.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 214-231, 2002.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)**, 2014. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov>> Acesso em: 20 Jan. 2014.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro, RJ Guanabara, 1983. 434 p.

PAÑUELAS, J.; FILELLA, I. Response to a warming world. **Science**, v. 294: p. 793-795, 2001.

PETERS, W. S.; SUMMERS, G. W. **Análise estatística e processo decisório** Rio de Janeiro, RJ: FGV, 1973. 683p.

PETTORELLI, N.; VIK, J. O.; MYSTERUD, A.; GAILLARD, J-M.; TUCKER, C. J.; STENSETH, N C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological

responses to environmental change. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 20, n. 9, p. 503-510, 2005.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos, SP: Parentese, 2007. 135 p. ISBN (978-85-60507-02-3)

PROY, C.; TANRÉ, D.; DESCHAMPS P.Y. Evaluation of topographic effects in remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**. v. 30, n. 1, p. 21–32, 1989.

RATHCKE, B.; LACEY, E. P. Phenological patterns of terrestrial plants. **Annual Review of Ecology**, v. 16, p. 179-214, 1985.

RICHARDSON, A. D.; HOLLINGER, D. Y.; DAIL, D. B.; LEE, J. T.; MUNGER, J. W.; O'KEEFE, J. Influence of spring phenology on seasonal and annual carbon balance in two contrasting New England forests. **Tree Physiology**, v. 29, n. 3, p. 321-331, 2009.

ROBERTS, D. A.; GREEN, R. O.; ADAMS, J. B. Temporal and spatial patterns in vegetation and atmospheric properties from AVIRIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, n. 3, p. 223-240, 1997.

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

ROUSE, J. W., R. H. HAAS, J. A. SCHELL, AND D. W. DEERING Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Third ERTS Symposium. **Proceedings...** Greenbelt: NASA SP-351, 1973. p. 309-317.

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.

SALESKA, S. R.; DIDAN, K.; HUETE, A. R.; ROCHA, H. R. Amazon forests green-up during 2005 drought. **Science**, v. 318, n. 5850, p. 612, 2007.

SAMANTA, A.; GANGULY, S.; HASHIMOTO, H.; DEVADIGA, S.; VERMOTE, E.; KNYAZIKHIN, Y.; NEMAMI, R.R.; MYNENI, R.B. Amazon forests did not green-up during the 2005 drought. **Geophysical Research Letters**, v. 37, p. 1-5 (L05401), 2010.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing: models and methods for image processing**. 3. ed. San Diego, CA: Academic, 2007. ISBN (978-0-12-369407-2).

SCHUMACHER, M. V.; TRÜBY, P.; MARAFIGA, J. S.; VIERA, M.; SZYMCZAK, D. A. Espécies predominantes na deposição de serapilheira em fragmento de Floresta Estacional Subtropical no Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 479-486, 2011.

SELLERS, W. D. **Physical climatology**. Chicago: University of Chicago Press, 1965. 272p. ISBN: (978-0226746999).

SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (SEMA). **Plano de manejo do Parque Estadual do Turvo**. Porto Alegre: Divisão de Unidades de Conservação do Estado do Rio Grande do Sul, 2005. 356 p.

SLATER, P. N. **Remote sensing**: optics and optical systems. Reading, MA: Addison-Wesley, 1980. 575p.

SILVA, D. F.; SOUSA, F. A. S.; KAYANO, M. T. Escalas temporais da variabilidade pluviométrica na bacia hidrográfica do Rio Mundaú. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 324-332, 2010.

SILVA, F. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; PEREIRA, G.; CARDOZO, F.; ARAI, E. Large-scale heterogeneity of Amazonian phenology revealed from 26-year long AVHRR/NDVI time-series. **Environmental Research Letters**, v. 8, p. 024011-024011, 2013.

SIMS, D.A.; RAHMAN, A.F.; VERMOTE, E.F.; JIANG, Z. Seasonal and inter-annual variation in view angle effect effects on MODIS vegetation indices at three forest sites. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 3112-3120, 2011.

SOUDANI, K.; HMIMINA, G.; DELPIERRE, N.; PONTAILLER, J. Y.; AUBINET, M.; BONAL, D.; CAQUET, B.; GRANDCOURT, A.; BURBAN, B.; FLECHARD, C.; GUYON, D.; GRANIER, A.; GROSS, P.; HEINESH, B.; LONGDOZ, B.; LOUSTAU, D.; MOUREAUX, C.; OURCIVAL, J. M.; RAMBAL, S.; SAINT ANDRÉ, L.; DUFRÊNE, E. Ground-based Network of NDVI measurements for tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biomes. **Remote Sensing of Environment**, v. 123, p. 234-245, 2012.

STARCK, J. I.; MURTAGH, F.; BIJAOU, A. **Image processing and data analysis**: the multiscale approach. Cambridge, UK: Cambridge University, 2000. 287 p. ISBN (0-521-59914-8).

STEVENSON, W. J. **Estatística aplicada à administração**. São Paulo, SP: Harbra, 2001. 495 p. ISBN (85-294-0092-5).

TAN, B.; MORISETTE, J. T.; WOLFE, R. E.; GAO, F.; EDERER, G. A.; NIGHTINGALE, J.; PEDELTY, J. A. An enhanced TIMESAT algorithm for estimating vegetation phenology metrics from MODIS data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 4, n. 2, p. 361-371, 2011.

TAN, B.; HU, J.; HUANG, D.; YANG, W.; ZHANG, P.; SHABANOV, N. V.; KNYAZIKHIN, Y.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. Assessment of the broadleaf crops leaf area index product from the Terra MODIS instrument. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 135, p. 124-134, 2005.

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

TORRENCE, C.; COMPO G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 1, p. 61-78, 1998.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Land processes distributed active archive center**: MODIS data products, 2014. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table> Acesso em: 20 Jan de 2014.

VACCARO, S.; LONGHI, S. J.; BRENA, D. A. Aspectos da composição florística e categorias sucessionais do estrato arbóreo de três subseres de uma floresta Estacional Decidual, no município de Santa Tereza - RS. **Ciência Florestal**, v. 9, p. 1-18, 1999.

VALERIANO, M. M. Cálculo do fator topográfico de iluminação solar para modelagem ecofisiológica a partir do processamento de Modelos Digitais de Elevação (MDE). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 5933-5940. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW/39ULK4H>>. Acesso em: 05 dez. 2014.

VELOSO, H.P.; RANGEL FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A.; **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991. 124 p.

VERBESSELT, J.; HYNDMAN, R.; ZEILEIS, A.; CULVENOR, D. Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time-series. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 12, p. 2970-2980, 2010.

VIALI, L. **Padronização ou será que estou ficando fora da casinha?**. In: Página acadêmico/didático do prof. Lorí Viali (on-line). Rio Grande do Sul, 2000-2013. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/famat/viali/>> Acesso em: 10 Fev 2014.

VITORINO, M. I. **Análise das oscilações intrasazonais sobre a América do Sul e oceanos adjacentes utilizando a análise de ondeletas**. 2002. 344 p. (INPE-9822-TDI/865). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/07.14.08.57>>. Acesso em: 08 Jan. 2014.

VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V.; TRÜBY, P.; VUADEN, E. Avaliação da devolução de serapilheira em uma floresta Estacional Decidual em Itaara, RS, Brasil. **Ciência Florestal**, v. 17, n. 3, p. 187-196, 2007.

WALTHER, G.; POST, E.; CONVEY P.; MENZEL, A.; PARMESAN, C.; BEEBEE T. J. C.; ROMENTIN, J.; HOEGH-GULDBERGI, O.; BAIRLEIN, F. Ecological responses to recent climate change. **Nature**, v. 416, p. 389-395, 2002.

WANG, Q.; TENHUNEN, J.; DINH, N. Q.; REICHSTEIN, M.; OTIENO, D.; GRANIER, A.; PILEGARRD, K. Evaluation of seasonal variation of MODIS derived leaf area index at two European deciduous broadleaf forest sites. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, n. 3-4, p. 575-484, 2005.

WENG, H.; LAU, K-M. Wavelets, period doubling, and time-frequency localization with application to organization of convection over the Tropical Western Pacific. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 51, n. 17, p. 2523-2541, 1994.

WILSON, K. B.; BALDOCCHI, D. D.; HANSON, P. J. Leaf age affects the seasonal pattern of photosynthetic capacity and net ecosystem exchange of carbon in a deciduous forest. **Plant, Cell and Environment**, v. 24, p. 571-583, 2001.

WALFORD, N. **Practical statistics for geographers and earth scientists**. Chichester, UK: John Wiley, 2011. 416 p. ISBN (978-0-470-84915-6)

WORLD CLIMATE. **Irai, Brazil**: climate, global warming, and daylight charts and data. 2014. Disponível em: <http://www.climate-charts.com/> Acesso em: 20 Jan. 2014.

XIAO, X.; M., HAGEN, S.; ZHANG, Q.; KELLER, M.; MOORE. B. Detecting leaf phenology of seasonally moist tropical forests in South America with multi-temporal MODIS images. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, n. 4, p. 465-473, 2006.

YANG, W.; HUANG, D.; TAN, B.; STROEVE, J. C.; SHABANOV, N. V.; KNYAZIKHIN, Y.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. Analysis of leaf area index and fraction of PAR absorbed by vegetation products from the Terra MODIS sensor: 2000-2005. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 7, p. 1829-1842, 2006.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H.; HODGE, 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.

ZHU, Z.; BI, J.; PAN, Y.; GANGULY, S.; ANAV, A.; XU, L.; SAMANTA, A.; PIAO, S.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. Global Data Sets of Vegetation Leaf Area Index (LAI)3g and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR)3g Derived from Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI3g) for the Period 1981 to 2011. **Remote Sensing**, v. 5, n. 2, p. 927-948, 2013.

APÊNDICE A – PIXEL RELIABILITY ANOS 2011 E 2012

Tabela A.1 – Percentual de *Pixel Reliability* para os anos 2011 e 2012

Ano	Dia do Ano	Pixel Reliability				
		-1	0	1	2	3
2011	1	0	100	0	0	0
	17	0	100	0	0	0
	33	0	100	0	0	0
	49	0	100	0	0	0
	65	0	100	0	0	0
	81	0	100	0	0	0
	97	0	100	0	0	0
	113	0	100	0	0	0
	129	0	100	0	0	0
	145	0	100	0	0	0
	161	0	100	0	0	0
	177	0	65.0	29.6	0.6	4.7
	193	0	100	0	0	0
	209	0	100	0	0	0
	225	0	0	100	0	0
	241	0	100	0	0	0
	257	0	100	0	0	0
	273	0	100	0	0	0
	289	0	100	0	0	0
	305	0	100	0	0	0
321	0	100	0	0	0	
337	0	100	0	0	0	
353	0	100	0	0	0	
2012	1	0	100	0	0	0
	17	0	100	0	0	0
	33	0	100	0	0	0
	49	0	100	0	0	0
	65	0	100	0	0	0
	81	0	100	0	0	0
	97	0	100	0	0	0
	113	0	100	0	0	0
	129	0	100	0	0	0
	145	0	99.1	0.9	0	0
	161	0	85.5	14.5	0	0
	177	0	100	0	0	0

Tabela A. 1 - Conclusão

193	0	100	0	0	0
209	0	100	0	0	0
225	0	100	0	0	0
241	0	100	0	0	0
257	0	100	0	0	0
273	0	100	0	0	0
289	0	100	0	0	0
305	0	100	0	0	0
321	0	100	0	0	0
337	0	100	0	0	0
353	0	100	0	0	0