



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.09.13.23-TDI

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO DE
DADOS SOBRE O EVI NA ESTAÇÃO SECA EM
FLORESTA TROPICAL USANDO DADOS
MISR/TERRA**

Yhasmin Mendes de Moura

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Lênio Soares Galvão, e João Roberto dos Santos, aprovada em 08 de fevereiro de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BG57SE>>

INPE
São José dos Campos
2012

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

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

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

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

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

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (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)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.09.13.23-TDI

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO DE
DADOS SOBRE O EVI NA ESTAÇÃO SECA EM
FLORESTA TROPICAL USANDO DADOS
MISR/TERRA**

Yhasmin Mendes de Moura

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Lênio Soares Galvão, e João Roberto dos Santos, aprovada em 08 de fevereiro de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BG57SE>>

INPE
São José dos Campos
2012

M865i Moura, Yhasmin Mendes de.
Influência da geometria de aquisição de dados sobre o
EVI na estação seca em floresta tropical usando dados
MISR/TERRA / Yhasmin Mendes de Moura. – São José dos Cam-
pos : INPE, 2012.

xxii + 93 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.09.13.23-TDI)

Dissertação (Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de
Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

Orientadores : Drs. Lênio Soares Galvão, e João Roberto dos
Santos.

1. efeitos de iluminação e visada. 2. Índice de Vegetação Me-
lhorada (EVI). 3. MISR. 4. secas severas. I.Título.

CDU 528.8.04(817.2)

Copyright © 2012 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2012 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

Sensoriamento Remoto

Dr. Flávio Jorge Ponzoni



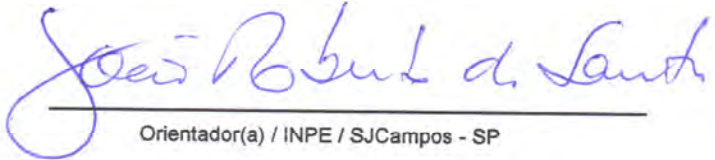
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Lênio Soares Galvão



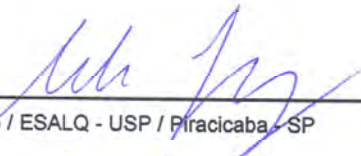
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. João Roberto dos Santos



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Sílvio Frosini de Barros Ferraz



Convidado(a) / ESALQ - USP / Piracicaba - SP

Dr. Edson Eyji Sano



Convidado(a) / EMBRAPA / Brasília - DF

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): Yhasmin Mendes de Moura

São José dos Campos, 08 de fevereiro de 2012

“Bem sei que tudo podes, Senhor, e nenhum dos teus planos pode ser frustrado”.

Jó 42:2

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos para realização da dissertação, auxílio financeiro nas campanhas de campo e pela participação em eventos científicos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela oportunidade de estágio durante o período da graduação, o qual certamente foi essencial para o meu crescimento profissional e como motivação para prosseguir na área acadêmica.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade de realizar o Mestrado, bem como pelo apoio em infraestrutura oferecido ao longo do curso.

Aos Drs. Lênio Soares Galvão e João Roberto dos Santos pela excelente orientação deste trabalho. As muitas discussões e troca de ideias foram fundamentais para o desenvolvimento da dissertação. A paciência frente às adversidades, e a confiança a mim atribuída foram, indiscutivelmente, os elementos propulsores desta dissertação.

Ao “*Langley Research Center Atmospheric Sciences Data Center*” (LARC) da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) pelo fornecimento das imagens do sensor MISR/TERRA (EOS-AM1).

Ao Grupo André Maggi, especialmente ao Engenheiro Wagner de Ré e ao Sr. José Ferreira Paixão (EMBRAPA Cerrados), por apoiar as atividades de campo.

Aos amigos da Divisão de Sensoriamento Remoto do Inpe: Egídio, Bete, Sueli, Gabriel, Fran, Kim, Coimbra, Rene, Ohara, Madalena, Adami, Fábio Breunig, Luciana, Flávia, Fernando, Gurgel, Cláudia, Valéria, Cristina, etc..., pelas conversas e incentivos ao longo desta jornada.

A todos os colegas e professores da pós-graduação pelo convívio e aprendizado compartilhados todo esse tempo.

RESUMO

Eventos recentes de secas severas na Amazônia têm recebido grande atenção na literatura, pois possuem efeitos no ciclo global do carbono e no funcionamento dos ecossistemas florestais, especialmente quando se considera os cenários de secas mais freqüentes e intensas devido às mudanças climáticas. Estudos baseados em dados de sensoriamento remoto, utilizando o índice *Enhanced Vegetation Index* (EVI) do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS/Terra), têm mostrado resultados controversos sobre a vulnerabilidade de florestas tropicais a estes eventos. O objetivo deste estudo é avaliar os efeitos da geometria de iluminação e de visada sobre a variabilidade intra- e inter-anual do EVI na estação seca (maio a setembro) de floresta tropical usando, de forma inédita para tal análise, dados adquiridos pelo sensor *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* (MISR/Terra). Uma série temporal de imagens MISR foi utilizada sobre a floresta estacional semidecidual na região do Parque Índigena do Xingu, incluindo dois anos de secas severas (2005 e 2010) e quatro anos não secos (2006 a 2009), com dados adquiridos em 4 bandas espectrais e 9 ângulos de visada. Para avaliação das variações intra-anuais, foram analisados os efeitos de visada e de direção de imageamento (retro-espalhamento e espalhamento frontal) a partir dos perfis espectro-angulares do EVI e da reflectância das bandas utilizadas na sua determinação. Efeitos de iluminação solar sobre o EVI foram avaliados a partir do comportamento do índice com a variação do ângulo zenital solar (AZS) do início (Maio) para o final (Setembro) da estação seca, fixando-se a câmera ao nadir. Além disso, um Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) também foi usado para este propósito. Para fins de comparação, o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) serviu como referência. Para análise das variações inter-anuais do EVI, foram avaliados os perfis dos valores médios de EVI para todos os anos em todo o período da estação seca, fixando-se a câmera ao nadir. Após esta etapa preliminar, foram calculadas diferenças entre as imagens MISR EVI ao nadir com o intuito de inspecionar variabilidades em pares de meses com datas próximas entre anos secos e não secos. Por fim, padronizou-se o EVI para cada um dos dois anos secos (2005 e 2010) em relação aos demais anos não secos (2006 a 2009). Os resultados mostraram que o EVI foi muito mais afetado pelo ângulo de visada e pela direção de imageamento que o NDVI, especialmente entre $\pm 45,6^\circ$. O EVI também apresentou alta correlação positiva com a reflectância da banda do infravermelho próximo (IVP) para todas as câmeras MISR. O EVI se mostrou fortemente relacionado com a variabilidade do AZS, devido ao aumento na reflectância do IVP com a diminuição do AZS (de 42° em julho a 28° em setembro). A alta correlação negativa entre a fração sombra e o EVI também confirmou os efeitos de iluminação solar sobre este índice. Na análise inter-anual não foram encontrados padrões distintos entre os perfis de EVI dos anos secos (2005 e 2010) e não secos (2006 a 2009). As diferenças das imagens MISR EVI entre os meses de anos secos e não secos mostraram padrão aleatório e dentro do desvio padrão médio calculado entre maio e setembro de 2005 e 2010 ($\pm 0,03$). A partir da padronização foi possível verificar que o EVI foi maior para a seca de 2005 ($0,349 \pm 0,839$) do que para o evento de 2010 ($0,041 \pm 0,754$). Devido às incertezas associadas aos dados, um simples procedimento de troca de trimestre no cálculo da padronização fez com que as médias se invertessem, sendo maior para 2010 ($0,430 \pm 0,844$) do que para 2005 ($0,005 \pm 0,821$). Em ambos os casos,

evidências de verdejamento ("*greening*") em larga escala não foram observadas na floresta estacional semidecidual do Parque Indígena do Xingu associado à ocorrência de secas severas nos anos de 2005 e 2010.

INFLUENCE OF DATA ACQUISITION GEOMETRY ON THE EVI IN THE DRY SEASON OF TROPICAL FOREST USING MISR/TERRA DATA

ABSTRACT

Recent events of severe droughts in the Amazon region have received great attention in the literature, because they have effects on global carbon cycle and on forest ecosystem functioning, especially when considering future scenarios of more frequent and severe droughts due to climate change. Studies based on remote sensing data, using the Enhanced Vegetation Index (EVI) from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS/Terra), have produced controversial results about the tropical forest resilience to these events. The goal of this study is to evaluate the effects of view and illumination geometry on intra- and inter-annual EVI variability in the dry season (May to September) of tropical forest, using an unprecedented data analysis based on the Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR/Terra). A time series of MISR images were used in Seasonal Semideciduous Forest of the Brazilian Xingu Indigenous Park, including two years of severe droughts (2005 and 2010) and four non-drought years (2006-2009), with data acquired in four spectral bands and nine view angles. To evaluate the intra-annual EVI variations, view zenith angles and view direction (forward scattering and backscattering) effects were analyzed from spectral-angular profiles of EVI and of reflectance of the bands used for its determination. Solar illumination effects on EVI were evaluated from the MISR nadir response of the index from the beginning (May) to the end (September) of the dry season with the change in solar zenith angle (SZA). Furthermore, Linear Spectral Mixture Models (MLME) were also used for this purpose. Only for reference, angular variations in the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) were inspected. For the analysis of the inter-annual EVI variations, we evaluated EVI profiles for all years and for the whole period of the dry season, using only the nadir camera. After this preliminary step, differences were calculated between the MISR EVI images at nadir in order to inspect variability for pairs of months in close dates between drought and non-drought years. Intra-annual EVI variations and solar illumination effects were evaluated from the response of the EVI from the beginning (May) to the end (September) of the dry season with the variation of solar zenith angle (SZA), fixing the nadir camera. From the Linear Spectral Mixture Model (MLME) was also analyzed the influence of solar illumination effects on the determination of the EVI. For comparison, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used as reference. For the analysis of inter-annual variations, EVI profiles for all years and for the whole period of the dry season were calculated, fixing the nadir camera. After this preliminary step, differences between the MISR EVI images at nadir were calculated in order to inspect variability for pairs of months in close dates between drought and non-drought years. Finally, the EVI was standardized for each of the two drought years (2005 and 2010) in relation to the remaining non-drought years (2006 to 2009). Results showed that EVI was much more affected by view angle and view direction than NDVI, especially between $\pm 45.6^\circ$. EVI was positively and highly correlated with the reflectance of the Near Infrared (NIR) band for all MISR cameras. It was closely related with changes in SZA due to the NIR reflectance increase with

decreasing SZA (from 42° in July to 28° in September). The strong negative correlation between the shade fraction and EVI confirmed solar illumination effects on the determination of this index. In the inter-annual EVI analysis, there were no distinct patterns between EVI profile of drought (2005 and 2010) and non-drought years (2006 to 2009). MISR EVI differences between the months of drought and non-drought years showed random results within the mean standard deviation calculated between May and September of 2005 and 2010 (± 0.03). Standardized EVI was higher for the 2005 drought (0.349 ± 0.839) than for the 2010 drought (0.041 ± 0.754). Due to uncertainties, a simple change in the quarter for standardization produced a reversal in results with higher standardized EVI for 2010 (0.430 ± 0.844) than for 2005 (0.005 ± 0.821). In both cases, there were no evidences of large scale greening in the Seasonal Semideciduous Forest of the Xingu Indigenous Park associated with the severe 2005 and 2010 droughts.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Curva espectral média típica de uma folha sadia.....	6
Figura 2.2 – (a) Anomalias de EVI na Amazônia associadas com a seca de 2005 reportadas por Saleska et al. (2007); (b) Redução destas anomalias publicadas por Samanta et al. (2010) com a transição das Coleções 4 para 5 do MODIS e das melhorias resultantes na filtragem de nuvens e correção para aerossóis.	10
Figura 2.3 – Variações da BRDF de um dossel em relação à posição Sol-Sensor.....	13
Figura 2.4 – Aquisição de dados pelo sensor MISR/Terra e o direcionamento das câmeras.	16
Figura 2.5 – Hierarquia dos níveis de processamento dos dados do sensor MISR. Em destaque, nível de processamento utilizado.....	17
Figura 2.6 – Estrutura dos blocos dos produtos derivados a partir dos dados do sensor MISR.	19
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia de trabalho.....	25
Figura 3.2 – Localização da área de estudo e mapa de vegetação correspondente.	27
Figura 3.3 – Precipitação acumulada mensal do sensor TRMM para os anos de 2005 a 2010 para a região do Parque Índigena do Xingu. Em destaque (sombreado nos gráficos), o período da estação seca para todos os anos.....	28
Figura 3.4 – Mapa das anomalias padronizadas de precipitação derivadas do TRMM durante a estação seca (julho a setembro) para as duas secas mais severas e extensas do século XXI na Amazônia. Em destaque, a região onde está localizado o PIX.	29
Figura 3.5 – Fotos ilustrativas da área florestal inventariada localizada na Fazenda Tanguro, Querência, MT.	30
Figura 3.6 – Composições coloridas da região de estudo (bandas 3, 4 e 1 do MISR em RGB), ilustrando a ocorrência de pixels de baixa qualidade (áreas em branco).	36
Figura 3.7 – Representação dos ângulos zenitais solares (AZS) e da geometria de visada das imagens MISR para a estação seca de 2005 (maio a setembro).....	37
Figura 4.1 – Curva espécie-área obtida através das parcelas amostrais inventariadas... 43	
Figura 4.2 – Frequência de indivíduos arbóreos por classes de valores médios de HT, DAP e área basal.....	45
Figura 4.3 – Parâmetros fitossociológicos das 10 famílias amostradas com maior Índice de Valor de Importância (IVI). DR, DoR, e FR correspondem, respectivamente, à densidade, dominância e frequência relativas.	46
Figura 4.4 – Distribuição diamétrica dos indivíduos arbóreos amostrados na área florestal da Fazenda Tanguro, Querência (MT).	47

Figura 4.5 – Dendrograma obtido a partir do índice de Morisita. Método de ligação: UPGMA.....	51
Figura 4.6 – Distribuição geográfica das parcelas amostrais na Fazenda Tanguro em Querência (MT).	52
Figura 4.7 – Distribuição diamétrica, valores médios de HT por classe de DAP estimados para cada parcela amostral.....	53
Figura 4.8 – Efeitos dos ângulos e da direção de visada nas médias e desvio padrão da reflectância nas bandas do azul, vermelho e infravermelho do MISR para a floresta estacional semidecidual do PIX para as datas de 12 de agosto de 2005 (a) e 10 agosto de 2010 (b).	58
Figura 4.9 – Efeitos dos ângulos e da direção de visada nas médias e desvio padrão dos índices EVI e NDVI do MISR para a floresta estacional semidecidual do PIX para as datas de 12 de agosto de 2005 (a) e 10 agosto de 2010 (b).	60
Figura 4.10 – Correlações entre o EVI e a reflectância da banda espectral do IVP para as datas de 12 de agosto de 2005 (a) e 10 de agosto de 2010 (b).	61
Figura 4.11 – Variações intra-anuais do EVI da floresta estacional semidecidual na região do PIX para cinco ângulos de visada do sensor MISR (Câmeras Bf, Af, Na, Aa e Ba) durante a estação seca de 2005.	63
Figura 4.12 – Efeitos intra-anuais da iluminação solar sobre os índices EVI e NDVI a partir da câmera ao nadir do sensor MISR na floresta estacional semidecidual na região do PIX.....	64
Figura 4.13 – Relação entre o EVI e a fração sombra, derivada do MLME, para duas imagens MISR ao nadir sobre a floresta estacional semidecidual na região do PIX, com diferentes configurações de AZS (julho e setembro de 2005).....	65
Figura 4.14 – Variabilidade inter-anual dos valores médios de EVI na floresta estacional semidecidual na região do PIX para dois anos de seca severa (2005 e 2010) e dois anos não secos (2006 e 2007). A parte sombreada refere-se ao trimestre julho, agosto e setembro.	67
Figura 4.15 – Porcentagem de pixels com diferenças positivas ou negativas de EVI para a floresta estacional semidecidual entre pares de meses para os anos de (a) 2005 (08 de maio; 25 de junho, julho 11, agosto 12, setembro 13) e 2006 (11 de maio; 28 de junho, julho 14, agosto 15, setembro 16) e (b) 2010 (23 de junho; 09 de julho; 10 de agosto) e 2006 (28 de junho, julho 14, agosto 15).	68
Figura 4.16 – Curvas gaussianas ajustadas para a distribuição dos dados EVI do sensor MISR ao nadir para os dois anos secos (2005 e 2010), padronizados em relação aos anos não secos (2006, 2007, 2008 e 2009). As variações inter-anuais foram calculadas para diferentes trimestres, onde (a) refere-se ao período de julho a setembro (JAS) e (b) de junho a agosto (JJA).	70

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Geometria de aquisição de dados pelas câmeras do sensor MISR/Terra. .	15
Tabela 3.1 – Número de pixels válidos (alta qualidade), dentre 500 pixels selecionados aleatoriamente, para as imagens MISR disponíveis nas estações secas dos anos de 2005 a 2010.	39
Tabela 3.2 – Datas utilizadas para calcular as diferenças de EVI das imagens MISR ao nadir.	41
Tabela 4.1 – Valores médios e desvio padrão dos parâmetros coletados no trecho florestal da Fazenda Tanguro em Querência (MT).	44
Tabela 4.2 – Parâmetros fitossociológicos das espécies arbóreas amostradas na área florestal da Fazenda Tanguro, Querência (MT), com o respectivo número de árvores (N), densidade absoluta (DA), densidade relativa (DR), dominância absoluta (DoA), dominância relativa (DoR), frequência absoluta (FA), frequência relativa (FR) e Índice de Valor de Importância relativo (IVI), por ordem alfabética de famílias.....	48
Tabela 4.3 – Número total de árvores de cada parcela amostral do inventário florestal, com o respectivo valor do índice de Shannon (H') e Equabilidade de Pielou (J).	50
Tabela 4.4 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) para o EVI e a reflectância das bandas utilizadas em seu cálculo (azul, vermelho e IVP) para todas as configurações de visada do sensor MISR na data 12 de agosto de 2005.	61

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ATIX = Associação Terra Indígena do Xingu
- AVHRR = Advanced Very High Resolution Radiometer
- AZS = Ângulo Zenital Solar
- BRDF = Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional
- CCD = Charge-Coupled Device
- DA = Densidade absoluta
- DAP = Diâmetro a Altura do Peito
- DoA = Dominância absoluta
- DoR = Dominância Relativa
- DR = Densidade Relativa
- EMBRAPA = Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- EO-1 = Earth Observing-One
- EOS-AM1 = “primeiro satélite da série EOS (Earth Observing System), que após lançamento em 1999 foi denominado TERRA”
- EVI = Enhanced Vegetation Index
- FA = Frequência absoluta
- FDP = Funções Densidade de Probabilidade
- FEMA = Fundação Estadual do Meio Ambiente
- FLONA = Floresta nacional
- fPAR = Fraction of Photosynthetically Active Radiation
- FR = Frequência Relativa
- FUNAI = Fundação Nacional do Índio
- GPS = Global Positioning System

HC = Altura Comercial

HDF = Hierarchical Data Format

HT = Altura Total

IAF = Índice de Área Foliar

IBAMA = Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE = Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ISA = Instituto Socioambiental

IVI = Índice de Valor de Importância

IVP = Infravermelho Próximo

JAS = Julho, Agosto e Setembro

JJA – Junho, Julho e Agosto

MISR = Multi-angle Imaging SpectroRadiometer

MLME = Modelo Linear de Mistura Espectral

MNF = Minimum Noise Fraction

MODIS = Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NASA = National Aeronautics and Space Administration

NDVI = Normalized Difference Vegetation Index

ONG = Organização não-governamental

PC = Principal Componente

PCA = Principal Components Analysis

PIX = Parque Indígena do Xingu

PPI = Pixel Purity Index

PRI = Photochemical Reflectance Index

SIVAM = Sistema de Vigilância da Amazônia

SOM = Space Oblique Mercator

TRMM = Tropical Rainfall Measuring Mission

UPGMA = Unweighted Pair Groups Method using Arithmetic Averages

UTM = Universal Transversal Mercator

WGS = World Geodetic System

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. HIPÓTESE DE TRABALHO	3
1.2. OBJETIVO GERAL	3
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1. Reflectância espectral da vegetação	5
2.2. Alguns estudos sobre os impactos da seca na Floresta Tropical.....	7
2.3. Influência da geometria de iluminação e de visada sobre a resposta espectral da vegetação	11
2.4. Sensor <i>Multi-angle Imaging SpectroRadiometer</i> (MISR).....	14
2.5. Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME)	19
2.6. Parque Indígena do Xingu (PIX)	22
3 METODOLOGIA DE TRABALHO.....	25
3.1 Seleção da área de estudo.....	26
3.2. Caracterização fisionômica e estrutural da vegetação	29
3.3. Pré-processamento e seleção dos produtos MISR/TERRA	35
3.4. Variações intra-anuais do EVI em Função da Geometria de Iluminação e de Visada	38
3.5. Variações Inter-anuais do EVI para as Secas Severas de 2005 e 2010.....	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1. Caracterização fisionômica estrutural da vegetação	43
4.2. Análise intra-anual das variações do EVI na estação seca.....	56
4.2.1. Efeitos da geometria de visada no EVI	56
4.2.2. Variações intra-anuais e efeitos de iluminação solar no EVI.....	62
4.3. Análise inter-anual das variações do EVI na estação seca.....	65
4.3.1. Variabilidade inter-anual do EVI entre anos secos (2005 e 2010) e não secos (2006 a 2009).....	65
4.3.2. Diferenças e padronização do EVI entre anos secos e não secos	67
5 CONCLUSÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEXO A.....	87

1 INTRODUÇÃO

Eventos de secas severas na Amazônia têm sido reportados recentemente na literatura, chamando a atenção para seus potenciais efeitos sobre o comportamento, a sensibilidade e a vulnerabilidade da Floresta Tropical. Ao contrário de um único evento extremo esperado a cada 10 anos na bacia amazônica, a região sofreu duas secas intensas na última década: uma em 2005 e outra em 2010 (MARENGO et al., 2011). Estes episódios de secas, cada vez mais severas e frequentes, compõem o cenário futuro previsto na Amazônia pela modelagem de mudanças climáticas globais (MALHI et al., 2009). Isto implica em uma nova compreensão dos mecanismos que controlam a dinâmica de florestas tropicais, associados à oferta de água, à produtividade primária e ao ciclo do carbono (C). Os efeitos de secas prolongadas conduzem a maior estresse hídrico, tendo também impactos na frequência e na severidade de incêndios florestais que alteram a composição de espécies ou biodiversidade (PHILLIPS et al., 2009).

Os sensores remotos orbitais atualmente disponíveis oferecem um extensivo e importante conjunto de dados para o entendimento destes efeitos, pois permitem ampla cobertura da superfície terrestre de forma sinóptica e periódica (ASNER et al., 2000). Entretanto, estudos de sensoriamento remoto relacionados à resposta da Floresta Amazônica para eventos de secas severas foram recentemente reportados, mas mostraram resultados contraditórios e polêmicos. Huete et al. (2006), com a utilização dos produtos do *Enhanced Vegetation Index* (EVI) do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS)/TERRA, observaram aumento intra-anual nos valores deste índice do início para o final da estação seca da floresta tropical Amazônica. Concordante com este estudo, Saleska et al. (2007) reportaram que a seca de 2005 produziu valores anômalos mais altos de EVI, quando comparados com anos de precipitação normal. O aparente verdejamento (*green-up*) da floresta tropical na seca severa de 2005 foi contestado por Samanta et al. (2010). Após reprocessarem os dados MODIS da Coleção 4 com um modelo de correção atmosférica mais elaborado e robusto (Coleção 5), eles não encontraram evidências de um verdejamento em larga escala na Floresta Amazônica causado pela seca de 2005. De fato, uma resposta única de EVI para as secas de 2005 e 2010 não foi obtida para floresta tropical. Em um

trabalho recentemente publicado por Xu et al. (2011) com dados MODIS, observou-se declínio de EVI (*browning*) da vegetação amazônica associado com a seca severa de 2010, de forma oposta ao verdejamento observado na seca de 2005 por Saleska et al. (2007).

As prováveis causas do aumento inesperado nos valores de EVI na Amazônia reportados por Huete et al. (2006) e por Saleska et al. (2005) foram discutidas por Asner e Alencar (2010). Elas incluem fatores como o possível aumento no desenvolvimento de novas folhas no topo do dossel (*leaf flushing*) ou mesmo modificações no Índice de Área Foliar (IAF) observadas por Myneni et al. (2007) usando o produto MODIS MOD15A2 (Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 1 km). Outros fatores também foram reportados por Anderson et al. (2010), relacionando o aumento do EVI à mudanças nos parâmetros estruturais da floresta causadas pela seca e pela mortalidade resultante de muitas árvores.

Mesmo as variações intra-anuais de EVI, que aumenta gradualmente do início para o final da estação seca na Amazônia (HUETE et al., 2006), não são completamente compreendidas. Embora relevantes para sensores com amplo campo de visada (*Field-of-View*) como o MODIS, os efeitos de iluminação e visada não têm recebido grande atenção no entendimento destas questões. Portanto, a influência da geometria de aquisição dos dados de sensoriamento remoto na interpretação dos índices de vegetação, que podem apresentar variações não necessariamente associadas à fenologia e/ou morfologia da floresta, não tem sido devidamente estudada em florestas tropicais.

Estudos recentes têm chamado a atenção para os efeitos de iluminação e de visada sobre a determinação de índices de vegetação (GALVÃO et al., 2011; SIMS et al., 2011). Brando et al. (2010) destacaram a importância de se considerar efeitos bidirecionais na análise inter-anual do EVI. Porém, mais estudos ainda são necessários para melhor entender o papel desempenhado pela geometria de iluminação e de visada nas variações intra-anuais e inter-anuais destes índices na estação seca de florestas tropicais. Índices como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e o EVI são muito utilizados

na modelagem de estimativas de carbono e de mudanças climáticas globais (HEINSCH et al., 2006; SIMS et al., 2008; XIAO et al., 2004, 2006).

O sensor multiangular *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* (MISR), que obtém medidas multiespectrais quase simultâneas em nove ângulos de visada, é um sensor com potencial único e inovador para tais estudos. Ao se calcular o EVI e o NDVI a partir de diferentes câmeras (ângulos de visada) posicionadas em direções opostas de imageamento (retro-espalhamento ou espalhamento frontal), a sensibilidade destes índices aos efeitos bidirecionais pode ser analisada sazonalmente (intra-anual). Ao se utilizar apenas a câmera do nadir, o impacto destes efeitos pode ser eliminado para uma melhor avaliação das variações inter-anuais do EVI na estação seca de florestas tropicais. Exemplos do uso deste sensor no Brasil para estudos de floresta tropical e de cerrado incluem os trabalhos de Xavier e Galvão (2005) e Liesenberg et al. (2007), respectivamente.

1.1. Hipótese de trabalho

O presente estudo é baseado na hipótese de que diferentes configurações associadas à geometria de aquisição de dados de sensoriamento remoto podem explicar parte da variabilidade intra-anual e inter-anual do EVI em florestas tropicais, reportada em trabalhos prévios por Huete et al. (2006) e Saleska et al. (2007). Estuda-se a possibilidade desta variabilidade no índice não estar necessariamente relacionadas com mudanças fisiológicas que tenham ocorrido na vegetação decorrente de processos severos ocasionados por secas intensas como as de 2005 e 2010.

1.2. Objetivo geral

Com base na hipótese estabelecida, o objetivo deste estudo é avaliar os efeitos da geometria de iluminação e de visada sobre a variabilidade intra-anual e inter-anual do EVI, usando de forma inédita para tal análise dados adquiridos pelo sensor MISR/TERRA em 4 bandas espectrais e 9 ângulos de visada no período de 2005 a 2010. Os dados foram obtidos durante a estação seca (maio a setembro) na região do Parque Indígena do Xingu (PIX). Como mencionado anteriormente, a série temporal

estudada é caracterizada pela ocorrência de duas secas severas (2005 e 2010), cujos valores de EVI podem ser comparados com os observados nos demais anos não-secos (2006 a 2009).

1.3. Objetivos específicos

a) Caracterizar fisionômico-estruturalmente um trecho de floresta estacional semidecidual localizada a sudeste do PIX, no município de Querência (MT), a partir de informações de campo. A análise de dados, no que tange a este objetivo específico, está inserido em um escopo maior de um projeto que aborda as relações entre parâmetros espectrais derivados do sensor Hyperion (EO-1) e os parâmetros florístico-estruturais coletados em campo.

b) Analisar variações intra-anuais introduzidas pela geometria de iluminação e de visada sobre a resposta espectral da vegetação do PIX, a partir da análise intra-anual dos perfis espectro-angulares das bandas e dos índices de vegetação EVI e NDVI calculados a partir das diferentes câmeras do sensor MISR;

c) Avaliar variações inter-anuais do índice de vegetação EVI, associadas com as secas severas de 2005 e 2010, em relação aos anos em que tais eventos não foram observados (2006 a 2009), utilizando apenas a câmera do nadir. O objetivo desta estratégia é eliminar a variabilidade introduzida pelos ângulos e direção (retro-espalhamento e espalhamento frontal) de visada sobre o cálculo do EVI.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Reflectância espectral da vegetação

As técnicas de sensoriamento remoto são baseadas na relação da radiação eletromagnética, do sensor e do alvo. A quantidade de energia captada pelo sensor irá depender fundamentalmente das características físicas, químicas ou biológicas dos alvos. Sendo assim, cada alvo na superfície terrestre possui comportamento espectral específico, o que nos permite a interpretação e a manipulação dos dados obtidos, bem como inferir sobre condições ambientais, estruturais e fisiológicas sobre os mesmos (JENSEN, 2007). No caso da vegetação, este processo de interação está relacionado com os fatores estruturais e fisiológicos, que correspondem, respectivamente, à forma de organização dos tecidos na estrutura interna foliar, e aos pigmentos fotossintetizantes e quantidade de água nas folhas, característicos de cada espécie vegetal. Segundo Ponzoni e Shimabukuro (2007), o estudo do comportamento espectral da vegetação consiste em analisar de maneira integrada os processos de absorção, transmissão e reflexão da radiação para cada faixa de comprimento de onda do espectro eletromagnético, em folhas isoladas ou em dosséis vegetais.

O principal componente que interage com a radiação na vegetação são as folhas. Desta forma, estas constituem elementos chave na interpretação de dados em todos os níveis de aquisição, desde os obtidos por instrumentos de laboratório e campo até os adquiridos por aeronaves e satélites. A Figura 2.1 mostra a reflectância média típica de uma folha verde sadia na região do espectro eletromagnético de 0,3 a 2,5 μm , onde se observam que os fatores estruturais e químicos, citados anteriormente, se comportam de maneira diferente de acordo com a região do espectro.

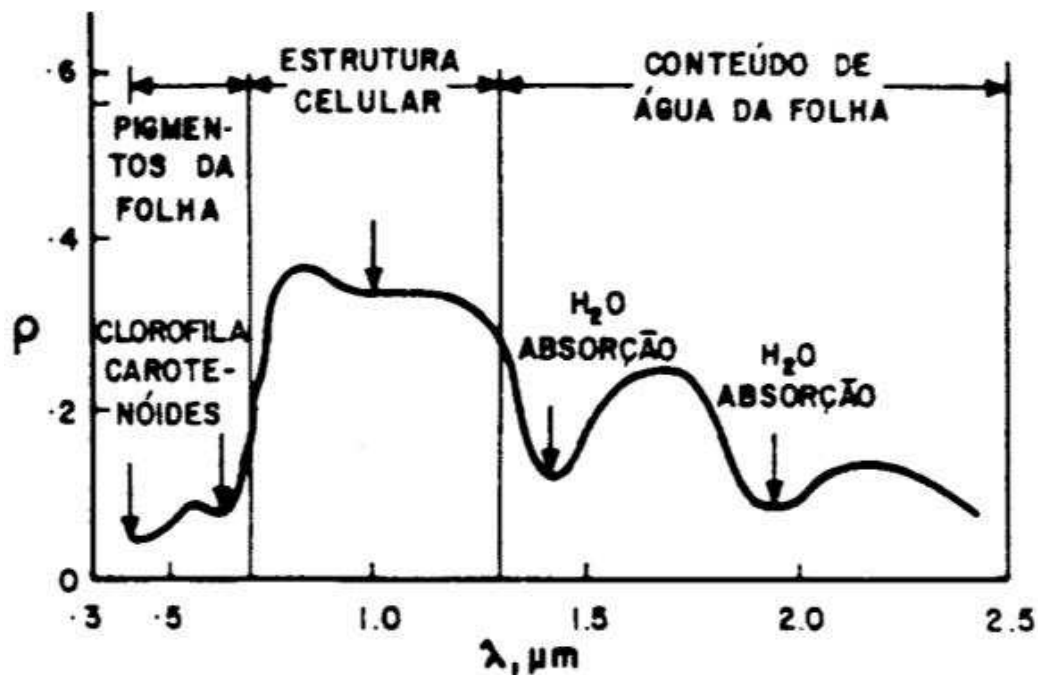


Figura 2.1 – Curva espectral média típica de uma folha sadia.

Fonte: Novo (1989).

A importância em se conhecer o comportamento espectral da vegetação tem sido cada vez mais reconhecida na maioria dos estudos, pois há necessidade em relacionar a reflectância das imagens de sensoriamento remoto às diferentes tipologias vegetais e seus parâmetros biofísicos e bioquímicos (SOUZA, 2009). Neste sentido, imagens de satélite podem prover uma gama de informações pertinentes ao conhecimento sobre a cobertura vegetal, desde que a natureza da alteração da radiação por parâmetros relacionados à geometria de aquisição das imagens, influências atmosféricas e fatores ambientais, possa ser entendida e especificada (GOEL, 1988).

Na Figura 2.1, verifica-se que, de acordo com a reflectância espectral da folha, pode-se dividir o espectro em três intervalos espectrais (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007; JENSEN, 2007): região do visível, do infravermelho próximo e do infravermelho médio.

A região do visível (0,4 a 0,7 μm) é caracterizada pelos pigmentos foliares (clorofilas, carotenos e xantofilas), que irão definir o espectro de reflectância nesta faixa do

espectro. Observa-se a absorção da luz violeta-azul e vermelha para realização da fotossíntese pela clorofila (Figura 2.1), sendo este pigmento o mais abundante e o responsável por controlar a resposta espectral das folhas nesta região do espectro. No estágio de senescência, a folha sofre com degradação da clorofila que é maior do que a dos outros pigmentos. Predomina a resposta dos pigmentos carotenóides e xantofilas, que absorvem na região do azul e refletem na região do verde e vermelho, implicando em uma mudança na coloração das folhas para um tom mais amarelado.

A região do infravermelho próximo (0,7 a 1,1 μm) está associada à estrutura interna das folhas. Nesta região ocorre uma pequena absorção da radiação e grande espalhamento. Essa é a região espectral mais utilizada nos estudos de vegetação por sensoriamento remoto, pois mudanças ambientais relacionadas a fatores externos, como por exemplo, a disponibilidade de água, interfere no comportamento espectral das folhas e podem ser detectadas a partir de alterações quantitativas da reflectância nesta região. A distribuição de espaços com ar e água, o arranjo, tamanho e forma da estrutura dos mesófilos nas folhas irão influenciar na interação da radiação, que de maneira geral, apresentam maior espalhamento em estruturas mais lacunosas, resultando em valores altos de reflectância.

Na região do infravermelho médio (1,1 a 3,2 μm), a curva espectral é caracterizada pelas bandas de absorção de água e por feições relacionadas aos constituintes celulose e lignina. A absorção da radiação nesta região é proporcional a quantidade de água nas folhas e ocorre entre 1,3 μm a 2,0 μm . Quanto maior a quantidade de água nas folhas, menor a reflectância. Desta forma, esta região é um indicativo de estresse hídrico na vegetação, o que acarreta a degradação de proteínas e dos pigmentos fotossintetizantes (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007). As feições de absorção da celulose e lignina estão localizadas entre 1,5 e 2,5 μm e são mais bem definidas em espectros de vegetação seca.

2.2. Alguns estudos sobre os impactos da seca na Floresta Tropical

Atualmente, tem sido registrado grande número de estudos que abordam a compreensão da dinâmica da Floresta Tropical à ação de eventos climáticos severos. É de conhecimento que estes eventos climáticos influenciam e têm impacto considerável no

funcionamento dos ecossistemas florestais, tanto no funcionamento da biosfera como na biodiversidade (MEIR et al., 2008; LOARIE et al., 2009; ASNER e ALENCAR, 2010).

Alguns estudos apontam para um aumento na frequência, extensão e severidade dos eventos de seca na Floresta Amazônica (MALHI et al., 2009), enquanto alguns autores discutem questões relacionadas com a variabilidade espacial e temporal da precipitação ao longo da bacia Amazônica (LI et al., 2008; ANDERSON et al., 2010; BRANDO et al., 2010). Grande parte das florestas encontradas na região Amazônica sofre com estiagens anuais que duram entre três a cinco meses com precipitação abaixo de 100 mm (MARENGO, 1992). Mesmo com o forte período de estiagem, as florestas se mantêm, devido à característica morfológica de possuírem raízes profundas, e desta forma, capturar água estocada nos lençóis freáticos. Porém, se o período sem precipitação for muito prolongado, como acontece durante o evento climático El Niño, a retenção de água em solos profundos também se compromete, não permitindo, desta forma, o abastecimento das florestas de forma adequada. Esta “falta” de água interfere na fisiologia vegetal, trazendo conseqüências para a dinâmica florestal como um todo. Dentre as conseqüências identificadas na Floresta Amazônica relacionadas à falta de precipitação está à diminuição do LAI (Índice de Área Foliar), da capacidade fotossintética, do conteúdo de água nas folhas, da grande perda de carbono devido ao aumento de áreas queimadas, como também da diminuição do acúmulo de biomassa acima do solo, causado pela mortalidade de árvores (NEPSTAD et al., 2002; ASNER et al., 2004; ARAGÃO et al., 2007; FISCHER et al., 2007; MEIER et al., 2008; PHILLIPS et al., 2009).

Dentre as muitas técnicas utilizadas para entendimento da dinâmica dos ecossistemas florestais tropicais, a utilização de índices de vegetação (p. ex. EVI e NDVI) se tornou a abordagem mais comum para avaliação da fenologia e dos efeitos associados às secas severas (ANDERSON et al., 2010). Porém, investigações baseadas no comportamento inter-annual de dados EVI (MODIS/Terra) têm apresentado resultados ainda contraditórios sobre a vulnerabilidade da floresta aos períodos secos (SALESKA et al., 2007; SAMANTA et al., 2010).

Saleska et al. (2007) afirmaram que a bacia Amazônica sofreu um verdejamento (*green-up*) durante um evento de seca severa que ocorreu em 2005 na região. A partir de produtos EVI do sensor MODIS/Terra, seu trabalho indicou a presença de áreas com anomalias positivas deste índice (altos valores de EVI na Figura 2.2a). Baseado nestas investigações, esses autores argumentaram que as florestas encontradas na bacia Amazônica podem ser mais resistentes do que até então se conhecia, e que, portanto, não haveria base para perdas de produtividade florestal ou de estocagens de carbono. Apesar destes resultados, estudos baseados em dados de campo indicaram que a seca de 2005 causou uma grande perda de carbono (em torno de 1,2 a 1,6 Pg de biomassa florestal) em um conjunto grande de parcelas distribuídas ao longo da bacia amazônica (PHILLIPS et al., 2009), o que contraria os resultados obtidos anteriormente por Saleska et al. (2007) com o sensor MODIS. Possíveis explicações para o inesperado “*green-up*” relatado por Saleska et al. (2007) foram revistas por Asner e Alencar (2010), como: crescimento de folhas novas no topo do dossel (*leaf flushing*); mudanças no índice de área foliar (IAF); modificações na estrutura do dossel associadas com a mortalidade de árvores; variabilidade da quantidade de água nas folhas; como também cobertura de nuvens e os efeitos dos aerossóis (Anderson et al., 2010; Samanta et al., 2010). Por outro lado, Samanta et al. (2010) reanalisando os dados MODIS EVI de 2005, reprocessados para uma correção atmosférica melhorada (transição da Coleção 4 para a Coleção 5 do MODIS com melhores filtragens para nuvens e aerossóis), observaram pouca evidências de um “*green-up*” na bacia Amazônica (Figura 2.2b).

Estes novos resultados para os dados de um mesmo sensor e série temporal de Saleska et al. (2007), porém com um processo de correção atmosférica mais robusto, indicam a fragilidade e os desafios inerentes ao uso somente de dados de satélite, sem sua devida associação com observações de campo.

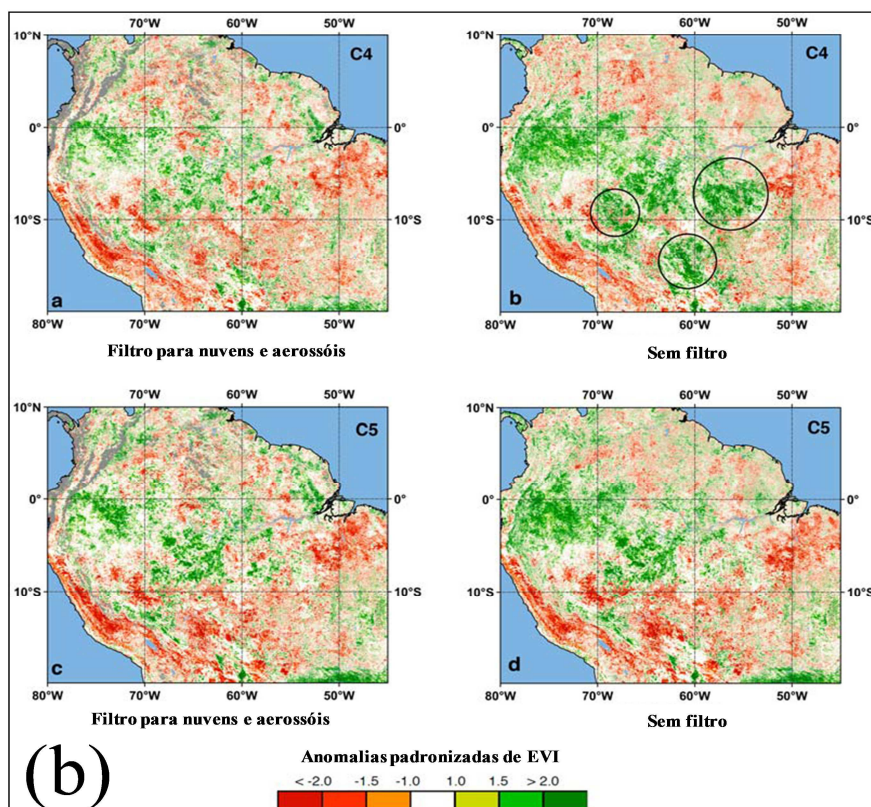
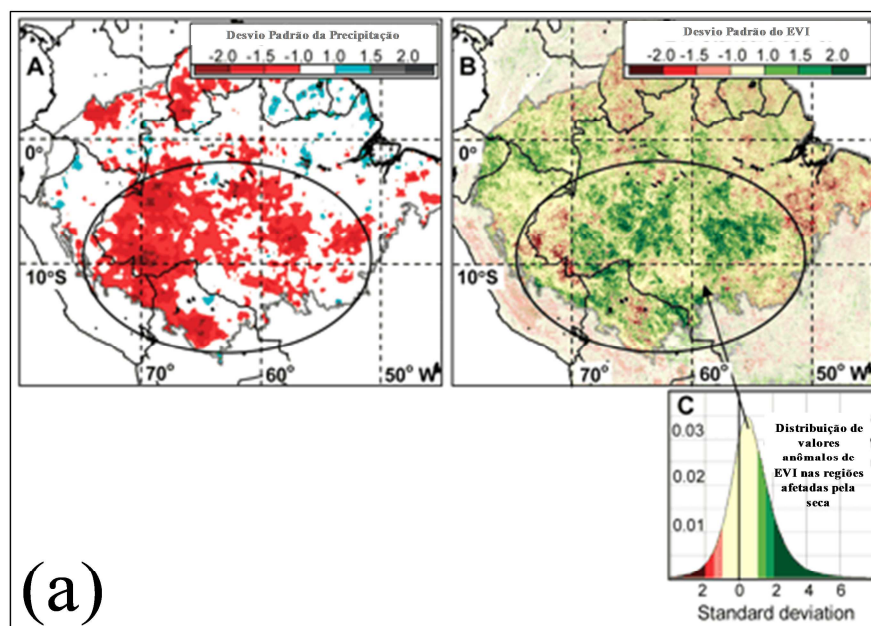


Figura 2.2 – (a) Anomalias de EVI na Amazônia associadas com a seca de 2005 reportadas por Saleska et al. (2007); (b) Redução destas anomalias publicadas por Samanta et al. (2010) com a transição das Coleções 4 para 5 do MODIS e das melhorias resultantes na filtragem de nuvens e correção para aerossóis.

Estudos recentes têm discutido a influência da geometria de aquisição dos dados e seus efeitos sobre o cálculo dos índices de vegetação (GALVÃO et al., 2011; SIMS et al., 2011; BANDHARI et al., 2011). Galvão et al. (2011), ao utilizar dados do MODIS e do Hyperion/Earth Observing One (EO-1), concluíram que a variabilidade intra-anual do EVI na floresta tropical foi impulsionada pelos efeitos de iluminação solar durante a estação seca, ao invés de mudanças no LAI. Em Sims et al. (2011), foi observado que um mesmo componente de cena pode ser observado sob diferentes ângulos de visada, de uma passagem para a outra do MODIS, podendo variar até 70°. Devido ao caráter anisotrópico da maioria dos alvos terrestres, esta variação angular pode causar mudanças espectrais que não estão necessariamente associadas a mudanças físicas na superfície. Neste estudo, em áreas de Floresta Ombrófila Densa e Florestas Deciduais dos Estados Unidos, Sims et al. (2011) observaram que o EVI foi significativamente afetado por variações angulares, tanto sazonalmente (intra-anual), quanto inter-anualmente, sugerindo, portanto, cuidado na utilização deste índice sem antes utilizar métodos de correção para os efeitos bidirecionais. Finalmente, Bandhari et al. (2011) demonstraram que efeitos de geometria de iluminação e visada prejudicam a capacidade dos índices de detectar as alterações na vegetação induzidas pelas variações fenológicas e outras perturbações.

2.3. Influência da geometria de iluminação e de visada sobre a resposta espectral da vegetação

A reflectância registrada por sensores remotos depende da configuração geométrica do sensor (visada) e do Sol (iluminação). Esta dependência é regida pela Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional (BRDF). Variações na geometria de aquisição de dados (iluminação e visada) interferem na quantidade de energia captada pelo sensor, devido ao fato de que muitos alvos na superfície terrestre apresentam variado grau de anisotropia (comportamento não-Lambertiano). Sensores com capacidade de imageamento multiangular possibilitam analisar a variabilidade da resposta espectral dos alvos em função da anisotropia de superfície, permitindo a extração de informações sobre a cobertura terrestre com mais precisão do que somente com informações ao nadir (ASNER et al., 1998; LIESENBERG, 2005).

Considerando a configuração geométrica Sol-sensor-alvo, o registro da radiação eletromagnética pelo sensor remoto estará condicionado a fatores associados à densidade e do arranjo dos objetos na superfície, às sombras determinadas pelos ângulos de iluminação e observação (θ_0j , e ϕ_0j) e às propriedades da reflectância, da transmitância e da absorvância dos alvos (LIESENBERG, 2005). No caso dos dosséis florestais, outros fatores, além da geometria de iluminação têm influência na BRDF, como a densidade da vegetação (LI e STRAHLER, 1992), atributos arquitetônicos, orientação das folhagens e sombras dentro do dossel (GOEL, 1988) e a rugosidade do solo para dosséis esparsos (JACQUEMOUND et al., 1992).

A Figura 2.3 demonstra como as diferentes configurações de visada influenciam no registro da radiação eletromagnética captada pelos sensores remotos. Nesta condição específica, pode-se observar na situação 1, em que o sensor e a fonte de iluminação estão alinhados, uma configuração geométrica de imageamento onde maiores proporções de dossel iluminados serão vistas pelo sensor. Desta maneira, a imagem gerada a partir desta configuração, conhecida como região preferencial do retro-espalhamento, apresentará maiores valores de reflectância quando comparadas com as imagens geradas nas situações 2 e 3. Na situação 2 (ao nadir) o sensor registrará proporções semelhantes de iluminação e sombra, e uma alta proporção do componente solo. No caso, a configuração da arquitetura do dossel e o índice de cobertura do solo irão determinar as propriedades espectrais medidas pelo sensor, modificando-se em função das características de cada paisagem. Na situação 3, condição descrita como espalhamento frontal, nota-se maiores proporções de sombra de dossel e solo vistas pelo sensor, o que resulta em uma diminuição nos valores de reflectância, sem necessariamente estar associado às características da paisagem, e sim ao arranjo geométrico sol-sensor.

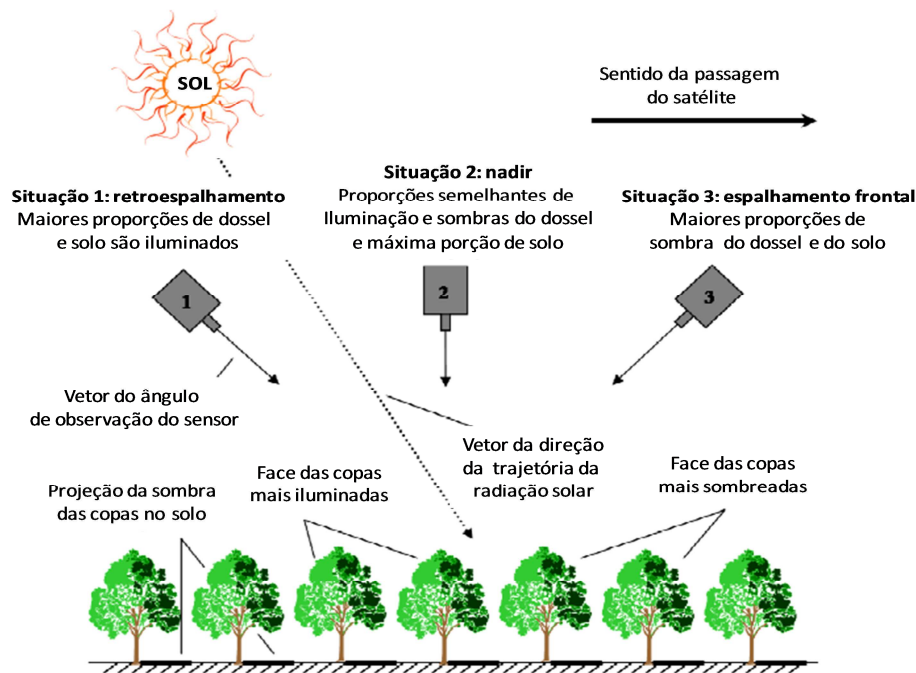


Figura 2.3 – Variações da BRDF de um dossel em relação à posição Sol-Sensor.

Fonte: adaptada de Liesenberg (2005).

Isto demonstra como o vetor de iluminação e a posição do sensor no momento de aquisição de dados pode introduzir variações na reflectância de superfície (BARNSELY et al., 1994). Desta forma, toda formulação matemática que envolva a manipulação de bandas espectrais pode conter erros que até então não eram levados em consideração (ASNER et al., 1998).

Em estudo realizado por Meyer et al. (1995), foram identificadas influências no ciclo sazonal global do NDVI em função das mudanças nos ângulos zenitais solar e de observação na trajetória do sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR). Estas influências podem interferir na interpretação dos dados, podendo afetar os valores dos índices de vegetação sem que mudanças estejam realmente ocorrendo na superfície. Em outro estudo realizado por Hall et al. (2008), foram observadas diferentes escalas de tempo sobre povoamentos florestais com o objetivo de verificar variações nos comprimentos de onda de 531 nm e 570 nm, utilizadas na determinação do índice de reflectância fotoquímica (*Photochemical Reflectance Index* -

PRI). Os resultados encontrados pelos autores demonstraram que o índice PRI pode ser influenciado pelas variações na geometria de iluminação devido à aquisição em escalas de tempo variadas. Isto ocorre devido à variação do sombreamento e iluminação nas folhas, interferindo nos valores de reflectância das bandas espectrais. Também foram apontados que mudanças na reflectância em 531 nm são mais fortes quando maiores proporções do dossel são observadas (efeito *hot spot*), do que quando apenas os elementos mais sombreados são vistos. Desta forma, os autores propõem a utilização de equipamentos que permitam a aquisição de dados multiangulares de forma simultânea para verificar de maneira mais adequada estas variações sub-horárias.

Em Mynemi e Ganapol (1991), índices de vegetação modelados por um único ângulo de observação não permitiram avaliar de forma adequada características estruturais do dossel, como densidade do dossel, distribuição angular das folhas e heterogeneidade da paisagem. Estes fatores se colocam como entraves na estimativa de variáveis como LAI e fPAR (*Fraction of Photosynthetically Active Radiation*). A utilização de dados multiangulares contribui para a melhoria destas estimativas. Desta forma, são evidentes que a disponibilidade de dados multiangulares e o desenvolvimento de novas metodologias podem melhorar as estimativas da produtividade e funcionamento dos ecossistemas, dos estoques e fluxos de carbono, bem como das alterações que ocorram nestes sistemas (WIDLÓWSKI et al., 2004).

2.4. Sensor *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* (MISR)

O *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* (MISR) é um dos instrumentos imageadores a bordo do satélite Terra (EOS-AM1) e faz parte do Sistema de Observação da Terra da NASA, lançado em dezembro de 1999. O MISR coleta dados multiangulares em nove câmeras, que variam de 70,5° na direção de retro-espalhamento até 70,5° na direção do espalhamento frontal. As imagens são adquiridas com um ângulo nominal relativo à superfície terrestre de 0; ±26.1°; ±45.6°; ±60.0°; e ±70.5° para as câmeras An, Af/Aa, Bf/Ba, Cf/Ca e Df/Da, respectivamente (Tabela 2.1). As faixas nominais das bandas espectrais são centradas em: 443, 555, 670 e 865nm, correspondendo às regiões

espectrais do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo (IVP), respectivamente (DINER et al., 1998).

Tabela 2.1 – Geometria de aquisição de dados pelas câmeras do sensor MISR/Terra.

Câmera	Sentido	Ângulo de Visada Nominal	Distância focal (mm)
Df	Retroespalhamento	70,5°	123,67
Cf	Retroespalhamento	60,0°	95,34
Bf	Retroespalhamento	45,6°	73,03
Af	Retroespalhamento	26,1°	58,9
An	Nadir	0°	58,94
Aa	Espalhamento Frontal	26,1°	59,03
Ba	Espalhamento Frontal	45,6°	73
Ca	Espalhamento Frontal	60,0°	95,33
Da	Espalhamento Frontal	70,5°	123,33

Fonte: adaptada de Diner et al. (1998).

As imagens geradas pelo sensor MISR têm como objetivo melhorar a compreensão sobre a superfície terrestre, meio ambiente, ecologia e clima. O entendimento detalhado de como a radiação é espalhada em diferentes configurações geométricas é necessário na determinação da distribuição, quantidade e tipos de nuvens, partículas suspensas na atmosfera que afetam o clima global, e da anisotropia dos alvos na superfície (DINER et al., 1998). Desta forma, o imageamento em nove direções diferentes do sensor MISR permite inferir sobre as variações angulares da reflexão da radiação e as características físicas observadas nas imagens. A Figura 2.4 reproduz o esquema de imageamento do sensor MISR/Terra.

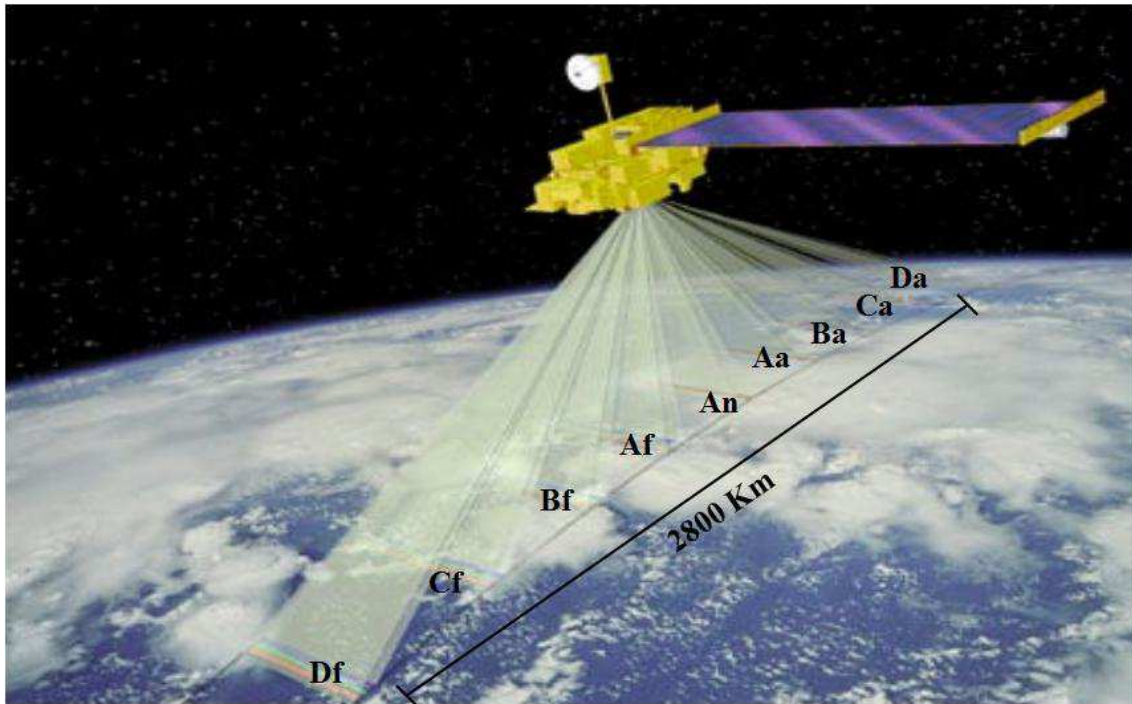


Figura 2.4 – Aquisição de dados pelo sensor MISR/Terra e o direcionamento das câmeras.

Fonte: adaptada de JPL (2011).

Este sensor fornece dados multiangulares e um contínuo imageamento da superfície terrestre, usando câmeras do tipo *Charge-Coupled Device* (CCD). As matrizes de linhas consistem em 1504 pixels fotoativos e cada linha é filtrada para fornecer uma das quatro bandas espectrais. A sua órbita foi selecionada pelo projeto EOS para ser Sol-síncrona polar descendente, com uma inclinação média de $98,186^\circ$. O período de cada órbita é de 98,88 minutos e a precisão é de $0,986^\circ/\text{dia}$ implicando em uma resolução temporal de 16 dias para a visada ao nadir e de seis a nove dias para uma cobertura global. A altitude da órbita varia de 704 km para um máximo de 730 km e a passagem no Equador se dá às 10h30.

A resolução espacial é de 250 m para a câmera ao nadir e de 275 m para as câmeras off-nadir. No sentido *cross-track* (275 m), ela é praticamente constante para as nove câmeras. No sentido *along-track*, a resolução pode variar de 236 m a 707 m, sendo possível programar o computador de bordo para aglomerar os pixels em arranjos de 2 x 2, 4 x 4, 1 x 4 e 1 x 1 (linhas x colunas). A vantagem em se utilizar os dados

reamostrados para 1100 m, criando sub-regiões de 4 por 4 pixels, é a redução desta variação entre as câmeras. No entanto, essa diferença é considerada insignificante em todo o processo de geração de produtos.

A estruturação dos dados MISR é subdividida em cinco níveis de processamento (1A, 1B1, 1B2, 2 e 3). Em cada nível pode-se gerar um ou mais produtos, dependendo do nível de processamento considerado (Figura 2.5). No nível 1A os dados são apenas reformatados para o formato *Hierarchical Data Format* (HDF) e uma verificação a respeito da qualidade dos dados e funcionamento do instrumento é feita. O dado neste nível não é distribuído dentro da comunidade científica, pois consiste apenas na reconstituição dos dados brutos do sensor para 14 bits, após o recebimento dos dados em 12 bits.

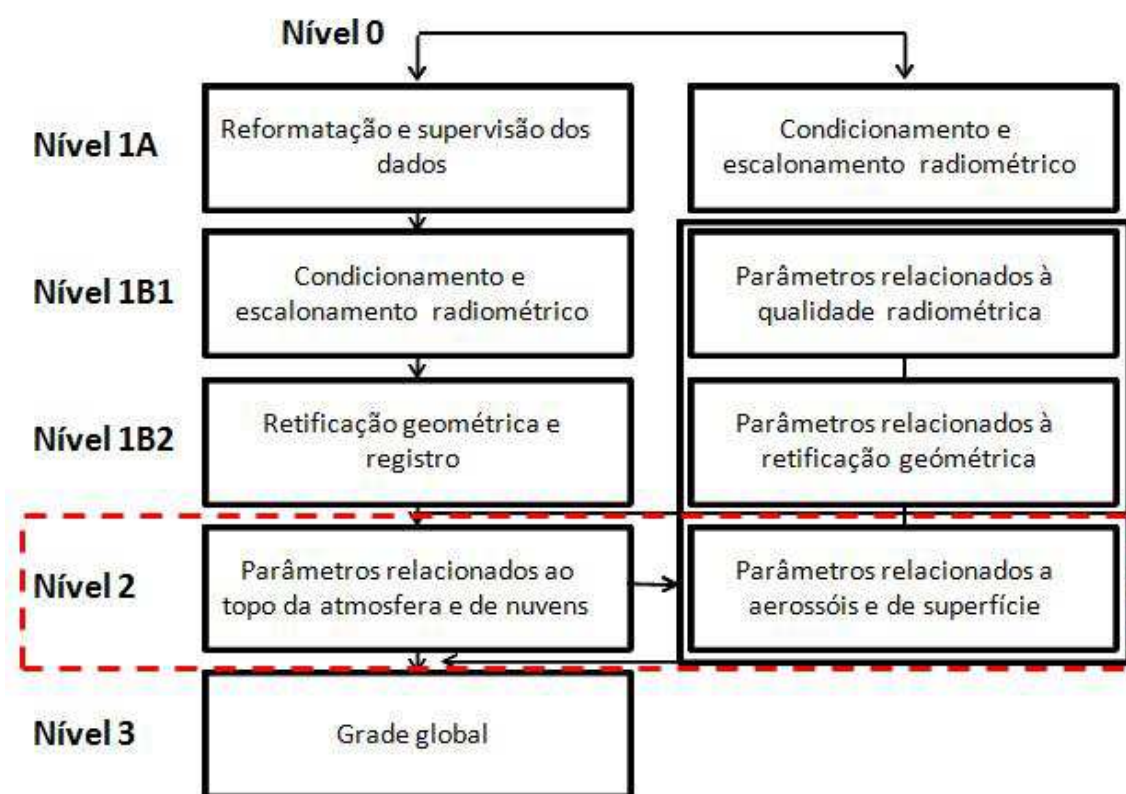


Figura 2.5 – Hierarquia dos níveis de processamento dos dados do sensor MISR. Em destaque, nível de processamento utilizado.

Fonte: adaptada de Bothwell et al. (2002).

O nível 1B1 consiste da conversão do número digital extraído das câmeras do MISR em radiância de topo da atmosfera, que é quantizada com o uso dos dados de calibração. Para o nível 1B2 os dados das nove câmeras são registrados conforme a projeção Espaço Oblíqua de Mercator (*Space Oblique Mercator – SOM*), a qual é comumente empregada para dados de sensores orbitais por minimizar as distorções espaciais de grandes áreas da superfície terrestre. Neste dado também são encontradas diversas informações como a distância do Sol em relação a Terra, ângulos de observação zenital e azimutal e os ângulos zenitais solares e azimutais, além de um modelo digital de elevação que permite a visualização tri-dimensional dos dados do MISR.

O nível 2 apresenta medidas de diversos parâmetros de nuvens (tais como altitude e textura), além de ventos, albedo do topo da atmosfera e fatores de reflectância bidirecional, além de outros parâmetros. Também fornece os dados sobre a radiação de superfície e a interação dessa radiação com aerossóis (como a espessura óptica dos aerossóis na troposfera, sua composição e tamanho), além de diversos parâmetros da superfície, como fatores de reflectância bidirecional, bi-hemisférica, índice de área foliar da vegetação, tipo de bioma, entre outros. O nível 3 apresenta alguns dos parâmetros existentes no nível 2 em escala global, com cobertura temporal mensal, trimestral e anual.

Todos os produtos gerados pelos níveis de processamento 1 e 2 são processados e arquivados em blocos (Figura 2.6). Cada bloco consiste em um conjunto de dados bidimensionais adquiridos no período diurno durante uma órbita. Os níveis 1A, 1B1 e 1B2 são projetados para uma grade de acordo com a Projeção SOM e usam o formato de grade do HDF-EOS. Todos os dados são construídos em uma série de blocos, correspondentes a cenas do satélite Landsat. Estes blocos fornecem uma segmentação conveniente para o processamento e um subconjunto de dados para o usuário.

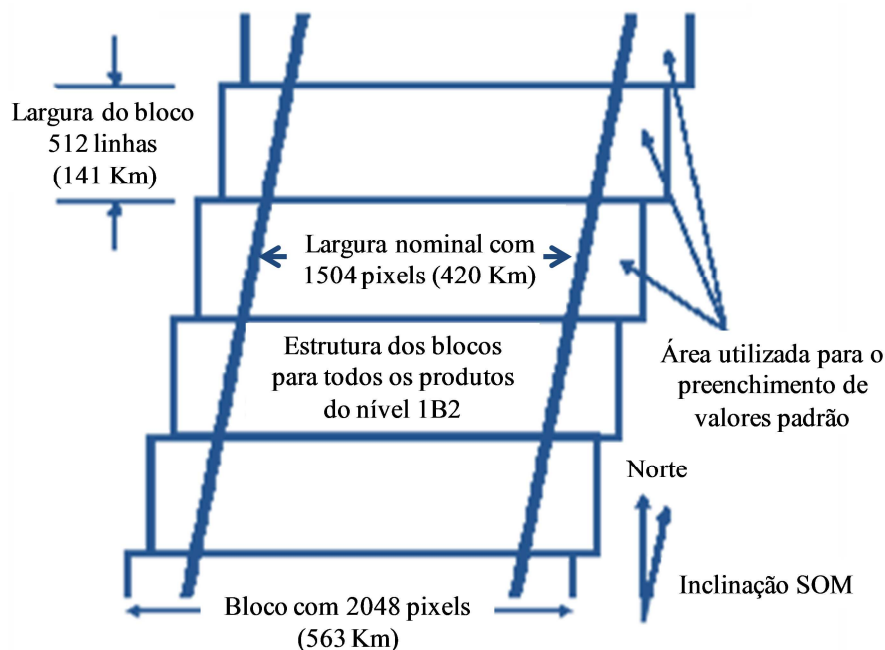


Figura 2.6 – Estrutura dos blocos dos produtos derivados a partir dos dados do sensor MISR.

Fonte: adaptada de Bothwell et al. (2002).

A trajetória do satélite é constantemente monitorada e a órbita é ajustada mensalmente, sendo mantida dentro da largura nominal da órbita em aproximadamente 20 km. Cada revolução e cada bloco imageados são identificados com uma boa precisão, permitindo a realização de estudos multitemporais. Deste modo, a superfície terrestre é dividida geograficamente em 233 órbitas Sol-síncronas. Cada órbita é dividida em 180 blocos fixados geograficamente, de forma que é possível dizer que cada bloco mede aproximadamente um grau no sentido *along-track*.

2.5. Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME)

Nas imagens de sensoriamento remoto, os sensores observam a superfície da Terra e registram a radiância integrada de todos os objetos contidos no menor elemento de resolução de observação no terreno, designado pixel (HAERTEL e SHIMABUKURO, 2005). Isto implica em problemas de mistura espectral (AGUIAR et al., 1999), podendo ser mais frequente em imagens de baixa e média resolução espacial, devido a

dificuldade em se encontrar pixels puros devido ao tamanho da área imageada. De fato, no entanto, a mistura espectral está presente em todas as escalas ou resoluções espaciais.

A resposta espectral do pixel detectada pelo sistema-sensor é uma mistura das respostas individuais de cada componente "puro" dentro do pixel (*endmembers* ou membros de referência; normalmente, solo, sombra e vegetação em modelos de mistura simplificados). A base da aplicabilidade do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) está fundamentada na identificação prévia de membros de referência, que por formulação matemática, permite gerar a partir de imagens primárias, outras imagens-sintéticas de fração solo, sombra e vegetação (CROSS et al., 1991). A proporção de cada componente é representada nas imagens-fração pela variação dos níveis de cinza, em que tons escuros representam pequenas proporções ou abundância do componente, enquanto tons mais claros representam maiores proporções do componente.

O modelo de mistura espectral pode ser escrito como:

$$r_i = a*veg_i + b*solo_i + c*sombra_i + e_i \quad (2.3)$$

Onde r_i é a resposta do pixel na banda i ; a , b e c são as proporções de vegetação, solo e sombra (ou água), respectivamente; veg_i , $solo_i$ e $sombra_i$ são as respostas espectrais das componentes vegetação, solo e sombra (ou água), respectivamente; e_i é o erro na banda i e i indica a banda a ser utilizada (SHIMABUKURO et al., 1997).

A primeira etapa para a aplicação do MLME é a definição dos membros de referência, onde diversas técnicas têm sido utilizadas para tal finalidade. Dentre elas, cita-se a aplicação sequencial das técnicas *Minimum Noise Fraction (MNF)*, *Pixel Purity Index (PPI)* e do visualizador n -dimensional para dados de alta resolução espectral. Para dados multiespectrais, a análise por componentes principais (PCA - *Principal Components Analysis*) é uma alternativa.

A técnica MNF, conhecida como fração máxima de ruído, é utilizada para a redução da dimensionalidade espectral e é uma PCA modificada. Esta transformação produz imagens, como componentes principais, ordenadas de forma crescente de acordo com o conteúdo de ruído (GREEN et al., 1988). A técnica Índice de Pureza do Pixel (PPI) é utilizada para detecção de respostas espectrais extremas ou puras no espaço MNF. O procedimento PPI gera uma imagem que apresenta, para cada pixel, o valor do número de vezes em que esse foi definido como puro ou vértice (BOARDMAN et al., 1995). Quanto maior for o valor do pixel na imagem PPI maior é o seu grau de pureza.

A técnica PCA é baseada em estatística multivariada, que consiste em transformar um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis de mesma dimensão denominadas de componentes principais. O objetivo consiste em encontrar um meio de condensar a informação contida nas variáveis originais em um conjunto menor de variáveis estatísticas com perda mínima de informações (HAIR et al., 1998). As componentes principais são apresentadas na ordem decrescente de variabilidade, sendo que a última componente caracteriza-se pela menor contribuição para a explicação da variabilidade total dos dados originais.

Moura et al. (2009) geraram imagens-fração derivadas do modelo linear de mistura espectral para analisar a variabilidade fenológica em área de floresta Atlântica através de imagens MODIS. Neste estudo, os autores concluíram que as imagens-fração possibilitam a análise das mudanças fenológicas de diferentes tipologias vegetais, o que permitiu analisar a dinâmica sazonal deste ambiente. Xavier (2003) utilizou dados multiangulares do sensor MISR/TERRA para estudar o comportamento espectral de diferentes tipos de classes de cobertura da terra em uma região do Acre. O modelo linear de mistura espectral foi aplicado para caracterizar os componentes da cena MISR e para definição de classes de cobertura e subsequente obtenção dos perfis angulares. Foram gerados resultados a partir do fatiamento das imagens fração sombra e vegetação, os quais foram comparados com mapas de vegetação pré-existentes. Desta forma, foi possível selecionar dois domínios de floresta e duas áreas de regeneração com diferentes características. Imagens-fração sombra e vegetação também foram utilizadas na separação das classes de cobertura do terreno para análise da influência da

geometria de visada sobre a resposta espectral de cada classe. O fatiamento da fração vegetação forneceu melhores resultados que aqueles obtidos pela fração sombra, aprimorando a metodologia de classificação aplicada para delimitação das classes de cobertura vegetal.

2.6. Parque Indígena do Xingu (PIX)

O Parque Nacional do Xingu (PIX) foi criado pelo Decreto nº 50.455, de 14/04/1961, assinado pelo presidente Jânio Quadros, tendo sido a primeira terra indígena homologada pelo governo federal. Seus principais idealizadores foram os irmãos Villas Boas, com intenção de conservar os povos e a natureza da região. A categoria híbrida de “Parque Nacional” deveu-se ao duplo propósito de proteção ambiental e das populações indígenas, estando à área subordinada tanto ao órgão indigenista oficial quanto ao órgão ambiental. Foi apenas com a criação da FUNAI (em 1967, substituindo o SPI – Serviço de Proteção aos Índios) que o “Parque Nacional” passou a ser designado “Parque Indígena”, voltando-se então primordialmente para a proteção da sócio-diversidade nativa (ISA, 2011). O PIX possui área incidente em parte dos municípios matogrossenses de Canarana (1.083 ha), Paranatinga (2.417 ha), São Félix do Araguaia (1.684 ha), São José do Xingu (746.365 ha), Gaúcha do Norte (1.689 ha), Feliz Natal (1.144 ha), Querência (1.785 ha), Nova Ubiratã (1.269 ha) e Marcelândia (1.229 ha).

Os povos indígenas que vivem na área do Xingu são formados por dezesseis etnias diferentes, com população atual de 5.219 índios (ISA, 2006), os quais pertencem às quatro grandes famílias lingüísticas indígenas do Brasil, sendo elas: caribe, aruaque, macrotupi e macrojê (FRAMCHETTO, 2011). De acordo com a UNESCO a área do PIX é considerada o mais importante mosaico lingüístico do país. As tribos que vivem na região do Alto Xingu são: Aweti, Kalapalo, Kamaiurá, Kuikuro, Matipu, Mehinako, Nahukuá, Naruvotu, Trumai, Tapaiuna, Wauja e Yawalapiti. Esses povos se caracterizam por uma grande similaridade no seu modo de vida e visão de mundo. As demais etnias que habitam o Parque – Ikpeng, Kaiabi, Kĩsêdjê e Yudjá – diferem em suas características e são bastante heterogêneas culturalmente. Foram integradas aos

limites da área demarcada por razões de ordem administrativa, em alguns casos implicando o deslocamento de suas aldeias (YIKATUXINGU, 2011).

Um dos problemas mais relevantes que o PIX enfrenta está associado ao processo de ocupação predatória ao longo de seu entorno, que se estende ao redor dos principais formadores do Rio Xingu na região do estado do Mato Grosso. Paralelo ao rio Xingu, encontram-se ainda duas grandes rotas rodoviárias: a oeste do PIX, a Cuiabá-Santarém (BR-163); a leste, a BR-158, as quais funcionam como eixo de ocupação.

Neste contexto, os esforços conjuntos de órgãos fiscalizadores buscam melhorias na adoção de práticas e políticas associadas à instalação de infra-estrutura e postos de vigilância nas áreas que propiciam um acesso direto ao Parque. Estas discussões são realizadas pelos órgãos federais (IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) e estaduais (FEMA – Fundação Estadual do Meio Ambiente), bem como associações e ONG's (ATIX – Associação Terra Indígena do Xingu e ISA – Instituto SócioAmbiental). Ainda, projetos viabilizados pela ATIX e ISA (Projeto Fronteiras), têm como objetivo mapear áreas desmatadas e novos vetores de ocupação no entorno do PIX, através de imagens de satélite e identificação em campo. Também são desenvolvidos trabalhos de capacitação de chefes dos postos de vigilância e manutenção dos marcos que estabelecem os limites físicos do PIX. Esses esforços possibilitam que as comunidades indígenas acompanhem o que acontece nas fronteiras do PIX, e orienta ações de fiscalização junto aos órgãos públicos responsáveis (FUNAI, IBAMA e Governo Estadual).

3 METODOLOGIA DE TRABALHO

Os procedimentos sequenciais realizados no presente trabalho são apresentados no fluxograma da Figura 3.1. Cada etapa será discutida nas seções subseqüentes, cuja numeração é apresentada abaixo. A seção 3.1 refere-se à escolha e breve descrição da área de estudo selecionada; a seção 3.2 refere-se à caracterização da tipologia florestal analisada por meio de um inventário; a seção 3.3 apresenta os procedimentos e caracteriza as atividades de aquisição e pré-processamento das imagens MISR. Por fim, as seções 3.4 e 3.5 apresentam a metodologia utilizada para a análise dos efeitos da geometria de iluminação e de visada sobre as variações sazonais (intra-anuais) e inter-
anuais do EVI calculado a partir dos dados MISR.

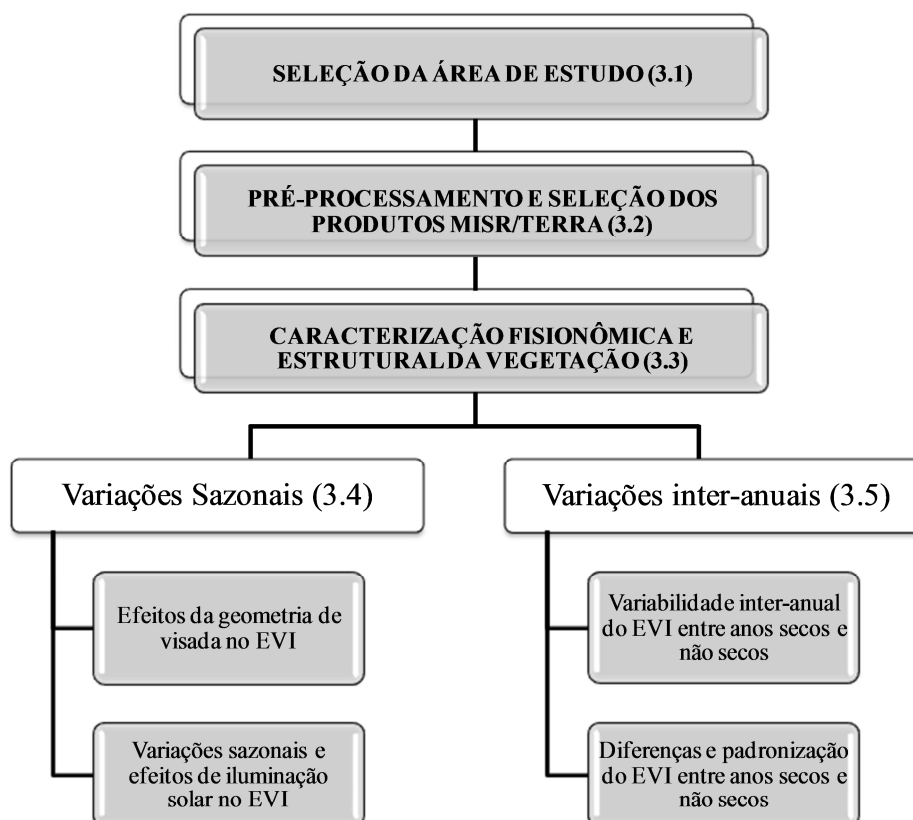


Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia de trabalho.

3.1 Seleção da área de estudo

A seleção da área de estudo, localizada no PIX, foi feita com base em estudos pré-existentes e pelo fato da região apresentar uma condição climática bem definida e por ser uma área de preservação florestal. Isto garante que as variações encontradas em imagens MISR não estejam associadas a processos intensos de degradação florestal, característica comum no Estado do Mato Grosso. A estação seca bem definida também é um aspecto positivo. O PIX está localizado na região nordeste do Estado do Mato Grosso, na porção sul amazônica brasileira. Possui extensão de 2.642.003 hectares, que se compõe em uma paisagem local de grande biodiversidade, apresentando vegetação de savanas a florestas semidecíduais (sul do PIX) e de floresta ombrófila amazônica (norte do PIX).

Em relação à tipologia florestal da área de estudo é utilizado neste trabalho a classificação realizada pelo projeto Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM, 2002) na escala 1:250.000 (Figura 3.2). De acordo com a classificação do SIVAM, que tem como base a classificação realizada pelo IBGE (1992) e pelo projeto RADAMBRASIL (1981), a tipologia predominante da área de estudo é floresta estacional semidecidual submontana dossel emergente. Esta tipologia é caracterizada sobretudo pela presença de duas estações bem definidas (seca e chuvosa) e por sua posição altimétrica em relação ao nível do mar que varia de 100 m a 500 m.

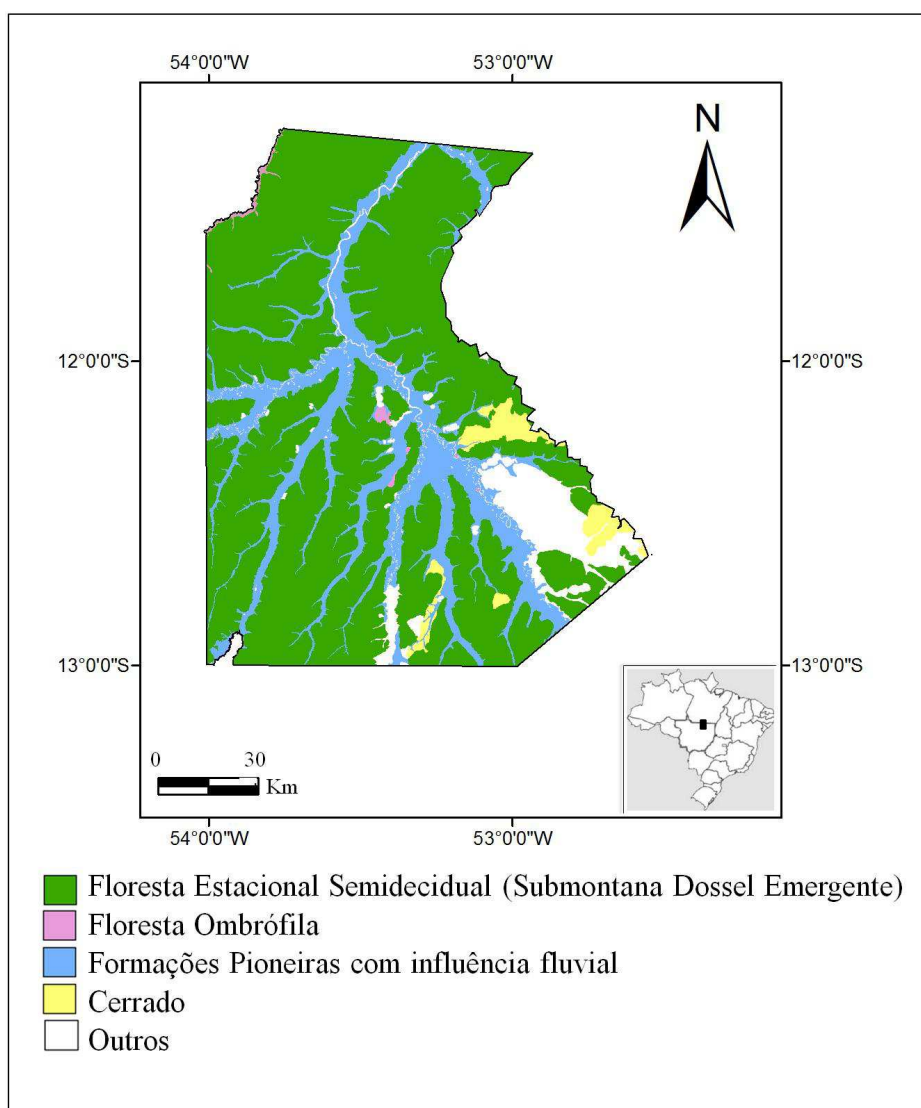


Figura 3.2 – Localização da área de estudo e mapa de vegetação correspondente.

Fonte: adaptada de SIVAM (2002).

De acordo com a classificação climática de KOPPEN, o clima é do tipo “Aw” (Clima Tropical Chuvoso de Savana), que corresponde a um clima onde a temperatura mais fria se encontra em torno de 18°, com uma estação seca de inverno (VIANELLO e ALVES, 2002). Estimativas de precipitação acumulada mensal (Figura 3.3) do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), produto 3B43 (V6), indicam a ocorrência de anos secos na região (2005, 2007 e 2010), com períodos de precipitação inferior a 10 mm (junho a agosto), podendo chegar a zero neste trimestre. Apesar de especificamente para esta região o ano de 2007 ser caracterizado como um ano com baixa precipitação, chama-se

a atenção para a presença de duas secas severas (2005 e 2010) que afetaram a região amazônica como um todo (MARENGO et. al., 2011, 2008; LEWIS et al., 2011; BRANDO et al., 2011), incluindo a área de estudo (Figura 3.4).

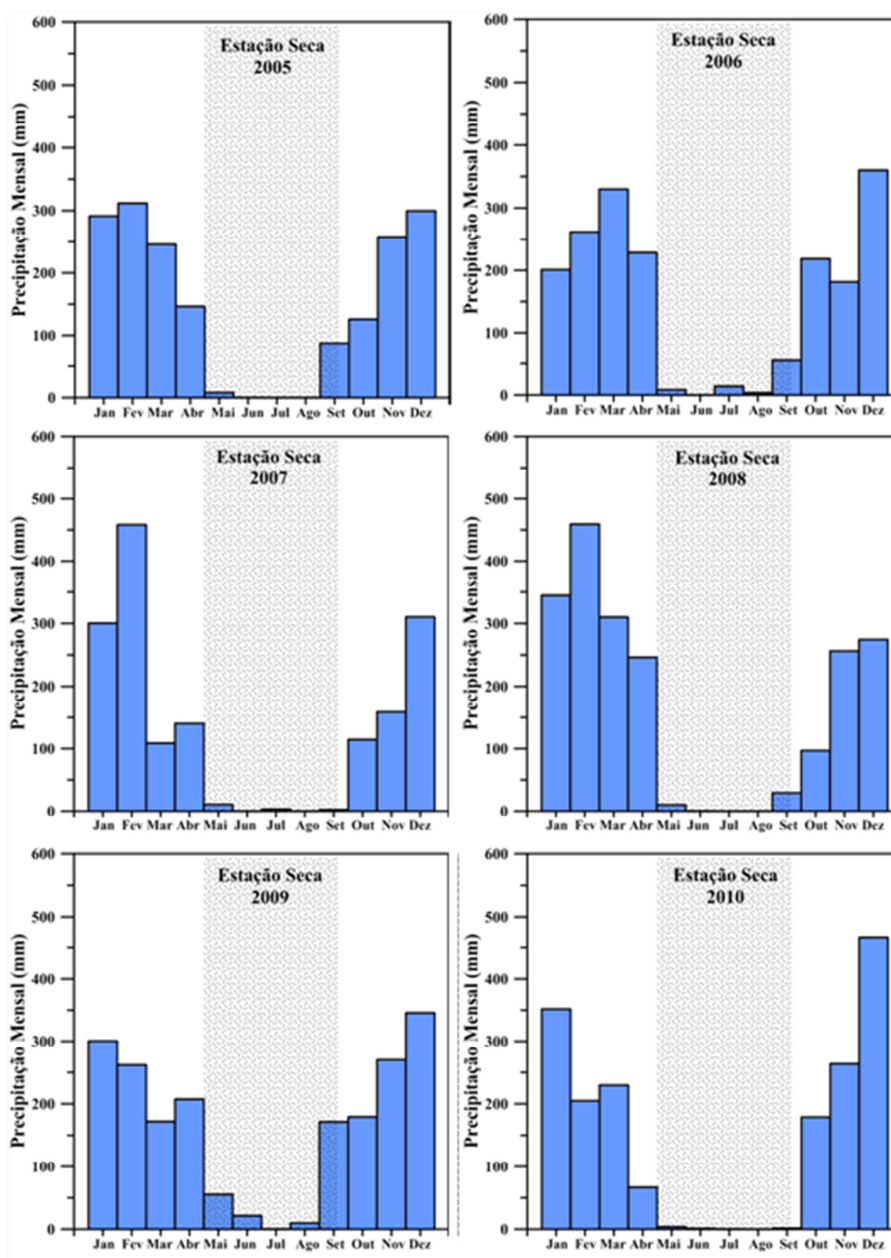


Figura 3.3 – Precipitação acumulada mensal do sensor TRMM para os anos de 2005 a 2010 para a região do Parque Índigena do Xingu. Em destaque (sombreado nos gráficos), o período da estação seca para todos os anos.

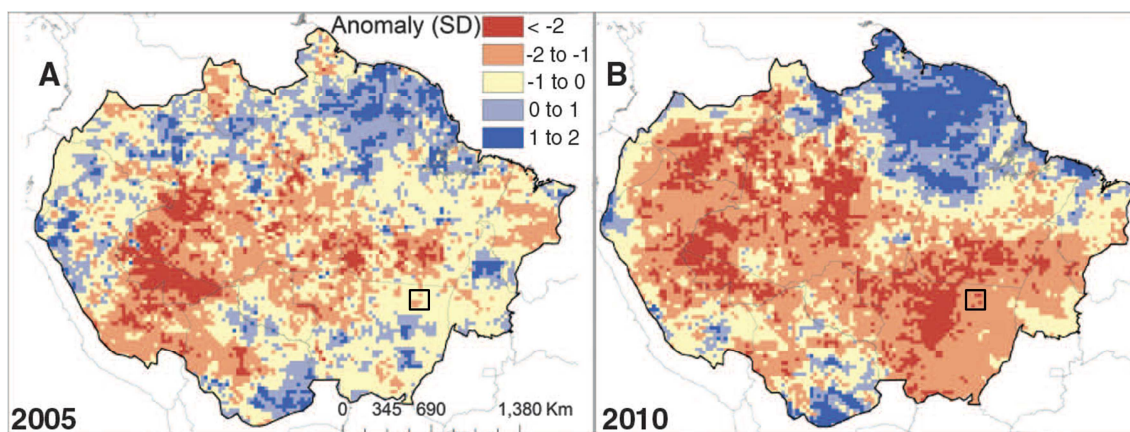


Figura 3.4 – Mapa das anomalias padronizadas de precipitação derivadas do TRMM durante a estação seca (julho a setembro) para as duas secas mais severas e extensas do século XXI na Amazônia. Em destaque, a região onde está localizado o PIX.

Fonte: adaptada de Lewis et al., 2011.

De acordo com a classificação desenvolvida pela EMBRAPA (1999), predominam dois tipos de solos na região do Alto Xingu: (a) Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico Típico, que ocorre nos relevos planos a suave ondulados das áreas de interflúvio; e (b) Neossolo Flúvico Tb Distrófico Típico, restrito às áreas florestais sujeitas a inundações periódicas. Do ponto de vista geoquímico, os solos são pobres. Ivanauskas et al. (2004) constataram a predominância de Latossolo Vermelho-Amarelo profundos e bem drenados com baixa disponibilidade de nutrientes e elevada toxidez por alumínio. As características geológicas da região apresentam cobertura sedimentar Terciário-quaternária, com solos de profunda lixiviação e laterização com topografia plana ou plano-ondulada (RADAMBRASIL, 1981).

3.2. Caracterização fisionômica e estrutural da vegetação

Para caracterização florística e estrutural da vegetação, atividades de campo foram executadas em agosto de 2010 (estação seca) em 20 transectos (100 x 25 metros), na área florestal situada na Fazenda Tanguro, pertencente ao Grupo André Maggi em Querência (MT). Esta área inventariada está situada dentro dos limites da tipologia florestal predominante da área interna do PIX (floresta estacional semidecidual submontana dossel emergente). Desta forma a análise amostral dos aspectos florístico-

estruturais inventariados na fase de trabalho de campo serviram como suporte na caracterização espectral da área do PIX analisadas nas imagens MISR.

As parcelas amostrais foram posicionadas próximas a borda sudeste do PIX e foram posteriormente comparadas com outras pré-existentes referentes aos trabalhos realizados nas bordas sul e leste do PIX por Ivanauskas et al. (2004) e Kunz et al. (2010), respectivamente. Uma área amostral de cinco ha foi inventariada, onde todos os indivíduos com diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) iguais ou maiores que 10 cm foram mensurados (obtidos através de uma fita diamétrica). Estimativas visuais foram realizadas para a altura total (HT) e comercial (HC) de cada indivíduo, que foi identificado botanicamente (Figura 3.4).



Figura 3.5 – Fotos ilustrativas da área florestal inventariada localizada na Fazenda Tanguro, Querência, MT.

As estimativas visuais dos valores de HT e HC foram ajustadas por um modelo de regressão simples, adotado por Gonçalves e Santos (2008) na FLONA do Tapajós a partir de medições realizadas por um clinômetro eletrônico (H_{ce}), onde H_{ev} representa as estimativas visuais para HT:

$$H_{ce} = e^{0,1845} H_{EV}^{0,9480} \quad (3.1)$$

Todas as parcelas foram devidamente georreferenciadas e o posicionamento dos indivíduos arbóreos em cada parcela foi realizado a partir do registro de coordenadas cartesianas X e Y, onde X corresponde a uma distância que vai de 0 a 100 m, contados a partir do início das parcelas e Y representa a distância perpendicular de 12,5 m do lado direito, e 12,5 m do lado esquerdo, de cada indivíduo à linha de referência no centro da parcela. A identificação botânica das espécies foi realizada em campo, primeiramente pelo nome popular, com auxílio de um identificador botânico. Posteriormente, foram feitas as associações entre os nomes populares e seus respectivos nomes científicos. Para cada parcela amostral, foram ainda obtidas fotografias hemisféricas para estimativas de cobertura do dossel. As fotografias hemisféricas foram tomadas através de uma câmera digital Nikon acoplada a uma lente hemisférica “olho de peixe” com campo de visão de 180° (Sigma EX DG 8mm), a cada 20 metros de intervalo no interior das parcelas de 2500 m². Desta forma, cada parcela foi representada por um total de seis fotografias. A câmera foi montada (com o auxílio de tripé) a 1,5m do solo, nivelada horizontalmente e alinhada com o norte magnético por meio de uma bússola. As imagens foram capturadas no sentido do solo para o céu (abaixo dos dosséis), sob condições de céu uniforme, com objetivo de garantir uma diferenciação clara entre o dossel e o céu durante a análise fotográfica. Para o desenvolvimento desta etapa, foi utilizado o aplicativo HemiView para o processamento das fotografias hemisféricas, o qual resultou nas estimativas de porcentagem de cobertura de copa. Primeiramente as fotografias foram classificadas de acordo com um limiar estabelecido a partir da análise dos histogramas de uma divisão binária entre “céu” e “copa”. As imagens resultantes foram utilizadas para calcular a fração de cobertura do dossel (KEELING e PHILLIPS, 2007).

Para caracterização do povoamento florestal, primeiramente foi analisado a suficiência amostral do inventário a partir da curva espécie-área. A curva espécie-área é constituída pela progressão do acúmulo de área e do número de novas espécies que aparecem a cada agregação de área. O ponto de saturação da curva foi determinado visualmente, como comumente utilizado, por intermédio da função de regressão linear ajustada à curva espécie-área (NARVAES, 2010).

Para análise da composição florística na área experimental, técnicas de análise quantitativa foram aplicadas, onde a diversidade florística foi estimada com o índice de Shannon (H') e com a equabilidade de Pielou (J), conforme sugerido por Magurran (1988):

$$H' = - \sum_{i=1}^s [p_i \ln(p_i)], \text{ com } p_i = \frac{n_i}{N} \quad (3.2)$$

$$J = \frac{H'}{\ln(S)} \quad (3.3)$$

em que n_i é o número de árvores da espécie i ; N é o número total de árvores; e S é o número total de espécies amostradas.

O valor obtido através do índice de diversidade de Shannon indica o grau de incerteza em prever a que espécie pertencerá um indivíduo selecionado ao acaso no conjunto amostral. Quanto menor o valor do índice de Shannon, menor o grau de incerteza, indicando baixa diversidade da amostra. A equabilidade de Pielou indica uma medida de uniformidade da distribuição da abundância entre as espécies de uma comunidade (MAGURRAN, 1988).

Ainda, foram analisados os parâmetros fitossociológicos de densidade, dominância e frequência de cada espécie, segundo descrições de Mueller-Dombois e Ellenberg (1974).

Densidade absoluta (DA) indica o número de indivíduos de uma determinada espécie por unidade de área e densidade relativa (DR) refere-se ao número de indivíduos de uma determinada espécie em relação ao total de indivíduos de todas as espécies identificadas no levantamento da área amostral. Dominância absoluta (DoA) é a soma das áreas basais dos indivíduos pertencentes a uma espécie, por unidade de área e dominância relativa (DoR) indica a porcentagem da área basal de cada espécie que compõe a área basal total de todos os indivíduos de todas as espécies, por unidade de área. Frequência absoluta (FA) expressa a porcentagem de parcelas em que cada espécie ocorre e frequência relativa (FR) é a porcentagem de ocorrência de uma espécie em relação à soma das frequências absolutas de todas as espécies. Os parâmetros estimados são obtidos segundo as equações abaixo:

$$DA_i = \frac{n_i}{A_{ha}} \quad e \quad DR_i = 100 \frac{DA_i}{\sum_{i=1}^S DA_i} \quad (3.4)$$

$$DoA_i = \frac{G_i}{A_{ha}} \quad e \quad DoR_i = 100 \frac{G_i}{\sum_{i=1}^S G_i} \quad (3.5)$$

$$FA_i = 100 \frac{u_i}{u_t} \quad e \quad FR_i = 100 \frac{FA_i}{\sum_{i=1}^S FA_i} \quad (3.6)$$

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 árvores da espécie i ; A_{ha} é a área total 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.

Para a análise da vegetação é importante encontrar um valor que permita dar uma visão mais abrangente da estrutura ou que caracterize a importância de cada uma das espécies no conglomerado total da floresta. Um método para integrar os três índices parciais, (densidade, dominância e frequência), consiste em combiná-los numa expressão única e simples que se constitui na soma dos valores relativos de densidade, dominância e frequência de cada espécie (CURTIS e MCINTOSH, 1951), de forma a abranger o

aspecto estrutural em sua totalidade, denominado por Índice de Valor de Importância (IVI):

$$IVI = DR_i + FR_i + DoR_i \quad (3.7)$$

Os aspectos essenciais na composição florística são revelados pela área florestal, mas sempre são somente enfoques parciais, que de forma isolada não fornecem as informações requeridas sobre a estrutura da vegetação. Desta forma, este índice permite a avaliação de aspectos relacionados à composição florística da área de estudo e fornece uma visão mais abrangente da estrutura, ou que caracterize a importância ecológica da área.

A caracterização das parcelas amostrais seguiu os procedimentos adotados na caracterização do povoamento florestal. A diversidade de espécies foi estimada para cada parcela amostral com a utilização do Índice de Shannon (H') e Equabilidade de Pielou (J). Para avaliação da similaridade florística entre as diferentes parcelas amostrais foi utilizada a análise de agrupamento por média de grupo (UPGMA – *Unweighted Pair Groups Method using Arithmetic Averages*) a partir do índice de Morisita (MORISITA, 1959), com o auxílio do programa NTSYSpc2.1.

$$\text{Índice Morisita} = N \frac{\sum x^2 - \sum x}{(\sum x)^2 - \sum x} \quad (3.8)$$

Onde, N é o número total de amostras, e X o somatório do número de indivíduos da mesma espécie em todas as amostras. O índice de Morisita considera o número de indivíduos por espécie nas parcelas e varia de 0 a 1, onde 1 significa duas parcelas totalmente similares e 0 significa que não há espécies em comum entre as parcelas comparadas. A análise por agrupamento resulta em um dendograma baseado na média

aritmética dos índices de similaridade, composto pelas hierarquias formadas pelos grupos.

Além das análises anteriores, foi feita a caracterização estrutural das parcelas amostrais a partir de duas variáveis biofísicas: DAP e HT. Para a avaliação estrutural das parcelas, ou seja, se as mesmas apresentaram diferenças significativas quanto à estrutura, utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov (ZWILLINGER e KOKOSKA, 1999).

3.3. Pré-processamento e seleção dos produtos MISR/TERRA

Foram utilizadas para este trabalho imagens MISR/Terra para a região do PIX no período de 2005 a 2010. Foram consideradas somente as imagens referentes ao período seco, que se estende de maio a setembro. As imagens foram obtidas junto ao *NASA Langley Research Center Atmospheric Sciences Data Center* (http://eosweb.larc.nasa.gov/PRODOCS/misr/table_misr.html). Neste site, além do fornecimento das imagens BRF, pode-se obter vários outros produtos e programas específicos para manipulação dos dados MISR. O pré-processamento e o processamento das imagens MISR foi feito através dos programas *Misr_view* e *ENVI 4.7*. Maiores especificações de manipulação, pré-processamento e geração do EVI podem ser consultados no Apêndice A.

Os dados MISR utilizados fazem referência aos nove ângulos de visada e às quatro bandas espectrais, correspondendo às regiões espectrais do azul, verde, vermelho e IVP, respectivamente (Tabela 2.1). Foram utilizados três produtos MISR da Coleção mais recente (F07-0022), descritos abaixo.

O primeiro produto (*MISR Level 2 MIL2ASLS Land Surface Product*) inclui os dados de Fator de Refletância Bidirecional (BRF) e *Land Quality Assurance*, relacionado com a qualidade dos pixels (descrições deste produto podem ser encontradas em Diner et al., 2008). Os dados BRF utilizados possuem 1,1 km de resolução espacial, com resolução temporal de 16 dias. Em relação ao dado Level 2 MIL2ASLS, a informação espectral gerada não ocorre de maneira contínua (Figura 3.5), com o aparecimento de áreas sem nenhuma informação. Desta forma, como observado na imagem da Figura

3.5, ocorre a formação de “*grupos de pixels*” sem informação, constituídas por aqueles pixels que apresentaram algum problema, tanto na geração e processamento da informação (p.ex., presença de nuvens), quanto na qualidade atmosférica do dado. No produto *Land Quality Assurance*, tais pixels normalmente possuem códigos com valores superiores a 1, indicando baixa qualidade dos dados. Os pixels de melhor qualidade, utilizados na análise de dados do presente estudo, foram os rotulados com o código zero (alta qualidade).

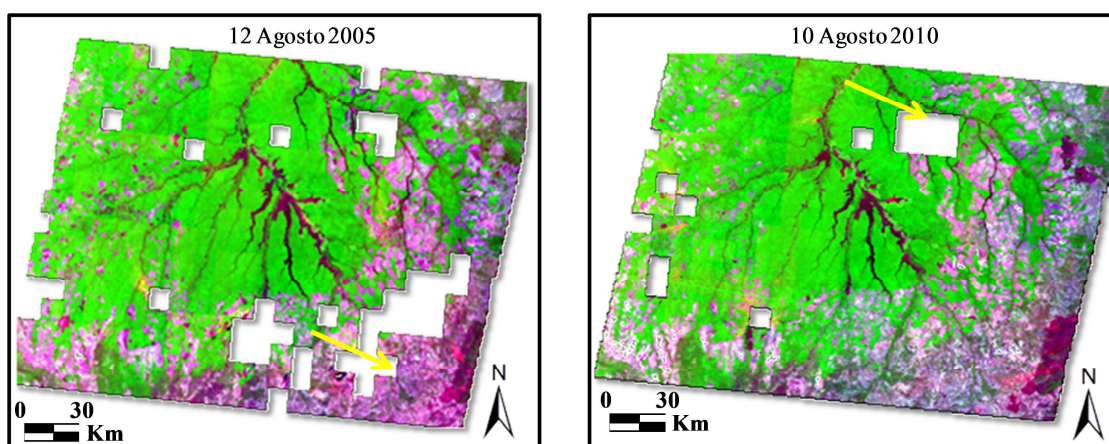


Figura 3.6 – Composições coloridas da região de estudo (bandas 3, 4 e 1 do MISR em RGB), ilustrando a ocorrência de pixels de baixa qualidade (áreas em branco).

O segundo produto (MISR Level 1B2 MIANCAGP *Ancillary Geographic Product*) fornece as informações necessárias para realização do georreferenciamento das imagens MISR BRF (MIL2ASLS). O procedimento para este pré-processamento está descrito no Apêndice A. Todas as imagens foram convertidas da projeção Espaço Oblíqua de Mercator (SOM, do inglês *Space Oblique Mercator*), para a projeção Sistema Universal Transverso de Mercator (UTM, do inglês *Universal Transversal Mercator*, datum WGS84). A conversão da projeção foi necessária, devido à base de dados referente ao mapa de vegetação utilizado (SIVAM, 2002) estar no sistema de projeção UTM (datum WGS84), se adequando geograficamente ao mapa base utilizado para extração das informações espectrais.

O último produto utilizado (MISR Level 1B2 MIB2GEOP *Geometric Parameters*) fornece as informações geométricas relacionadas ao ângulo azimutal solar, ângulo zenital solar e aos nove ângulos zenitais de visada e azimute, com resolução espacial de 17,6 km (CHOPPING et al., 2009). A Figura 3.6 apresenta o ângulo zenital solar (AZS) para as datas das imagens MISR do ano de 2005, os quais variaram de 43° (25 de junho) a 28° (13 de setembro). Diferenças nos ângulos solares zenitais e azimutais introduzem mudanças nas informações espectrais registrada por sensores remotos (Liesenberg, 2005). Neste estudo, ângulos de visada negativos indicam a região do retroespalhamento, enquanto ângulos de visada positivos representam a região do espalhamento frontal.

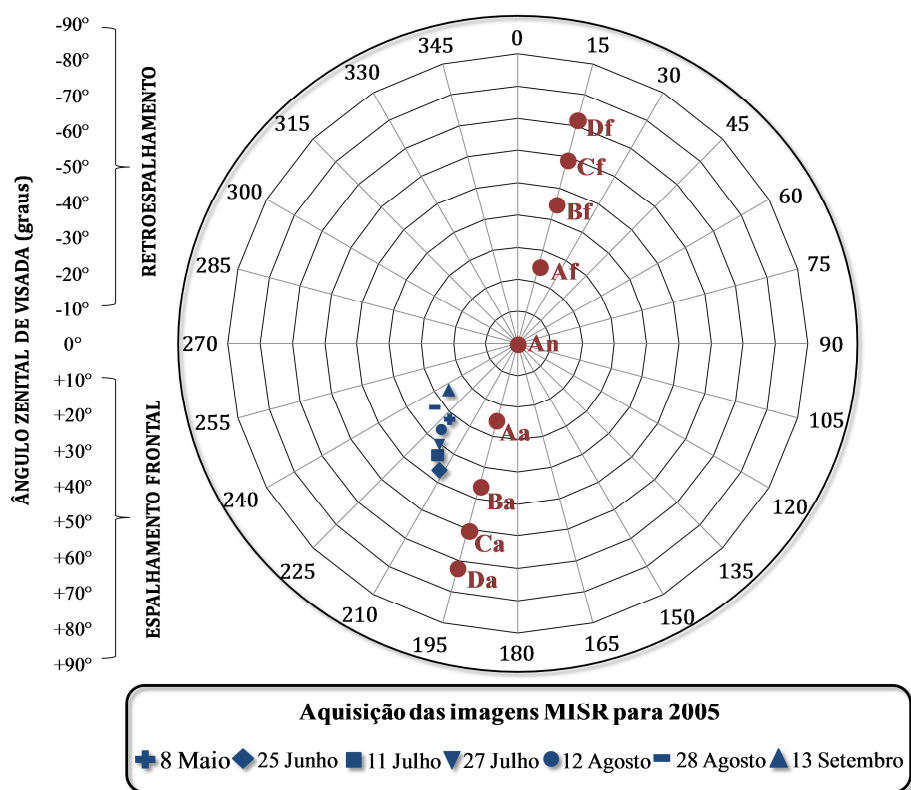


Figura 3.7 – Representação dos ângulos zenitais solares (AZS) e da geometria de visada das imagens MISR para a estação seca de 2005 (maio a setembro).

3.4. Variações Intra-anuais do EVI em Função da Geometria de Iluminação e de Visada

Para analisar as variações de EVI na estação seca na região do PIX no período de 2005 a 2010, em função da geometria de iluminação e de visada, foram selecionados aleatoriamente, através de um procedimento computacional automático, 500 pixels. O procedimento foi aplicado sobre a fitofisionomia predominante na área de estudo (floresta estacional semidecidual submontana dossel emergente). Os pixels foram mantidos fixos para todas as datas de todos os anos analisados. A partir da delimitação da tipologia fisionômica, como limite para a representação aleatória dos pixels, foi possível minimizar efeitos oriundos de informações pertinentes a outras formações fisionômicas encontradas na área. Estas outras fitofisionomias podem apresentar comportamento intra-anual diferenciado em relação à Floresta Estacional Semidecidual, o que poderia afetar a análise e interpretação dos perfis espectrais gerados.

Após a geração aleatória dos 500 pixels, somente aqueles que apresentaram alta qualidade (código zero no produto *Land Quality Assurance*) para todas as datas (de 2005 a 2010), foram utilizados nas análises posteriores para assegurar confiança na análise dos dados. As datas analisadas e o conjunto de pixels válidos (alta qualidade), dentre 500, estão indicados na Tabela 3.1. Como resultado desta estratégia de seleção de pixels, embora a localização dos pixels tenha sido constante entre meses e anos, o número de pixels válidos (alta qualidade) por data mudou significativamente com o tempo. Para todos os anos pôde-se verificar um menor número de pixels em maio e em setembro (início e final da estação seca), devido à influência das condições atmosféricas adversas nestes períodos, ocasionando maior perda de dados.

Tabela 3.1 – Número de pixels válidos (alta qualidade), dentre 500 pixels selecionados aleatoriamente, para as imagens MISR disponíveis nas estações secas dos anos de 2005 a 2010.

Ano	Data Mês (n)	Data Mês (n)	Data Mês (n)	Data Mês (n)	Data Mês (n)	Data Mês (n)	Data Mês (n)	Data Mês (n)	Data Mês (n)
2005	8	-	-	25	11	27	12	28	13
	Maio (14)			Junho (49)	Julho (269)	Julho (142)	Agosto (478)	Agosto (346)	Setembro (448)
2006	11	27	-	28	14	30	15	-	16
	Maio (229)	Maio (137)		Junho (195)	Julho (137)	Julho (378)	Agosto (411)		Setembro (56)
2007	-	30	Junho	-	1	-	2	18	3
		Maio (86)	15 (242)		Julho (284)		Agosto (259)	Agosto (335)	Setembro (127)
2008	16	-	Junho	-	3	19	4	20	5
	Maio (0)		17 (149)		Julho (179)	Julho (138)	Agosto (127)	Agosto (238)	Setembro (426)
2009	3	-	-	20	-	22	7	23	8
	Maio (0)			Junho (7)		Julho (22)	Agosto (54)	Agosto (322)	Setembro (9)
2010	6	-	-	23	9	25	10	26	11
	Maio (3)			Junho (148)	Julho (311)	Julho (175)	Agosto (485)	Agosto (36)	Setembro (0)

Primeiramente foram gerados perfis espectro angulares da refletância média das bandas do azul, vermelho e infravermelho próximo (IVP) do MISR. Em seguida, calculou-se o EVI a partir dos dados BRF MISR (MIL2ASLS), para cada data e para cada câmera. O cálculo do EVI foi feito de acordo com a equação:

$$EVI = G * \frac{\rho_{IVP} - \rho_{RED}}{\rho_{IVP} + C_1 * \rho_{RED} - C_2 * \rho_{BLUE} + L} \quad (3.9)$$

onde ρ_x é a refletância de superfície com correção atmosférica para as bandas do infravermelho próximo (IVP), vermelho (Red) e azul (Blue); L é um fator de calibração que leva em consideração os efeitos do solo na resposta espectral do dossel (1,0); C_1 (6,0) e C_2 (7,5) são coeficientes de peso para a correção dos aerossóis nas bandas do vermelho e do azul; e G (2,5) é um fator de ganho. Os coeficientes adotados neste trabalho foram os mesmos descritos por Solano et al. (2010) para o produto MODIS

MOD13Q1 (MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250-m SIN Grid V005).

Para fins de comparação das variações angulares, o NDVI $[(\rho_{IVP} - \rho_{red}) / (\rho_{IVP} + \rho_{red})]$ foi utilizado como referência para as análises intra-anuais. Coeficientes de correlação de Pearson foram calculados entre o EVI e a reflectância das bandas utilizadas para calculá-lo, em uma data para todas as câmeras MISR, com o objetivo de ver a relação entre a reflectância das bandas e o EVI em cada configuração de visada.

Efeitos intra-anuais de iluminação solar durante a estação seca no EVI foram avaliados em duas etapas. Primeiramente, foram analisadas as mudanças de EVI do início (maio) para o final da estação seca (setembro) com a variação do AZS, fixando-se a câmera do nadir. Após esta primeira etapa, utilizou-se o MLME para geração de imagens-fração (vegetação, solo e sombra) nas diferentes datas da estação seca do ano de 2005, ao nadir, usando um conjunto fixo de membros de referência. A seleção dos membros de referência teve como base a análise por componentes principais (PCA) e a inspeção dos pixels no gráfico de dispersão das duas primeiras PCs (95% da variância dos dados), como descrito por Galvão et al. (2001). Desta forma, o passo final foi correlacionar os valores da fração-sombra dos pixels selecionados com os dados de EVI para imagens de datas com AZS distintos e avaliar a sensibilidade do índice para os efeitos de iluminação solar.

3.5. Variações Inter-anuais do EVI para as Secas Severas de 2005 e 2010

Baseado na hipótese sugerida na literatura (SALESKA et al., 2007; XU et al., 2011) de que secas severas influenciam o comportamento inter-anual do EVI em floresta tropical e introduzem variabilidade no índice, analisaram-se as variações inter-anuais do EVI usando as secas severas de 2005 e 2010 como referência. Nesta etapa de análise, utilizou-se somente a câmera ao nadir para eliminar influências relacionadas com os ângulos de visada e com a direção de imageamento (retro-espalhamento e espalhamento frontal). Com o período de análise mantido fixo para todos os anos (maio a setembro de 2005 a 2010), a variação introduzida pelo AZS também foi uniformizada.

Primeiramente, a análise inter-anual foi realizada a partir da análise dos perfis dos valores médios de EVI para todos os anos e para todo o período da estação seca. Desta forma, foi possível analisar o comportamento dos anos afetados por secas severas (2005 e 2010) e daqueles nos quais não houve evidências de secas extremas (2006 a 2009). Após esta análise preliminar, foram calculadas diferenças entre as imagens MISR EVI ao nadir com o intuito de inspecionar variabilidades entre pares de meses em datas próximas (Tabela 3.2) entre anos secos (2005 e 2010) e não secos (p. ex., 2006).

Tabela 3.2 – Datas utilizadas para calcular as diferenças de EVI das imagens MISR ao nadir.

Diferenças 2005-2006		Diferenças 2010-2006	
2005	2006	2010	2006
8 maio	11 maio	-	-
25 junho	28 junho	23 junho	28 junho
11 julho	14 julho	9 julho	14 julho
12 agosto	15 agosto	10 agosto	15 agosto
13 setembro	16 setembro	-	-

Por fim, para verificação do comportamento inter-anual do EVI, padronizou-se o índice para cada um dos dois anos secos (2005 e 2010) em relação aos demais anos não secos (2006 a 2009). O trimestre utilizado para padronização foram os meses de julho, agosto e setembro, também utilizado nos trabalhos prévios reportados por Saleska et al. (2007) e Xu et al. (2011) na análise do “greening” e “browning” na Amazônia nas secas de 2005 e 2010, respectivamente. A equação usada para padronização foi:

$$\text{Padronização EVI}_{\text{ano seco}} = \frac{(\mu_{\text{ano seco:JAS}} - \mu_{\text{anos não secos:JAS}})}{\sigma_{\text{anos não secos:JAS}}} \quad (3.10)$$

onde $\mu_{\text{ano seco:JAS}}$ é a média do EVI no período de julho, agosto e setembro de cada ano seco (2005 e 2010); $\mu_{\text{anos não secos:JAS}}$ é a média do EVI para os mesmos meses (Julho, Agosto e Setembro) de todos os anos não secos (2006, 2007, 2008 e 2009); e $\sigma_{\text{anos não secos}}$ é o desvio padrão para os mesmos meses (julho, agosto e setembro) de todos os anos não secos (2006 a 2009).

Para realização desta padronização foi utilizado o mesmo procedimento descrito por Brando et al. (2010). Se não houvesse valor de EVI em um dos três meses do trimestre (julho, agosto e setembro), a média do EVI era baseada na média dos outros dois meses remanescentes. Após a padronização, foi ajustada uma curva de função Gaussiana para analisar a distribuição dos resultados.

Em adição a esta análise prévia, foram avaliados o impacto de incertezas associadas à análise inter-anual do EVI. Para esta verificação, foi aplicado o procedimento de trocar o trimestre (julho, agosto e setembro por junho, julho e agosto) e verificar as variações decorrentes desta troca. Os meses de junho, julho e agosto foram escolhidos por se constituírem em um período de pixels de melhor qualidade (Tabela 3.1), devido à menor influência residual da atmosfera.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização fisionômica estrutural da vegetação

Foram inventariados cinco hectares no trecho de floresta estacional semidecidual em Querência (MT), nas proximidades da borda sudeste do PIX representativo da mesma tipologia predominante existente no interior do parque. O número total de indivíduos foi de 2.749, distribuídos em 20 famílias botânicas e 26 espécies, nas 20 parcelas amostradas de 2500 m². De uma maneira generalizada, os valores que refletem essa composição florística estão abaixo do esperado quando comparados a outras regiões dentro dos limites do Bioma Amazônico, como os encontrados em estudos sobre a riqueza florística em trechos da Floresta Ombrófila Amazônica, com valores entre 40 a 500 espécies (LIMA-FILHO et al., 2001; GONÇALVES e SANTOS, 2008). De acordo com Kunz et al. (2010), esta variação no número de espécies é decorrente desta região estar afastada da área "núcleo" de característica ombrófila. Em direção aos extremos, caso desta área estudada, num trecho transicional com o bioma cerrado, há diminuição da riqueza florística.

A curva espécie-área apresentada na Figura 4.1 indica uma área homogênea com concentração de aparecimento de novas espécies nas primeiras seis parcelas, com posterior estabilização na curva, indicando que o nível de coleta realizado na amostragem foi adequado para caracterização da área.



Figura 4.1 – Curva espécie-área obtida através das parcelas amostradas inventariadas.

O valor obtido para o índice Shannon ($H' = 2,48$) indicou baixa diversidade de espécies, quando comparado com resultados encontrados em outras parcelas da Amazônia (Manaus, Rio Branco e Santarém) por Vieira et al. (2004). Os resultados obtidos foram compatíveis com outros estudos conduzidos na região da borda sul amazônica, em que o índice de diversidade não ultrapassou o valor de 3,3 (IVANAUSKAS et al., 2004a), considerando o mesmo critério de inclusão ($DAP \geq 10$ cm). A equabilidade de Pielou, que indica atributos de distribuição de espécies dentro de uma população, foi semelhante à observada em parcelas na região de Santarém, e em conformidade com outros estudos realizados nas proximidades do PIX (KUNZ et al., 2010). A densidade estimada da área amostral foi de 549,8 árvores/ha-1, com uma área basal de 14,31 m², e cobertura de dossel em torno de 86% (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Valores médios e desvio padrão dos parâmetros coletados no trecho florestal da Fazenda Tanguro em Querência (MT).

Nº de parcelas amostrais	20
Tamanho das parcelas amostrais	2500m ²
Nº de árvores amostradas (>10cm)	2749
Nº de árvores por ha	549,8 ± 88,4
Área basal (m ² .0,25ha ⁻¹)	14,31 ± 2,52
Altura média (m)	17,13 ± 1,30
Altura comercial (m)	8,67 ± 1,17
Índice de diversidade de Shannon (H')	2,48 ± 0,21
Equabilidade de Pielou (J)	0,70 ± 0,05
Cobertura do dossel (%)	86% ± 3,06

Em relação à altura dos indivíduos arbóreos, foi verificada a ocorrência de três classes principais, compostas pelas alturas de 15 m, 20 m e 25 m, que correspondem a 991, 723 e 474 indivíduos, respectivamente, representando aproximadamente 80% do total amostral. A área basal média foi de 14,31 m².0,25ha⁻¹, com freqüência predominante de indivíduos com área basal em torno de 5 cm. O valor de DAP mais freqüente está concentrado em 25 cm, o que representa aproximadamente 84% dos indivíduos arbóreos inventariados (Figura 4.2).

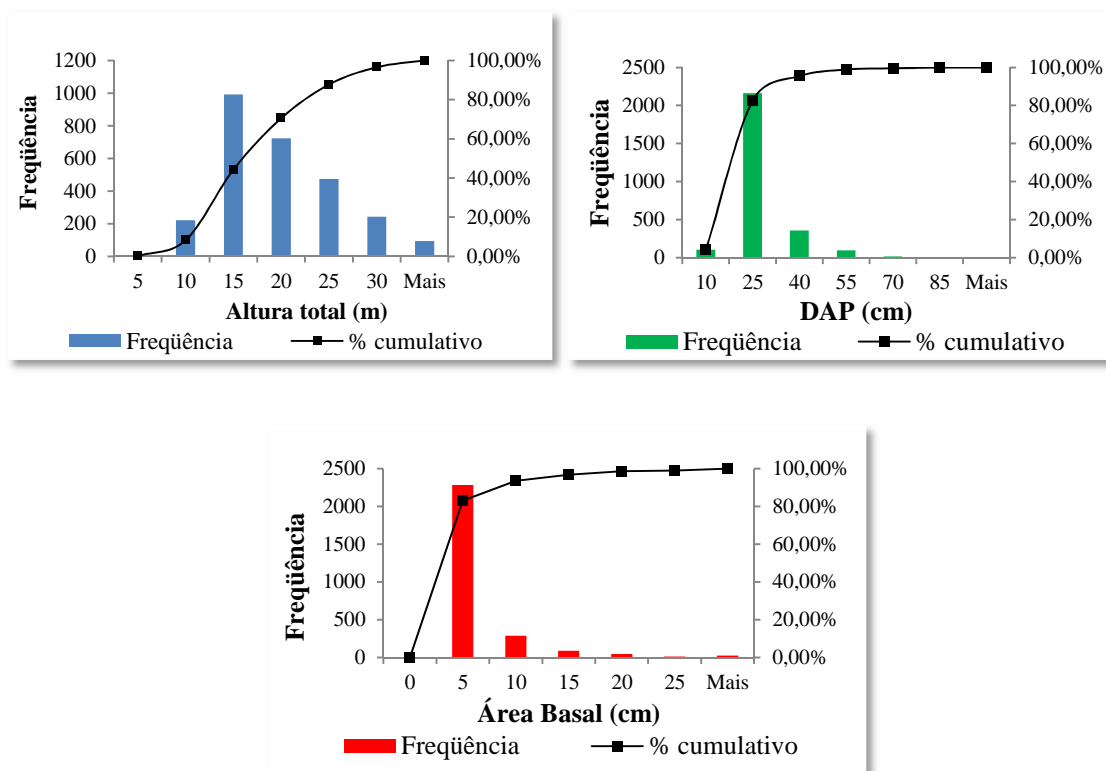


Figura 4.2 – Freqüência de indivíduos arbóreos por classes de valores médios de HT, DAP e área basal.

Na Figura 4.3 são apresentados os parâmetros fitossociológicos das dez famílias amostradas com maior Índice de Valor de Importância (IVI). O povoamento florestal amostrado apresentou uma concentração de grande parte dos indivíduos em um número limitado de famílias botânicas. Do total de 2.749 indivíduos arbóreos inventariados, 86% (2.367 indivíduos) estão representados apenas pelas famílias apresentadas na Figura 4.3.

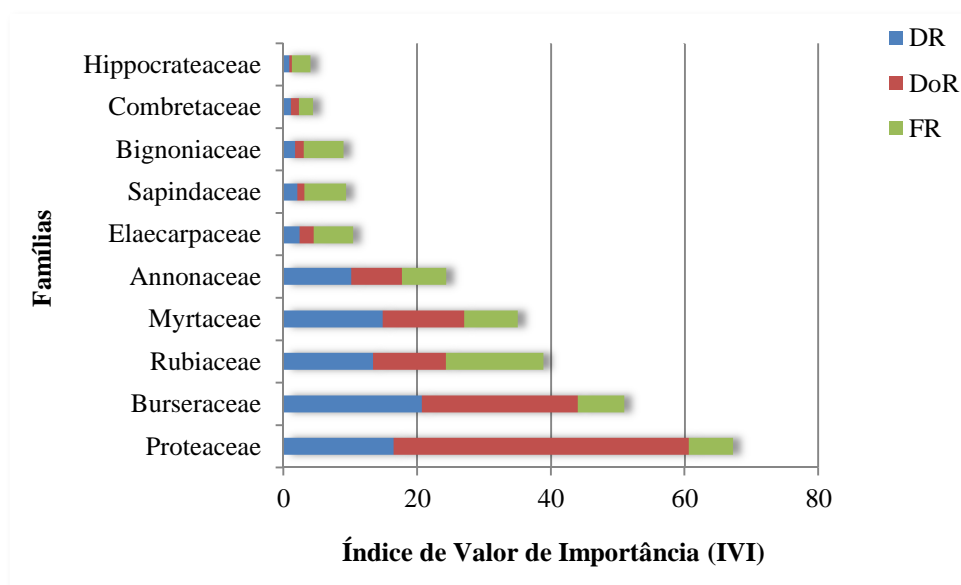


Figura 4.3 – Parâmetros fitossociológicos das 10 famílias amostradas com maior Índice de Valor de Importância (IVI). DR, DoR, e FR correspondem, respectivamente, à densidade, dominância e frequência relativas.

Comportamento semelhante foi constatado em relação à distribuição da riqueza florística. Mais de 50% do total de espécies amostradas se distribuem em apenas cinco famílias, representadas por *Burseraceae*, com 20,66% (568 indivíduos), *Proteaceae*, com 16,44% (452 indivíduos), *Myrtaceae*, com 14,84% (408 indivíduos), *Rubiaceae*, com 13,39% (368 indivíduos) e *Annonaceae*, com 10,15% (279 indivíduos). Outros estudos já apontavam para a baixa riqueza encontrada em trechos florestais da borda sul amazônica, como demonstrado por Ivanauskas et al. (2004b), onde apenas seis das 47 famílias contribuíram para aproximadamente 40% da riqueza total dos 134 indivíduos inventariados.

Na Figura 4.4 pode ser observada a distribuição diamétrica do conjunto total dos indivíduos arbóreos ($n = 2749$), em classes de diâmetro com intervalos de 10 cm. A estrutura diamétrica do povoamento apresentou o padrão habitual de florestas inequidâneas (J-invertido), demonstrando um equilíbrio entre o recrutamento e a mortalidade de árvores. Foi possível observar uma alta concentração de árvores nas primeiras classes de diâmetro, com aproximadamente 82% dos indivíduos concentrados nas classes de 5 a 25 cm.

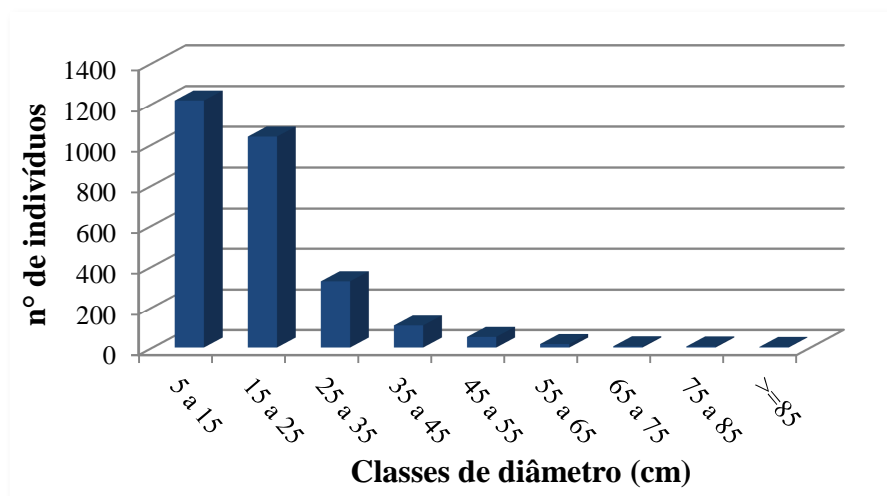


Figura 4.4 – Distribuição diamétrica dos indivíduos arbóreos amostrados na área florestal da Fazenda Tanguro, Querência (MT).

Na Tabela 4.2 são apresentados os parâmetros fitossociológicos das espécies amostradas por ordem alfabética de famílias. É possível verificar que as cinco espécies com maior valor de importância foram: *Protium brasiliense* (Spreng.) Engl. (16,95%), *Roupala montana* var. *brasiliensis* (Klotzsch) K. S. Edwards (14,69%), *Blepharocalyx salicifolius* (Kunth) O. Berg (11,11%), *Xylopia emarginata* Mart. (8,1%) e *Alibertia edulis* (Rich) A. Rich. (7,25%). Ainda, estas espécies representaram 15% da densidade total observada.

Tabela 4.2 – Parâmetros fitossociológicos das espécies arbóreas amostradas na área florestal da Fazenda Tanguro, Querência (MT), com o respectivo número de árvores (N), densidade absoluta (DA), densidade relativa (DR), dominância absoluta (DoA), dominância relativa (DoR), frequência absoluta (FA), frequência relativa (FR) e Índice de Valor de Importância relativo (IVI), por ordem alfabética de famílias.

Famílias e Espécies	N	DA	DR	DoA	DoR	FA	FR	IVI%
Anacardiaceae								
<i>Tapirira guianensis</i> Aubl.	2	0,4	0,07	0,032	0,16	10	0,7	0,31
Annonaceae								
<i>Xylopia emarginata</i> Mart.	279	55,8	10,15	1,438	7,45	95	6,6	8,07
Apocynaceae								
<i>Aspidosperma nobile</i> Müll.Arg.	2	0,4	0,07	0,005	0,02	5	0,35	0,15
<i>Himatanthus articulatus</i> (Vahl) Woodson	5	1	0,18	0,018	0,09	20	1,39	0,56
Araliaceae								
<i>Didymopanax morototonii</i> (Aubl.) Dcne. et Planch	10	2	0,36	0,088	0,46	35	2,44	1,09
Bignoniaceae								
<i>Tabebuia serratifoli</i> (Vahl) Nich.	2	0,4	0,07	0,01	0,05	10	0,7	0,27
<i>Jacaranda copaia</i> ssp. <i>spectabilis</i> (Mart. ex A. DC.) A. H. Gentry	6	1,2	0,22	0,108	0,56	15	1,05	0,61
<i>Tabebuia serratifolia</i> (Vahl) Nichols.	41	8,2	1,49	0,146	0,76	60	4,18	2,14
Boraginaceae								
<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz e Pav.) Oken	4	0,8	0,15	0,014	0,07	5	0,35	0,19
Burseraceae								
<i>Protium brasiliense</i> (Spreng.) Engl.	568	113,6	20,66	4,43	22,94	100	6,97	16,86
Combretaceae								
<i>Terminalia glabrescens</i> Mart.	31	6,2	1,13	0,259	1,34	30	2,09	1,52
Elaeocarpaceae								
<i>Sloanea cf. guianensis</i> (Aubl.) Benth.	66	13,2	2,41	0,364	1,88	85	5,92	3,4
Hippocrateaceae								
<i>Salacia amygdalina</i> Peyr.	25	5	0,91	0,076	0,39	40	2,79	1,36
Leguminosae mimosoideae								
<i>Enterolobium schomburgkii</i> Benth.	8	1,6	0,29	0,23	1,19	35	2,44	1,31
Malpighiaceae								
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	24	4,8	0,87	0,131	0,68	15	1,05	0,87
Malvaceae								

Continua

	Conclusão							
<i>Luehea paniculata</i> Mart. & Zucc.	6	1,2	0,22	0,06	0,31	15	1,05	0,52
Myrtaceae								
<i>Blepharocalyx salicifolius</i> (Kunth) O. Berg	395	79	14,37	2,162	11,19	100	6,97	10,84
<i>Gomidesia lindeniana</i> Berg.	13	2,6	0,47	0,032	0,17	15	1,05	0,56
Papilionaceae								
<i>Andira vermifuga</i> Mart. ex Benth.	1	0,2	0,04	0,003	0,02	5	0,35	0,13
Proteaceae								
<i>Roupala Montana</i> var. <i>brasiliensis</i> (Klotzsch) K. S. Edwards	452	90,4	16,44	4,058	21,01	95	6,62	14,69
Rubiaceae								
<i>Ferdinandusa speciosa</i> Pohl	101	20,2	3,67	0,658	3,41	75	5,23	4,1
<i>Alibertia edulis</i> (Rich) A. Rich.	243	48,6	8,84	1,071	5,54	100	6,97	7,12
<i>Amaioua guianensis</i> Aublet	24	4,8	0,87	0,321	1,51	35	2,43	1,61
Sapindaceae								
<i>Talisia</i> cf. <i>esculenta</i> Aubl.	57	11,4	2,07	0,2	1,04	90	6,27	3,13
Simaroubaceae								
<i>Simarouba versicolor</i> St. Hil.	2	0,4	0,07	0,078	0,4	10	0,7	0,39

A caracterização das parcelas amostrais é apresentado no dendograma da Figura 4.5, referente ao resultado da análise de agrupamento (UPGMA) baseado no índice de Morisita. No conjunto de 20 parcelas amostrais inventariadas, houve a formação de dois grupos: um menor composto pelas parcelas P1, P2, P3 e P4, e outro grande grupo formado pelas demais parcelas inventariadas. O grupo formado pelas parcelas P1, P2, P3 e P4, correspondem exatamente àquelas com maior índice de Shannon (H') (Tabela 4.3). As parcelas P10, P11 e P14, P15 apresentaram os maiores valores de similaridade entre elas. Mesmo distantes, as parcelas P10 e P11 apresentaram a mesma espécie dominante (*Protium brasiliense*), podendo indicar uma homogeneidade em relação às características florísticas da área (Figura 4.6). Em relação às parcelas P14 e P15, os

índices de Shannon (H') e a Equabilidade de Pielou (J) foram praticamente os mesmos (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Número total de árvores de cada parcela amostral do inventário florestal, com o respectivo valor do índice de Shannon (H') e Equabilidade de Pielou (J).

Parcelas	n° de árvores	Índice Shannon-Weaver (H')	Equabilidade Pielou
1	117	2,50	0,81
2	138	2,41	0,83
3	160	2,56	0,85
4	147	2,37	0,90
5	132	2,20	0,79
6	133	2,29	0,89
7	100	2,16	0,84
8	136	2,22	0,84
9	181	2,06	0,76
10	179	2,08	0,79
11	165	2,18	0,83
12	128	2,01	0,79
13	139	2,00	0,81
14	146	1,65	0,72
15	140	2,00	0,78
16	116	2,02	0,84
17	143	1,93	0,71
18	130	2,05	0,80
19	101	1,94	0,73
20	118	2,11	0,82

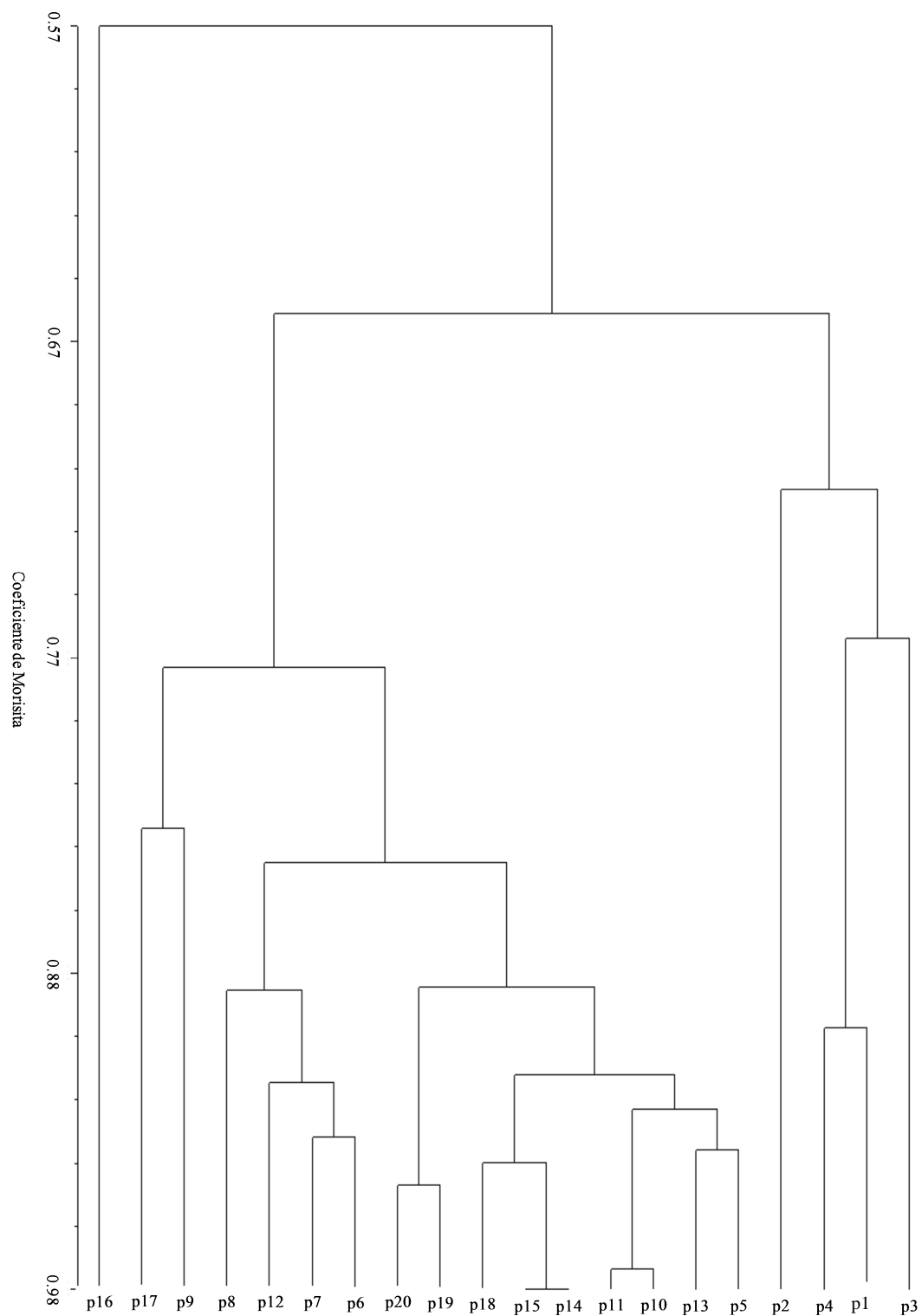


Figura 4.5 – Dendrograma obtido a partir do índice de Morisita. Método de ligação: UPGMA.

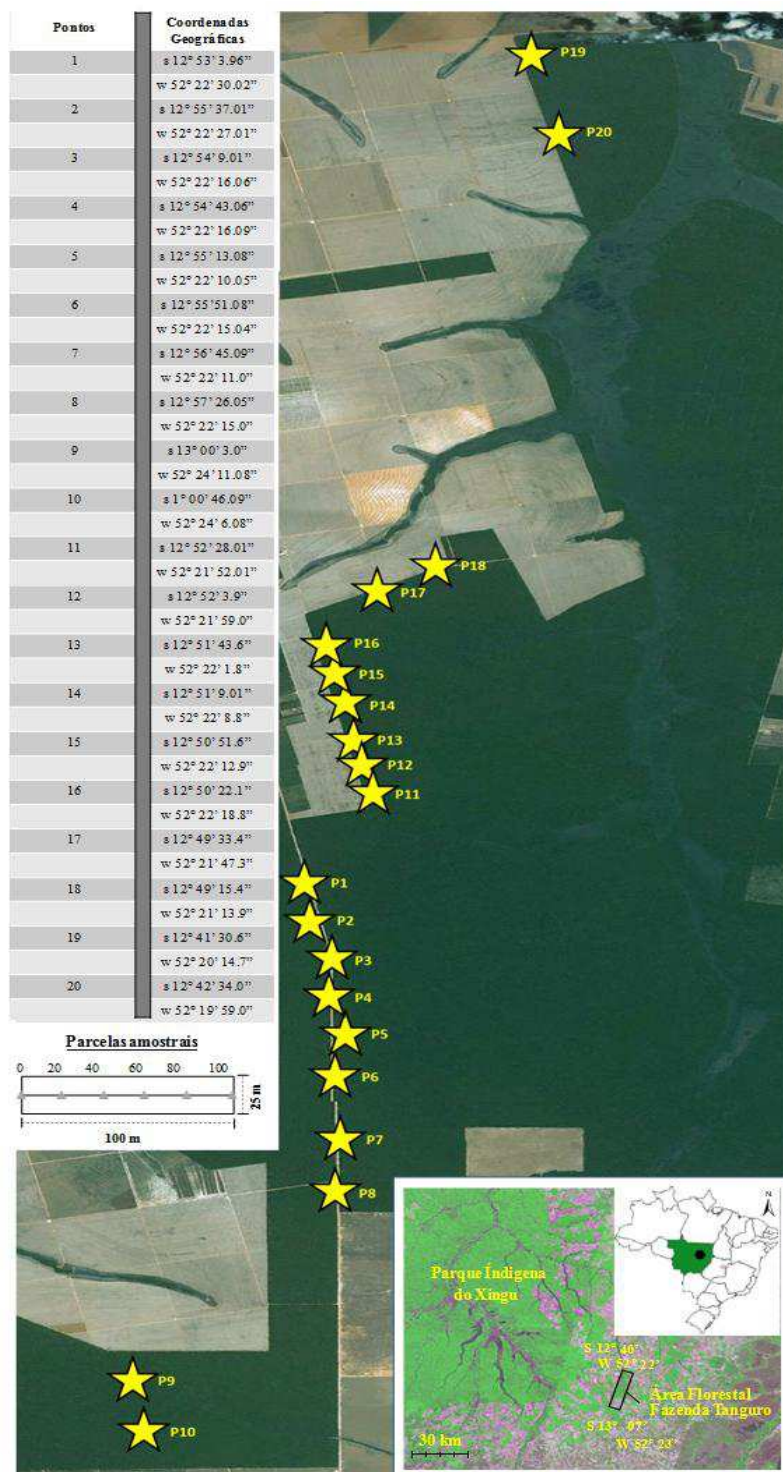


Figura 4.6 – Distribuição geográfica das parcelas amostrais na Fazenda Tanguro em Querência (MT).

Para uma melhor interpretação da estrutura nas diferentes parcelas amostrais, a Figura 4.7 mostra as distribuições diamétricas e os valores médios de HT por classe de DAP para cada parcela. As distribuições diamétricas apresentaram pouca variabilidade nos padrões estruturais encontrados para as parcelas amostrais, o que é decorrente do fato da área de coleta estar inserida dentro dos limites de uma área privada, o que evidentemente, faz com que os efeitos antrópicos atuantes e intrusões associadas a diferentes formas de manejo sejam menores. Este fato se constitui em mais um elemento corroborador para relacionar a área amostral à área do PIX, que se encontra preservado, configurando uma mesma unidade tipológica de floresta estacional semidecidual (dossel emergente).

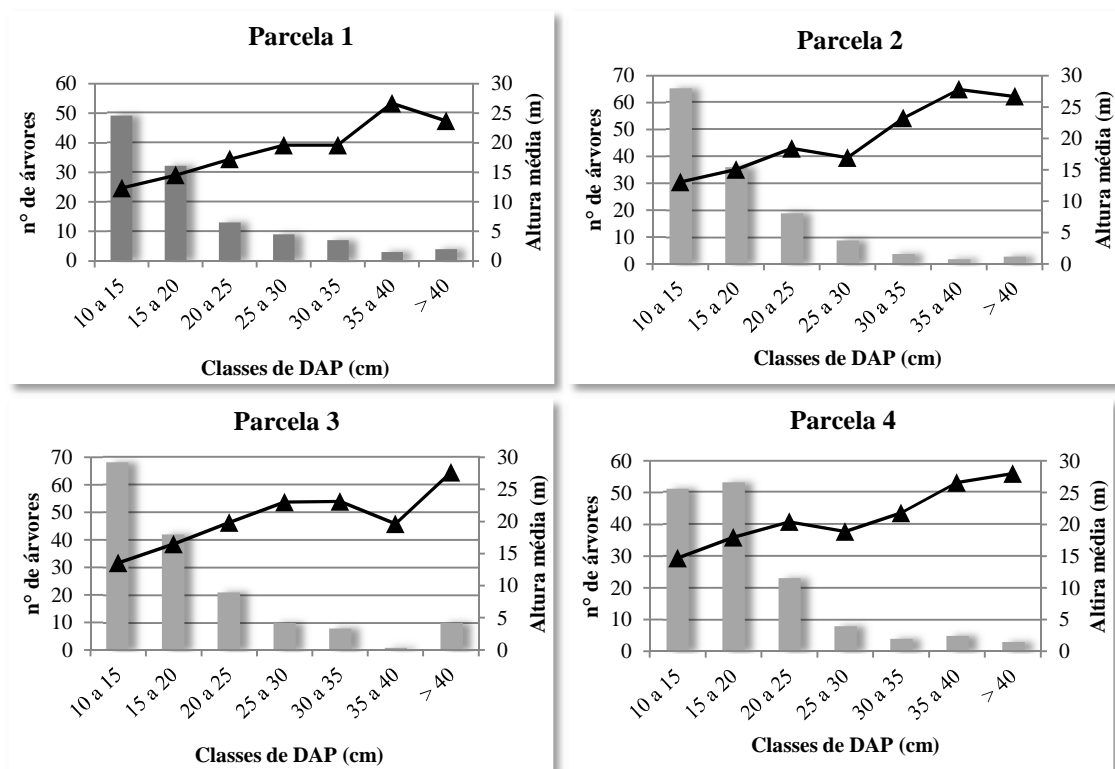


Figura 4.7 – Distribuição diamétrica, valores médios de HT por classe de DAP estimados para cada parcela amostral. (Continua)

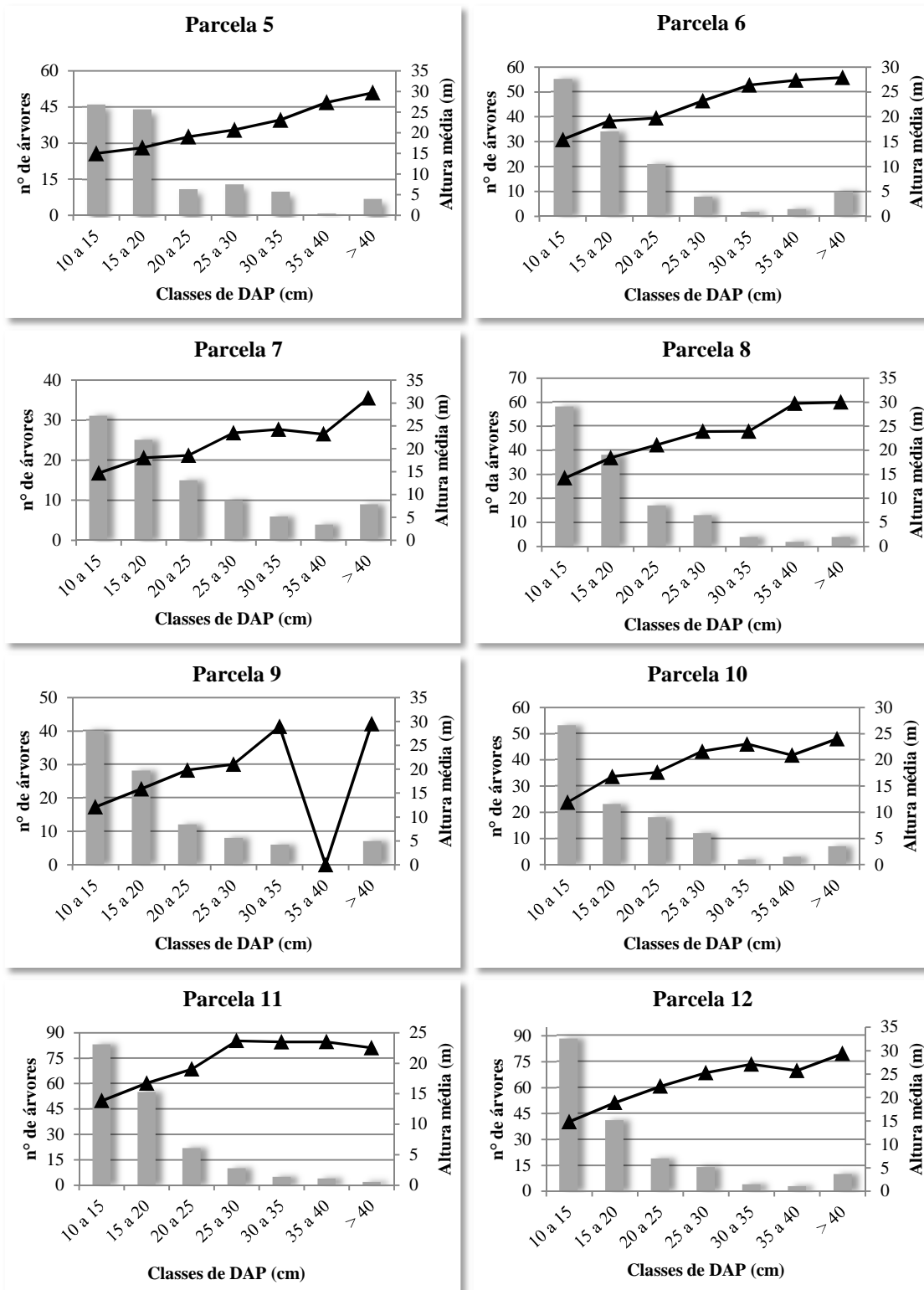


Figura 4.7 – Continuação. (continua)

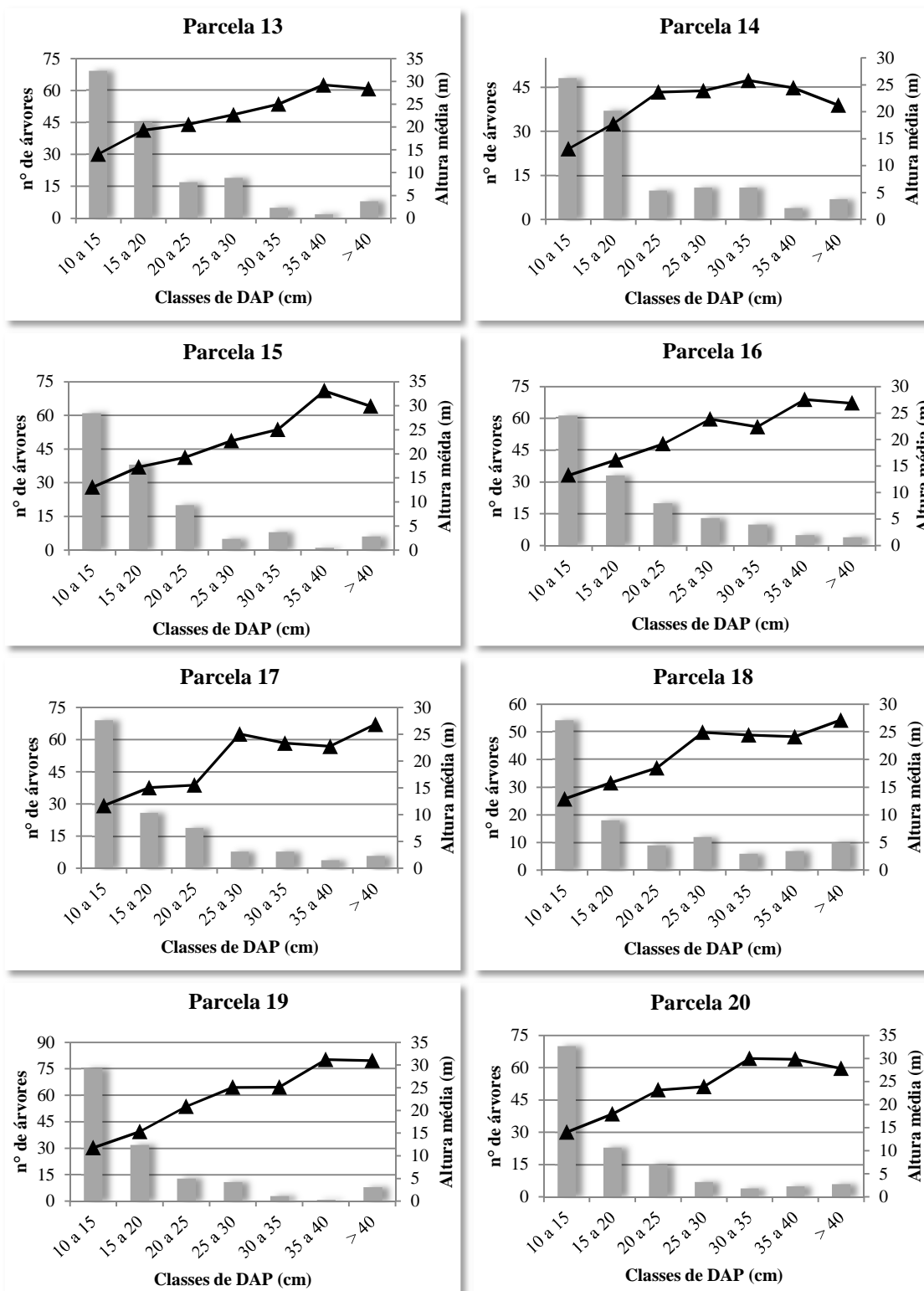


Figura 4.7 – Conclusão.

Os indivíduos arbóreos que apresentaram concentração de DAP entre 10 a 20 cm foram encontrados nas parcelas P11 e P12. Em relação ao componente arbóreo com a estrutura mais desenvolvida, as parcelas P7 e P18 foram as que apresentaram os indivíduos com maiores HT e DAP médios.

Os valores médios das variáveis biofísicas apresentaram baixa amplitude de variação média (DAP = 4,64 cm; HT = 4,44 m) na análise de todas as parcelas amostrais em conjunto. Aliado a esta amplitude de variação, o teste não paramétrico K-S indicou a ocorrência de diferenças significativas nas funções densidade de probabilidade (fdp's) para a HT e para o DAP ($p < 0,05$). Um maior número de distribuições diferentes foi encontrado para HT que para DAP. No entanto, de maneira geral, o teste mostrou que as fdp's provêm de distribuições diferentes, para os dois parâmetros biofísicos analisados, ao nível de 5% de significância.

4.2. Análise intra-anual das variações do EVI na estação seca

Nesta seção serão discutidos os efeitos de direção e de visada que afetam a reflectância dos alvos na área de estudo. Os resultados apresentados na seção anterior apontaram para variações associadas à florística e a estrutura, em determinado nível de significância, na floresta estacional semidecidual na região de Querência, próximo a borda sul do PIX. Apesar do trecho amostrado não estar geograficamente localizado no interior do PIX, esta é representativa da mesma tipologia florestal, de acordo com o mapa base utilizado (SIVAM, 2002). Estas sutis variações florístico-estruturais certamente podem estar presentes no interior do PIX. Porém, devido à resolução espacial do sensor MISR (1.1 km), tais variações observadas em detalhe na análise de campo, não têm o mesmo peso significativo que possa influenciar a resposta espectral do alvo florestal. Em outras palavras, devido a resolução espacial do sensor utilizado, estas variações florístico-estruturais não puderam ser detectadas através da variação espectral, sendo necessário um sensor de melhor resolução espacial para sua adequada avaliação. Diante disto, as variações encontradas na análise de campo não foram consideradas nas análises posteriores com o MISR, mas estão sendo avaliadas com o sensor

hiperespectral Hyperion/EO-1 (198 bandas calibradas na faixa de 400 a 2500 nm e 30 m de resolução espacial).

4.2.1. Efeitos da geometria de visada no EVI

A Figura 4.8 apresenta os perfis espectro angulares das bandas espectrais do azul, vermelho e do IVP do MISR para as datas de 12 agosto de 2005 e 10 de agosto de 2010 na floresta estacional semidecidual na região do PIX. Verifica-se um aumento da reflectância da região do espalhamento frontal para a região do retro-espalhamento, o qual apresenta variabilidade em torno de 20% no valor de reflectância para a banda do IVP na configuração de visada entre $\pm 45,6^\circ$. A configuração do perfil espectro-angular da Figura 4.8 representa o padrão de transição entre os componentes sombreados e iluminados dos dosséis vistos pelo sensor MISR ou pelas câmeras Aa-Ba e Af-Bf, respectivamente. Conforme descrito por Galvão et al. (2011), a seleção de pixels MODIS de boa qualidade e em visadas próximas ao nadir são mais bem sucedidas durante a estação seca, devido a menor frequência de nuvens. No entanto, no início e no final da estação seca, a seleção de pixels ao nadir é mais difícil e eles podem ser oriundos de ângulos de visada maiores que 20° . Isto de fato ocorreu nos produtos MOD13Q1 (MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250-m SIN Grid V005) da região de estudo, conforme reportado por estes autores.

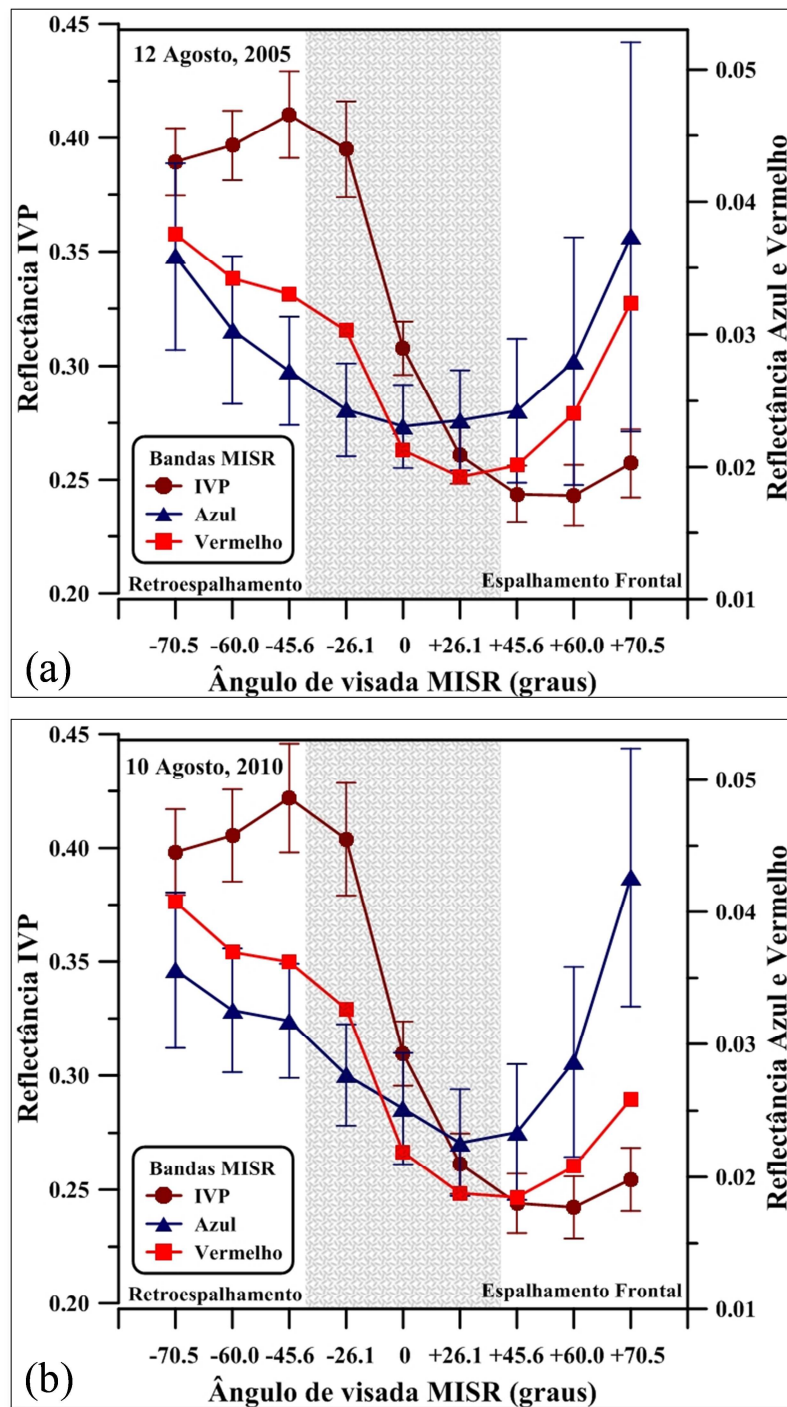


Figura 4.8 – Efeitos dos ângulos e da direção de visada nas médias e desvio padrão da reflectância nas bandas do azul, vermelho e infravermelho do MISR para a floresta estacional semidecidual do PIX para as datas de 12 de agosto de 2005 (a) e 10 agosto de 2010 (b).

Também foi possível observar que o EVI apresentou o mesmo comportamento em relação ao perfil espectral do IVP (Figura 4.9), com o aumento de EVI da região do espalhamento frontal (maiores proporções de área sombreadas vistas pelo sensor MISR) para a região do retro-espalhamento (maiores proporções de dosséis iluminados pelo Sol). No entanto, para o NDVI, foi observada a presença de maiores valores no ângulo de $+26,1^\circ$ (espalhamento frontal), quando comparado com os ângulos na região do retro-espalhamento. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Epiphanyo e Huete (1995) e Breunig et al. (2011). Também é possível verificar que o EVI sofre um impacto maior, em relação ao NDVI, em termos de sensibilidade à variação de visada entre a região do retro-espalhamento e a do espalhamento frontal, especialmente para as visadas entre $\pm 45,6^\circ$ (área sombreada na Figura 4.9). Nesta faixa angular, o EVI muda substancialmente, enquanto que o NDVI apresenta pequena variação.

Esta maior sensibilidade do EVI à geometria de visada, quando comparado com o NDVI, foi também verificada em outros trabalhos (GALVÃO et al., 2011; SIMS et al., 2011). Os efeitos direcionais e angulares introduzem variações nos índices de vegetação que não estão necessariamente associadas às características físicas, ou à atividade fotossintética dos dosséis. De maneira geral, para os dois índices, pode-se verificar a ocorrência de incertezas, representadas pelos altos valores de desvio padrão, principalmente nas visadas extremas ($\pm 60,0^\circ$ e $\pm 70,5^\circ$).

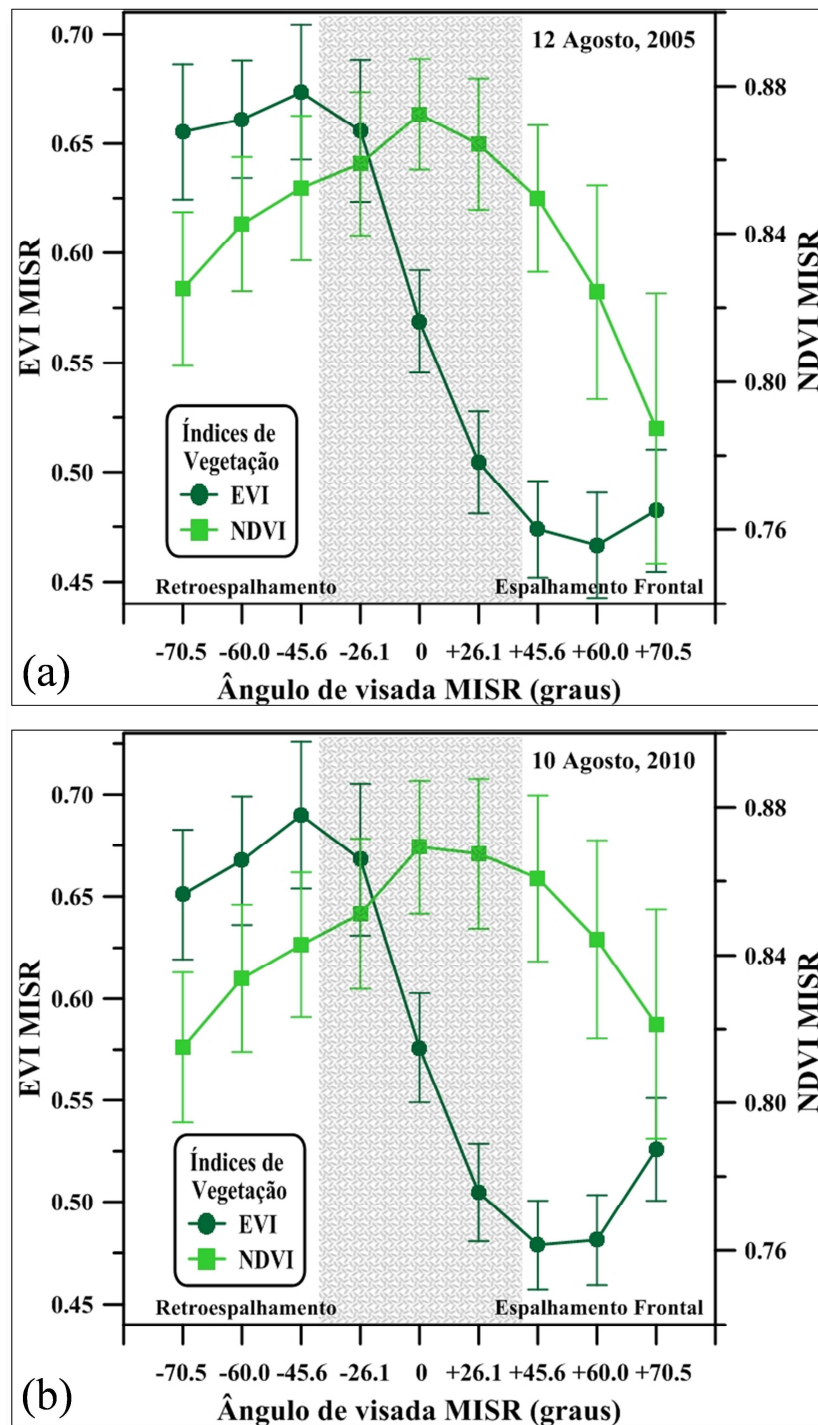


Figura 4.9 – Efeitos dos ângulos e da direção de visada nas médias e desvio padrão dos índices EVI e NDVI do MISR para a floresta estacional semidecidual do PIX para as datas de 12 de agosto de 2005 (a) e 10 agosto de 2010 (b).

O comportamento semelhante das curvas espectrais do EVI (Figura 4.9) e do IVP (Figura 4.8) resulta de uma alta correlação entre eles, como apresentado na Figura 4.10. Em relação aos coeficientes de correlação entre o EVI e a reflectância das outras bandas espectrais utilizadas na sua geração (azul e vermelho), em sua maioria não foram significativas ao nível de 0,01 (Tabela 4.4). Por outro lado, o EVI apresentou alta correlação positiva com a reflectância da banda do IVP, para todas as configurações de visada do sensor MISR.

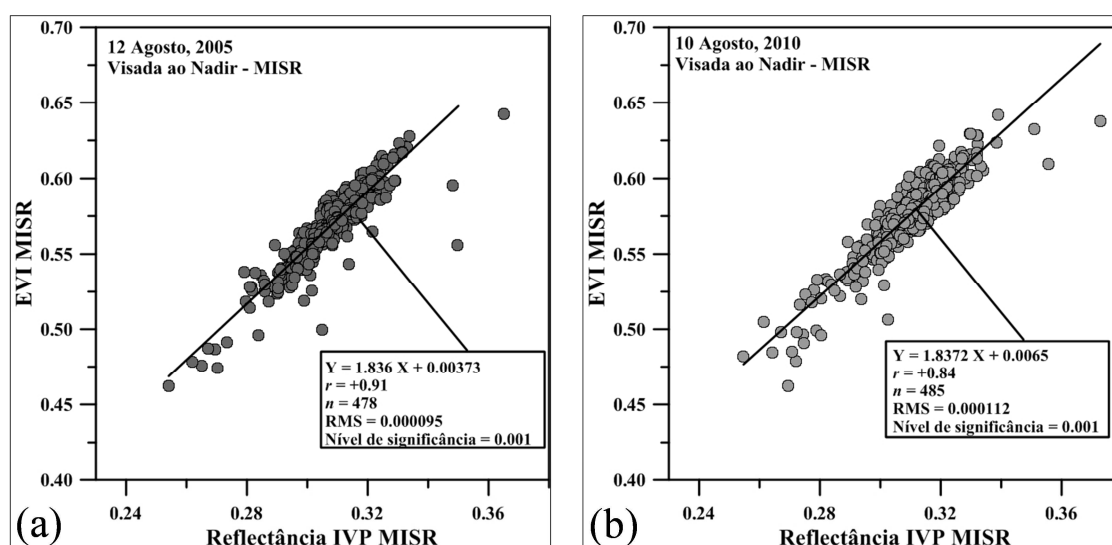


Figura 4.10 – Correlações entre o EVI e a reflectância da banda espectral do IVP para as datas de 12 de agosto de 2005 (a) e 10 de agosto de 2010 (b).

Tabela 4.4 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) para o EVI e a reflectância das bandas utilizadas em seu cálculo (azul, vermelho e IVP) para todas as configurações de visada do sensor MISR na data 12 de agosto de 2005.

Bandas MISR	Câmeras MISR (Ângulos de Visada)								
	Df (-70.5°)	Cf (-60.0°)	Bf (-45.6°)	Af (-26.1°)	An (0°)	Aa (+26.1°)	Ba (+45.6°)	Ca (+60.0°)	Da (+70.5°)
Azul (r)	+0.37	+0.22	+0.02	+0.14	+0.28	+0.26	+0.42	+0.41	+0.41
Vermelho (r)	-0.28	-0.35	-0.47*	-0.53*	-0.40	-0.14	+0.24	+0.27	+0.01
IVP (r)	+0.77*	+0.83*	+0.91*	+0.93*	+0.91*	+0.90*	+0.89*	+0.91*	+0.75*

*Nível de significância a 0,01.

4.2.2. Variações intra-anuais e efeitos de iluminação solar no EVI

Em concordância com os resultados mostrados anteriormente, a variabilidade intra-anual do EVI durante a estação seca da floresta estacional semidecidual na região do PIX para todo o período analisado (2005 a 2010) foi expressa por menores valores de EVI na região do espalhamento frontal e maiores valores na região do retro-espalhamento. Este aumento na região do retro-espalhamento está associado à configuração geométrica, ou à maior quantidade de radiação detectada pelo MISR no IVP pela predominância de componentes iluminados do dossel vistos pelo sensor.

Associado à influência da visada no aumento da reflectância espectral do IVP e, conseqüentemente do EVI, verificou-se um aumento gradual deste índice do início para o final da estação seca. Para a visada ao nadir, este aumento parece estar relacionado com a diminuição do AZS do início para o final da estação seca (Figura 4.11). Para visadas fora do nadir, os efeitos são mais complexos. Pode-se observar no ângulo de visada de $-45,6^\circ$ o aumento do EVI até junho (pseudo “*green-up*”), associado a configuração angular do AZS (43°) próximo ao efeito *hot spot*. Posteriormente, ocorre a diminuição do EVI (pseudo “*browning*”), já para o final da estação seca (setembro, AZS = 28°). Estes resultados estão em concordância com os encontrados por Galvão et al. (2011), com dados MODIS/TERRA e Hyperion/EO-1. Os dados EVI MISR ao nadir, calculados sobre a floresta estacional semidecidual na região do PIX, também foram afetados pelos efeitos de iluminação solar, aumentando do início para o final da estação seca, onde a variabilidade do AZS diminuiu de 43° para 28° .

Padrões ainda mais complexos foram encontrados para ângulos de visada extremos ($\pm 60,0^\circ$ e $\pm 70,5^\circ$) na direção do retroespalhamento. Devido a estes ângulos apresentarem perfis espectrais ambíguos e incertos, os resultados para estas configurações de visada não foram considerados na análise. No entanto, a representação dos dados nos ângulos de visada até $\pm 45,6^\circ$ permitiu avaliar de maneira consistente as influências na resposta espectral associada com variações angulares.

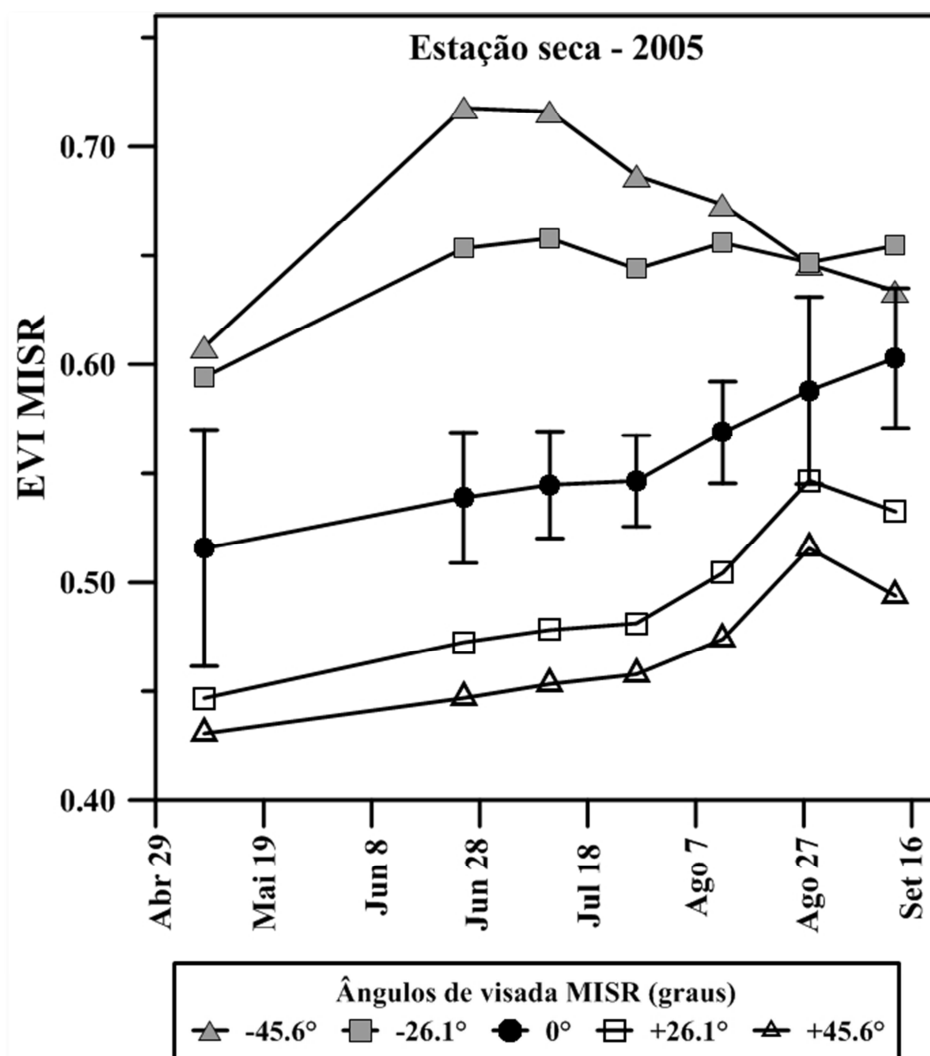


Figura 4.11 – Variações intra-anuais do EVI da floresta estacional semidecidual na região do PIX para cinco ângulos de visada do sensor MISR (Câmeras Bf, Af, Na, Aa e Ba) durante a estação seca de 2005.

A Figura 4.12 mostra os efeitos de iluminação solar sobre os índices de vegetação EVI e NDVI na floresta estacional semidecidual na região do PIX. Os dados fazem referência às informações ao nadir do MISR. Com exceção do mês de maio, o qual apresentou o menor percentual de pixels válidos (Tabela 3.1), o EVI mostrou forte relação com o AZS. Verificou-se um aumento do EVI de junho (0,54) para setembro (0,60), acompanhando a diminuição do AZS. Os resultados encontrados para o NDVI apresentam variação muito menor (de 0,86 em maio a 0,88 em setembro). Este mesmo

padrão foi encontrado quando analisado as curvas do EVI com o IVP, devido à alta correlação do EVI com a resposta desta banda espectral. Estes resultados estão em concordância com aqueles encontrados por Galvão et al. (2011) na região do PIX usando dados MODIS e Hyperion.

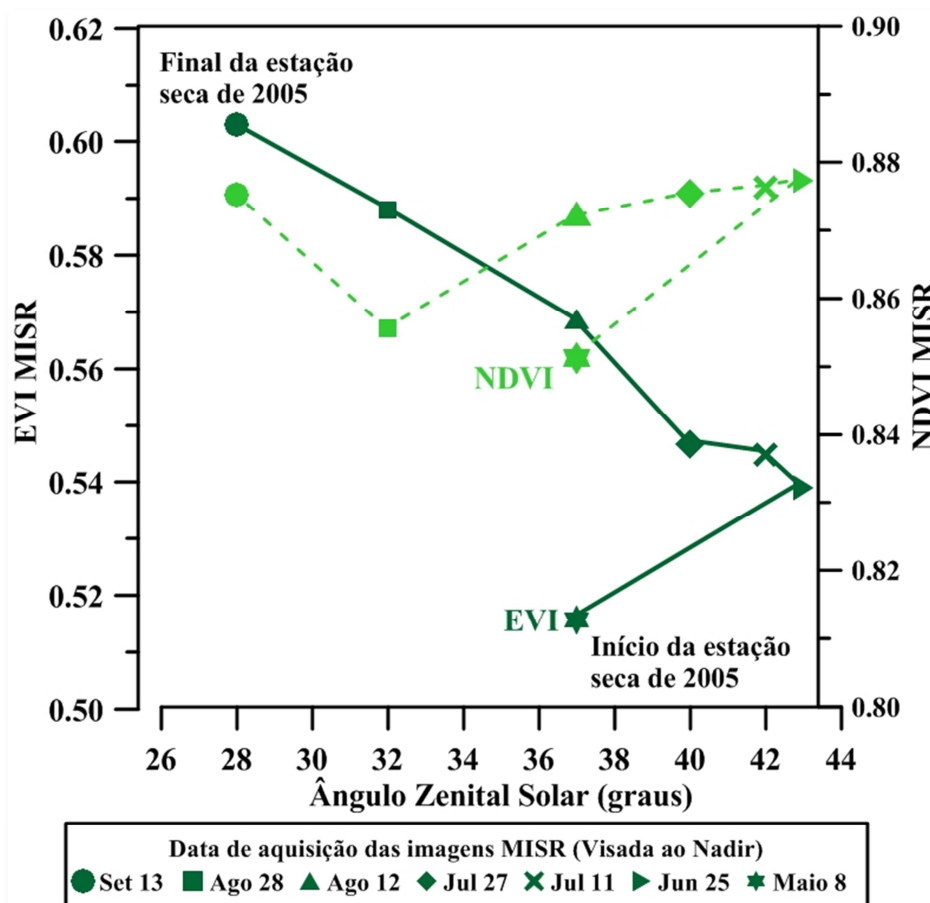


Figura 4.12 – Efeitos intra-anuais da iluminação solar sobre os índices EVI e NDVI a partir da câmera ao nadir do sensor MISR na floresta estacional semidecidual na região do PIX.

Resultados obtidos da aplicação do MLME confirmaram os efeitos de iluminação solar sobre os dados EVI MISR, com a câmera ao nadir (Figura 4.13). Foi encontrada uma alta correlação inversa entre os dados EVI e os valores da imagem-fração sombra ($r = -0,96$), para as imagens das datas 11 de julho (AZS = 42°) e 13 de setembro (AZS = 28°), no ano de 2005. Pode-se observar que do início para o final da estação seca (julho a setembro), a fração sombra diminuiu, enquanto que os valores de EVI aumentaram. Isto está associado à influência da variação do AZS nas informações espectrais da banda

do IVP. Por estar fortemente correlacionado com o EVI, a reflectância do IVP e o índice aumentam com a diminuição do sombreamento causado pela redução do AZS do início para o final da estação seca.

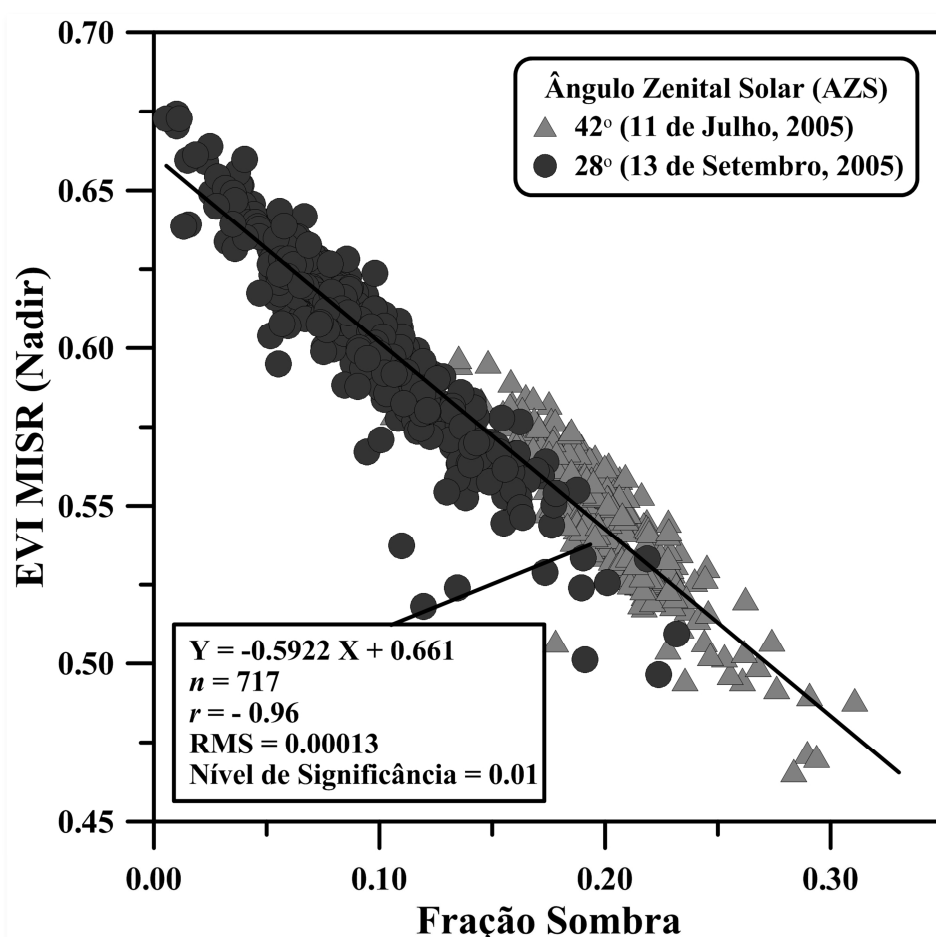


Figura 4.13 – Relação entre o EVI e a fração sombra, derivada do MLME, para duas imagens MISR ao nadir sobre a floresta estacional semidecidual na região do PIX, com diferentes configurações de AZS (julho e setembro de 2005).

4.3. Análise inter-anual das variações do EVI na estação seca

4.3.1. Variabilidade inter-anual do EVI entre anos secos (2005 e 2010) e não secos (2006 a 2009)

Embora os efeitos de iluminação solar contribuam para explicar variações intra-anuais na estação seca da Floresta Estacional Semidecidual, para imagens MISR adquiridas ao nadir, estes efeitos não explicam a variabilidade inter-anual do EVI associada a eventos

de secas severas. A variabilidade relacionada com as secas de 2005 e 2010 foi reportada por Saleska et al. (2007) e Xu et al. (2011), respectivamente, usando dados MODIS. Além dos efeitos atmosféricos ressaltados por Samanta et al. (2010), os resultados do presente estudo (seção anterior) mostraram que as variações no ângulo e na direção de visada são fatores potenciais para explicar o comportamento inter-anual do EVI visto na literatura.

Nesta seção, para remover os efeitos direcionais e de visada na interpretação dos resultados, utilizou-se somente a câmera ao nadir do MISR para análise da variabilidade inter-anual do EVI considerando as secas severas de 2005 e 2010 como referência. Na Figura 4.14, os perfis de EVI de anos secos e anos não secos para a visada ao nadir apresentaram padrões semelhantes, com curvas crescentes do início para o final da estação seca e pequena variação entre os meses de cada ano.

De maneira geral, a maioria dos anos analisados apresentou maior desvio padrão nos meses de início e final da estação seca (maio e setembro, respectivamente), devido à maior influência residual da atmosfera. Também se pode observar a não ocorrência de padrões distintos para os anos secos, ou seja, a resposta espectral da floresta estacional semidecidual foi aproximadamente a mesma em 2005 e 2010. Cabe ressaltar que, mesmo para 2007, ano que também apresentou baixa precipitação para a região do PIX (Figura 3.3), não foram encontradas variações decorrentes deste evento específico, apresentando comportamento semelhante aos demais anos analisados.

Resultados semelhantes foram encontrados recentemente por Atkinson et al. (2011), através da análise temporal de dado MODIS/Terra. Os autores verificaram que não ocorreu comportamento anômalo do EVI e NDVI nos anos secos em relação aos anos não secos. Segundo eles, as variações de *greening* (SALESKA et al., 2007) em 2005 e de *browning* (XU et al., 2011) em 2010 não podem ser explicados pelas secas severas que ocorreram nestes dois anos.

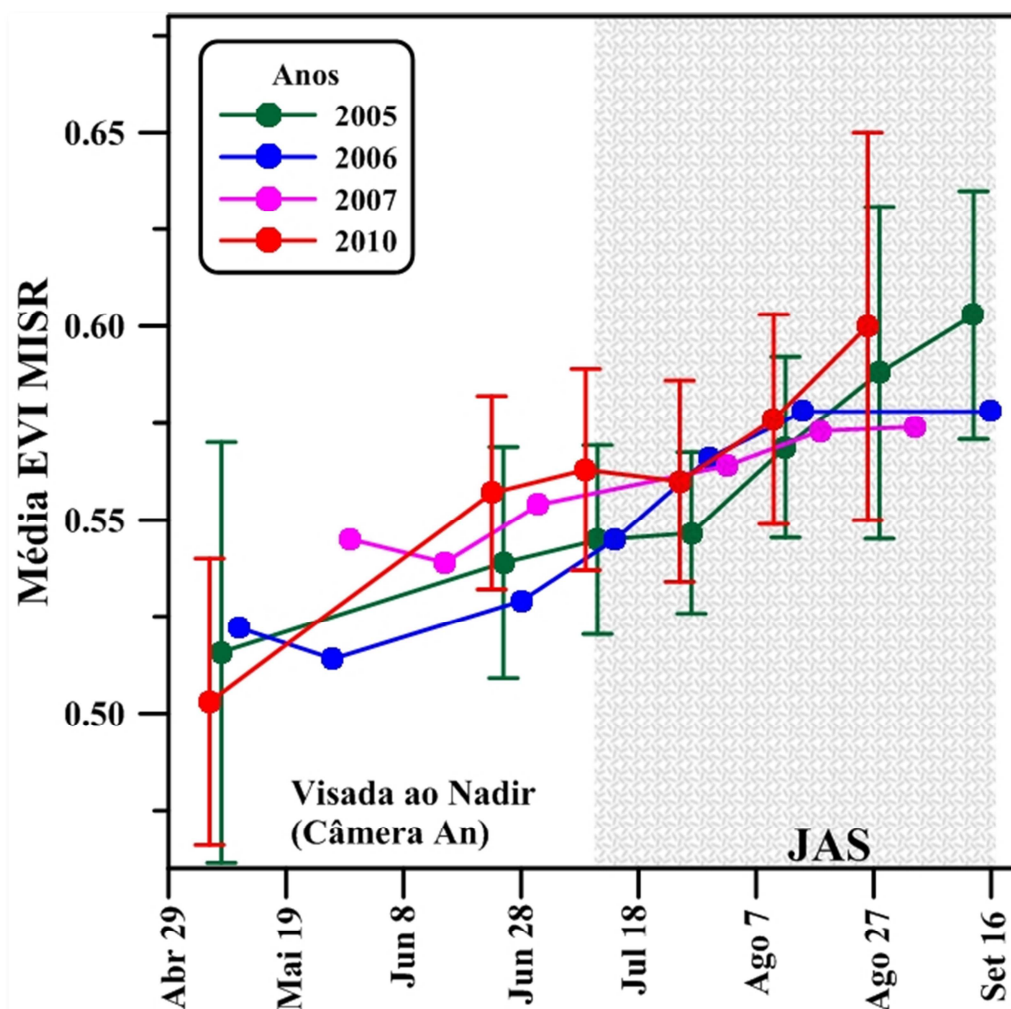


Figura 4.14 – Variabilidade inter-anual dos valores médios de EVI na floresta estacional semidecidual na região do PIX para dois anos de seca severa (2005 e 2010) e dois anos não secos (2006 e 2007). A parte sombreada refere-se ao trimestre julho, agosto e setembro.

4.3.2. Diferenças e padronização do EVI entre anos secos e não secos

A Figura 4.15 apresenta diferenças de EVI para os pares de meses de datas mais próximas entre os anos 2005 – 2006 e 2010 – 2006. Os resultados são baseados em um subconjunto de pixels com localização geográfica comum entre as imagens da câmera ao nadir do sensor MISR. Pode-se verificar que as diferenças de EVI entre os pares de anos secos (2005 e 2010) e o ano não seco (2006) apresentaram variabilidades aleatórias

entre os meses, não necessariamente associadas às mudanças bruscas na fisiologia da vegetação na floresta estacional semidecidual.

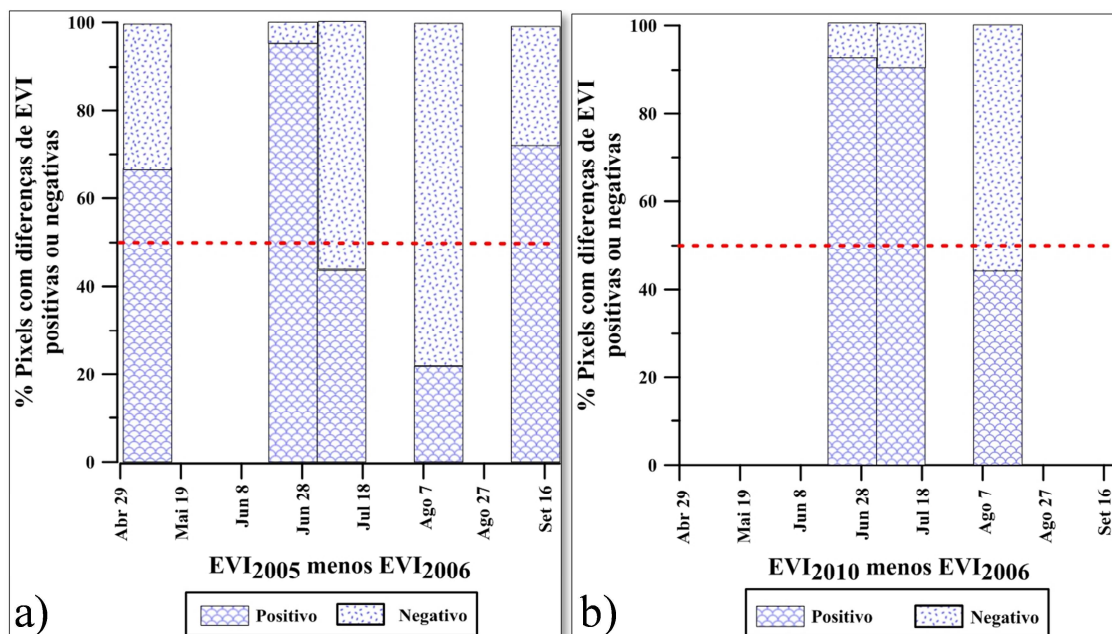


Figura 4.15 – Porcentagem de pixels com diferenças positivas ou negativas de EVI para a floresta estacional semidecidual entre pares de meses para os anos de (a) 2005 (08 de maio; 25 de junho, julho 11, agosto 12, setembro 13) e 2006 (11 de maio; 28 de junho, julho 14, agosto 15, setembro 16) e (b) 2010 (23 de junho; 09 de julho; 10 de agosto) e 2006 (28 de junho, julho 14, agosto 15).

Nas imagens-diferenças de EVI entre 2005 e 2006 não foram observados nenhuma tendência bem definida. Na Figura 4.15a, variações positivas de EVI foram predominantes para os meses de maio, junho e setembro (pseudo efeito “greening”; informações acima da linha de 50% no gráfico). Diferenças negativas de EVI foram encontradas em agosto (pseudo efeito “browning”; informações abaixo da linha de 50% no gráfico). Nas imagens-diferença de EVI entre 2010 e 2006, um padrão semelhante foi encontrado, porém com predomínio de diferenças positivas de EVI nos meses de junho e julho, que se tornaram diferenças negativas em agosto (Figura 4.15b). Também foi observado que essas diferenças não ultrapassaram $\pm 0,09$, indicando que grande parte da variabilidade dos dados entre os meses da Figura 4.15 é normal, estando dentro do desvio padrão médio observado para estes meses na Figura 4.14.

A maioria dos pixels apresentou diferenças de EVI abaixo do desvio padrão médio ($\pm 0,032$) calculado entre maio e setembro de 2005, sendo 50% dos pixels para maio; 98% para junho; 99% para julho, 90% para agosto e 92% para setembro. Para 2010, este mesmo padrão foi encontrado, com predomínio de variações dentro do desvio padrão médio ($\pm 0,034$): 73% dos pixels para junho, 90% para julho e 93% para agosto. Estas variações do desvio padrão médio de EVI em torno de $\pm 0,03$ para 2005 e 2010 são semelhantes às encontradas por Brando et al. (2010) ao analisar dados temporais (2000 a 2008) do sensor MODIS na bacia Amazônica.

Galvão et al. (2011) realizaram estudos na área da Fazenda Tanguro (MT), na borda sudeste do PIX, para estabelecerem estimativas de LAI a partir de fotografias hemisféricas, igualmente utilizadas no procedimento metodológico para avaliação da cobertura do dossel (Tabela 4.1) do presente estudo. Esses autores citados concluíram não haver variações significativas de LAI observadas no início e no final da estação, demonstrando que esta tipologia (floresta estacional semidecidual) apresenta um comportamento homogêneo quanto a sua característica física (aspectos fisionômico-estruturais). Na análise das imagens diárias do sensor MISR, as incertezas associadas às informações são relevantes, já que implicam na inserção de variabilidade nem sempre relacionada com as variáveis físicas observadas da vegetação. Estas incertezas são maiores no início e no final da estação seca, como pode ser observado pela presença de valores mais altos de desvio padrão (Figura 4.14), e sobretudo, pela maior perda de pixels decorrente do procedimento de análise de qualidade dos dados MISR.

A padronização dos dados EVI MISR ao nadir dos anos secos (2005 e 2010), em relação aos anos não secos (2006, 2007, 2008 e 2009), é apresentada na Figura 4.16. A partir desta padronização foi possível analisar com maior consistência as variações inter-anuais do EVI com geometria fixa de visada ao nadir. Pode-se verificar que as curvas gaussianas para os dois anos apresentaram pequena variabilidade (forma estreita da curva), porém com médias ligeiramente diferentes, ao nível de significância de 0,05 (teste-t). A média do EVI (Figura 4.16a) padronizada foi maior na seca de 2005 ($0,349 \pm 0,839$) comparada a seca de 2010 ($0,041 \pm 0,754$), para o trimestre julho, agosto e setembro (JAS). Apesar desta diferença, não houve evidência significativa de aumento

generalizado do EVI, ou dos efeitos associados ao *greening* em ampla escala em ambas as secas. Em sua maioria, a padronização para o ano de 2005 apresentou 81% de seus valores entre ± 1 desvio padrão da média, sendo verificado apenas um número muito pequeno de pixels de valores padronizados de EVI acima de 1,96 (3,1%). Isto indica que foi encontrado um número muito reduzido de pixels com diferenças significativas de EVI para o ano de 2005, ao nível de 0,05 de significância (teste-z). Em relação à seca de 2010, 87% dos pixels padronizados de EVI ficaram entre ± 1 desvio padrão da média e, ao nível de 0,05 de significância (teste-z), apenas 1% apresentaram diferenças significativas ($>1,96$).

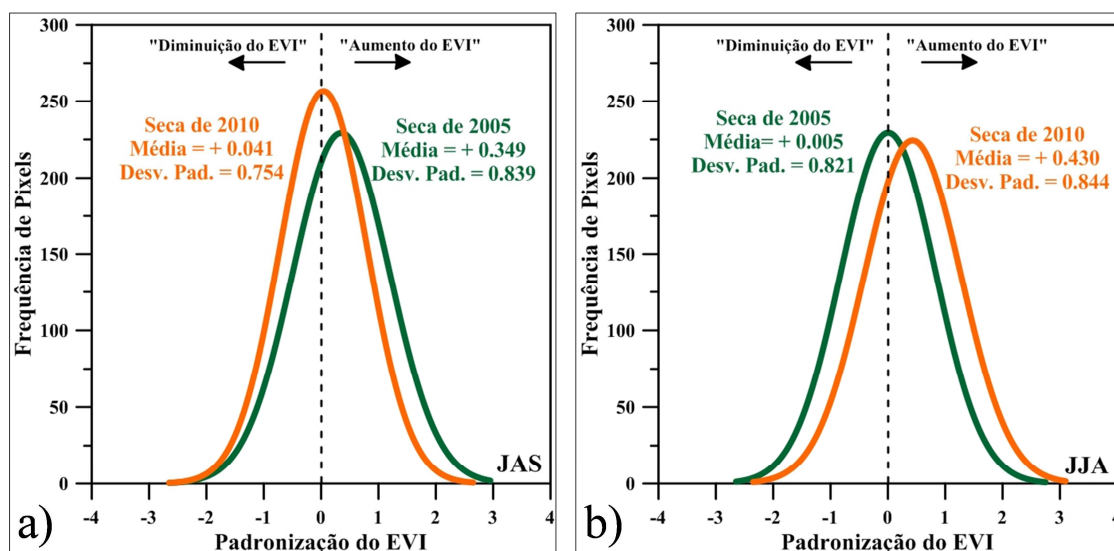


Figura 4.16 – Curvas gaussianas ajustadas para a distribuição dos dados EVI do sensor MISR ao nadir para os dois anos secos (2005 e 2010), padronizados em relação aos anos não secos (2006, 2007, 2008 e 2009). As variações inter-anuais foram calculadas para diferentes trimestres, onde (a) refere-se ao período de julho a setembro (JAS) e (b) de junho a agosto (JJA).

Além desta análise, o trimestre utilizado foi modificado (de JAS – junho, agosto e setembro para JJA – junho, julho e agosto) para avaliação adicional das incertezas (Figura 4.16b). Os resultados da análise da padronização dos dados EVI MISR ao nadir para os anos de 2005 e 2010 considerando o trimestre JJA apresentaram um padrão contrário àquele observado com o trimestre JAS. O ano seco de 2010 apresentou valor

médio de EVI ($0,430 \pm 0,844$) superior ao da seca de 2005 ($0,005 \pm 0,821$). Esta modificação no comportamento inter-anual do EVI, somente com a mudança do trimestre utilizado, está associada a diversos fatores, dentre eles: (1) a redução de incertezas produzidas por efeitos residuais na atmosfera, após mover a janela para os meses mais centrados no meio da estação seca e que possuem pixels de melhor qualidade (junho, julho e agosto); (2) a mudança na configuração original de valores EVI do trimestre JAS associada à retirada dos pixels que apresentavam baixa qualidade no produto *Land Quality Assurance*; e (3) também ao efeito da amostragem no trimestre JJA, que neste caso reduziu a amplitude do EVI entre o primeiro e o último mês utilizado na padronização. O EVI aumentou gradualmente do início para o final da estação seca (Figura 4.14).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A principal conclusão deste trabalho está relacionada à necessidade de correção dos efeitos bidirecionais na análise de séries temporais do EVI. Tais efeitos confundem a análise dos dados, podendo conduzir a interpretações errôneas sobre a existência inesperada de atividade fotossintética anômala no pico da seca em florestas tropicais ou decorrente de secas severas em relação a anos não-secos.

Em relação aos aspectos florístico-estruturais, os cinco hectares de floresta estacional semidecidual em Querência (MT) (borda sul do PIX) mostraram um número total de indivíduos de 2.749 árvores, distribuídas em 20 famílias botânicas e 26 espécies. Estes resultados apresentaram diversidade e parâmetros estruturais próximos aos descritos na literatura para a região da borda sul amazônica, com baixa riqueza florística, concentrada em um número pequeno de famílias botânicas, quando comparados com estudos em áreas florestais mais ao norte da bacia Amazônica. Outros estudos também apontam para a composição florística diferenciada em relação à flora presente nas formações de entorno de Floresta Ombrófila.

Através dos perfis espectro angulares do NDVI e EVI verificou-se que a sensibilidade associada à variação do índice, quando ocorre mudança no ângulo e na direção de visada, foi maior para o EVI que para o NDVI, especialmente entre $\pm 45,6^\circ$. Na análise intra-anual foi observado um aumento da reflectância da região do espalhamento frontal para a região do retro-espalhamento na configuração de visada entre $\pm 45,6^\circ$ para a banda do IVP, o qual representa o padrão de transição entre componentes sombreados e iluminados do dossel vistos pelo MISR. O EVI apresentou o mesmo comportamento em relação ao perfil espectral do IVP, o qual é explicado pela alta correlação positiva do EVI com a reflectância da banda do IVP, para todas as configurações de visada do sensor MISR.

A variabilidade intra-anual do EVI durante a estação seca da floresta estacional semidecidual na região do PIX para todo o período analisado (2005 a 2010), apresentou menores valores de EVI na região do espalhamento frontal e maiores valores na região do retro-espalhamento. Também foi observado um aumento gradual do EVI do início

para o final da estação seca, associado à variação do AZS. Em relação aos efeitos de iluminação solar, verificou-se um aumento do EVI de junho para setembro, acompanhando a diminuição do AZS, enquanto os resultados obtidos para o NDVI apresentaram uma variação menor. A alta correlação negativa ($r = -0,96$) do EVI com a imagem fração-sombra também confirmou os efeitos da iluminação solar sobre o EVI calculado da câmera MISR ao nadir.

As incertezas associadas às imagens do sensor MISR são bastante relevantes, já que inserem variabilidade nos dados que nem sempre está associada às variáveis biofísicas observadas. Estas incertezas são maiores no início e no final da estação seca. Isto decorre dos altos valores de desvio padrão serem encontrados para estes períodos e também da redução de pixels pelo procedimento de qualidade dos dados MISR. Devido a estas incertezas, a média padronizada EVI foi maior para a seca severa de 2005 ($0,349 \pm 0,839$) do que para o evento de 2010 ($0,041 \pm 0,754$). Porém, um simples procedimento de troca do trimestre utilizado (de julho, agosto e setembro para junho, julho e agosto) fez com que as médias se invertessem, sendo maior para 2010 ($0,430 \pm 0,844$) do que para 2005 ($0,005 \pm 0,821$). As variações inter-anuais de EVI observadas nas secas de 2005 e 2010 são produzidas por incertezas de aproximadamente $\pm 0,03$ nos dados EVI MISR associadas com a qualidade dos dados. Como resultado, pode-se afirmar que não há evidências de *greening* associadas às secas de 2005 e 2010 na floresta estacional semidecidual na região do Parque Índigena do Xingu. Tais incertezas estão próximas ao erro de 0,01 reportado para a determinação do EVI no produto MODIS MOD13Q1 (MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250-m SIN Grid V005).

Os resultados mostraram que o sensor MISR é uma alternativa com potencial único para o estudo da influência da geometria de aquisição de dados, visando à melhor compreensão da resposta da vegetação a eventos de secas severas. Em conjunto com os produtos gerados pelo sensor MODIS e com o devido suporte de campo, os dados MISR podem fornecer um amplo e interessante conjunto de dados de sensoriamento remoto para a resolução das controvérsias existentes sobre a vulnerabilidade da floresta tropical aos eventos de secas severas. Entretanto, devido às características intrínsecas

derivadas da resolução espacial do sensor MISR, não foi possível analisar a influência das características florístico-estruturais na variabilidade do EVI, apesar destas características serem passíveis de influenciarem as informações espectrais de alvos florestais, em condições de uso de sensores com resolução mais fina.

Ainda nessa análise da variabilidade espectral nos dados MISR, a posição dos pixels durante as análises adotadas no presente trabalho permaneceu constante, porém o número de pixels válidos variou entre as datas, não permitindo uma análise espacial contínua da tipologia florestal. Estudos mais direcionados nessa linha de investigação devem ser futuramente realizados, explorando as variabilidades introduzidas pelas características florístico-estruturais e aquelas observadas nas informações espectrais, considerando como produto de análise as imagens Hyperion/EO-1, de melhor resolução espacial e capacidade espectral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A.P.D; SHIMABUKURO, Y.E.; MASCARENHAS, N.D.A. Use of synthetic bands derived from mixing models in the multispectral classification of remote sensing images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 4, p. 647-657, 1999.
- ANDERSON, L. O.; MALHI, Y.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LADLE, R.; ARAI, E.; BARBIER, N.; PHILLIPS, O. Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies. **New Phytologist**, v. 187, p. 733-750, 2010.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; ROMAN-CUESTA, R. M.; SAATCHI, S.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophysical Research Letters**, v. 34, p. 1-5, 2007.
- ASNER, G. P.; BRASWELL, B. H.; SCHIMEL, D. S.; WESSMAN, C. A. Ecological research needs from multiangle remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 63, p. 155–165, 1998.
- ASNER, G. P.; ALENCAR, A. Drought impacts on the Amazon forest: the remote sensing perspective. **New Phytologist**, v. 187, p. 569–578, 2010.
- ASNER, G. P.; NEPSTAD, D.; CARDINOT, G.; RAY, D. Drought stress and carbon uptake in an Amazon forest measured with spaceborne imaging spectroscopy. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 101, p. 6039–6044, 2004.
- ASNER, G. P.; TOWNSEND, A. R., BRASWELL, B. H. Satellite Observation of El Niño effects on Amazon forest phenology and productivity. **Geophysical Research Letters**, v. 27, p. 981-985, 2000.
- ATKINSON, P. M., DASH, J., JEGANATHAN, C. Amazon vegetation greenness as measured by satellite sensors over the last decade. **Geophysical Research Letters**. v. 38, p. 1-6, 2011.
- BARNSLEY, M. J.; STRAHLER, A. H.; MORRIS, K.P.; MULLER, J. P. Sampling the surface bidirectional reflectance distribution function: Evaluation of current and future satellite sensors. **Remote Sensing Reviews**, v. 8, p.271-311, 1994.
- BHANDARI, S.; PHINN, S.; GILL, T. Assessing viewing and illumination geometry effects on the MODIS vegetation index (MOD13Q1) time series: implications for monitoring phenology and disturbances in forest communities in Queensland, Australia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, p. 7513-7538, 2011.
- 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.

BOTHWELL, G. W.; HANSEN, E. G.; VARGO, R. E.; MILLER, K. C. The Multi-angle Imaging SpectroRadiometer Science Data System, Its products, tools, and performance. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.40, p.1467-1476, 2002.

BRANDO, P. M.; GOETZ, S. J.; BACCINI, A.; NEPSTAD, D. C.; BECK, P. S. A.; Christman, M. C. Seasonal and interannual variability of climate and vegetation indices across the Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 107, p. 14685-14690, 2010.

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, p. 34-42, 2011.

CHOPPING, M.; NOLIN, A.; MOISEN, G. G.; MARTONCHIK, J. V.; BULL, M. Forest canopy height from the Multiangle Imaging SpectroRadiometer (MISR) assessed with high resolution discrete return Lidar. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 2172-2185, 2009.

CROSS, A. M.; SETTLE, J. J.; DRAKE, N. A.; PAIVINEN, R. T. M. Subpixel measurement of tropical forest cover using AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, p. 1119 – 1126, 1991.

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.

DINER, D. J.; BECKERT, J. C.; REILLY, T. H.; BRUEGGE, C. J.; CONEL, J. E.; KAHN, R. A.; MARTONCHIK, J. V.; ACKERMAN, T. P.; DAVIES, R.; GERSTL, S. A. W.; GORDON, H. R.; MULLER, J.; MYNENI, R. B.; SELLERS, P. J.; PINTY, B.; VERSTRAETE, M. M. Multiangle Imaging SpectroRadiometer (MISR) instrument description and experiment overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, p. 1072–1087, 1998.

DINER, D. J.; MARTOCHIK, J. V.; BOREL, C.; GERSTL, S. A. W.; GORDON, H. R.; KNYAZIKHIN, Y.; MYNENI, R.; PINTY, B.; VERSTRAETE, M. M. Multi Angle Imaging Spectro-Radiometer (MISR): Level 2 surface retrieval algorithm theoretical basis. JPL D-11401, **Revision E. Jet Propulsion Laboratory (JPL/NASA)**, Pasadena. 78 p., 2008.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.

- EPIPHANIO, J. C. N.; HUETE, A. R. Dependence of NDVI and SAVI on Sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in alfalfa. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, p. 351–36, 1995.
- FISHER, R. A.; WILLIAMS, M.; DA COSTA, A. L.; MALHI, Y.; DA COSTA, R. F.; ALMEIDA, S.; MEIR, P. The response of an Eastern Amazonian rain forest to drought stress: results and modelling analyses from a throughfall exclusion experiment. **Global Change Biology**, v.13, p. 2361–2378, 2007.
- FRANQUETTO, B. (organizadora). 2011. Alto Xingu: uma sociedade multilíngüe. [Coletânea de artigos sobre lingüística, antropologia e arqueologia do Alto Xingu.] Rio de Janeiro: Museu do Índio/FUNAI.
- FROLKING, S.; MILLIMANA, T.; PALACEA, M.; WISSERA, D.; LAMMERSA, R.; FAHNESTOCKA, M. Tropical forest backscatter anomaly evident in SeaWinds scatterometer morning overpass data during 2005 drought in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 897-907, 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.
- 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, p. 2350-2359, 2011.
- GOEL, N. S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, v. 4, p. 12-22, 1988.
- GONÇALVES, F. G.; SANTOS, J. R. Composição florística e estrutura de uma unidade de manejo florestal sustentável na Floresta Nacional do Tapajós, Pará. **Acta Amazonica**, v. 38, p.155-173, 2008.
- GREEN, A. A.; BERMAN, M.; SWITZER, P.; CRAIG, M. D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, p. 65-74, 1988.
- HAERTEL V. F.; SHIMABUKURO Y. E. Spectral Linear Mixing Model in Low Spatial Resolution Image Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, p. 2555-2562, 2005.

HAIR, J. F.; TATHAM, R. L.; ANDERSON, R. E. BLACK, W. Chapter 1 – Introduction. In: HAIR, J. F.; TATHAM, R. L.; ANDERSON, R. E. BLACK, W. (Ed.). **Multivariate data analysis**. 5 ed. Nova Jersey: Pearson Education Inc., 23-45 p., 1998.

HALL, F. G.; HILKER, T.; COOPS, N. C.; LYAPUSTIN, A.; HUENNRICH, K. F.; MIDDLETON, E.; MARGOLIS, H.; DROLET, G.; BLACK, T. A. Multi-angle remote sensing of forest light use efficiency by observing PRI variation with canopy shadow fraction. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.3201–3211, 2008.

HEINSCH, F. A., ZHAO, M., RUNNING, S., KIMBALL, J. S., NEMANI, R., DAVIS, K., et al. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 44, p. 1908-1925, 2006.

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, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico da vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 1992, 92 p. Manuais Técnicos em Geociências.

INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL (ISA). **Almanaque socioambiental Parque Índigena do Xingu** : 50 anos. São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.pib.socioambiental.org>. Acesso em: 20 jul. 2011.

INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL (ISA). **Povos indígenas no Brasil 2001/2005**. São Paulo, 2006. 879 p.

IVANAUSKAS, N.M.; MONTEIRO, R.; RODRIGUES, R.R. Estrutura de um trecho de floresta Amazônica na bacia do alto rio Xingu. **Acta Amazônica**, v. 34, p. 275-299, 2004.

JACQUEMOND, S.; BARET, F.; HANCOQ, J.F. Modelling spectral and bidirectional soil reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.41, p.123-132, 1992.

JENSEN, J. R. **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective**. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, p. 592, 2007.

JET PROPULSION LABORATORY (JPL). **MISR's Range of Viewing Angles**. Disponível em:<<http://www-misr.jpl.nasa.gov/mission/iangles.html>>. Acesso em: 11 jan. 2011.

KEELING, H. C.; PHILLIPS, O. L. A calibration method for the crown illumination index for assessing forest light environments. **Forest Ecology and Management**, v. 242, p. 431–437, 2007.

KUNZ, S. H.; MARTINS, S. V.; IVANAUKAS, N. M.; STEFANELLO, D.; SILVA, E. Seasonal Perennial Forest site phytosociology in the Amareiras farm, Querencia, Mato Grosso state., Brazil. **Revista Árvore**, v. 34, p. 713-721, 2010.

LI, X.; STRAHLER, A. H. Geometrical-optical reflectance modelling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.30, p.276-292, 1992.

LI W. H.; FU R.; JUAREZ R. I. N.; FERNANDES K. Observed change of the standardized precipitation index, its potential cause and implications to future climate change in the Amazon region. **Philosophical Transactions of the Royal Society B– Biological Sciences**, v. 363, p. 1767–1772, 2008.

LIESENBERG, V. **Análise multi-angular de fitofisionomias do bioma cerrado com dados MISR/Terra**. 2005. 120 p. (INPE-13727-TDI/1049). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1913/2005/08.03.19.56>>. Acesso em: 19 nov. 2010.

LIESENBERG, V.; GALVÃO, L. S.; PONZONI, F. J. Variations in reflectance with seasonality and viewing geometry: implications for classification of Brazilian savanna physiognomies with MISR/Terra data. **Remote Sensing of Environment**, v. 107, p. 276-288, 2007.

LIMA-FILHO, D.A.; MATOS, F.D.A.; AMARAL, I.L.; REVILLA, J.; COÊLHO, L.S.; RAMOS, J.F.; SANTOS, J.L. Inventário florístico de floresta ombrófila densa de terra firme, na região do Rio Urucu-Amazonas, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 31, p.565-579, 2001.

LOARIE, S. R.; DUFFY, P. B.; HAMILTON, H.; ASNER, G. P.; FIELD, C. B.; ACKERLY, D. D. The velocity of climate change. **Nature**, v. 462, p. 1052–1057, 2009.

MAGURRAN, A.E. **Ecological diversity and its measurement**. Princeton: Princeton University Press, 179 p. 1988.

MALHI, Y.; ARAGÃO, L. E. O. C.; GALBRAITH, D.; HUNTINGFORD, C.; FISHER, R.; ZELAZOWSKI, P.; SITCH, S.; MCSWEENEY, C.; MEIR P. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 106, p. 20610–20615, 2009.

MARENGO, J. A. Interannual variability of surface climate in the Amazon Basin. **International Journal of Climatology**, v. 12, p. 853–863, 1992.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, p. 1-5, 2011.

MEIR P.; METCALFE D. B.; COSTA A. C. L.; FISHER R. A. The fate of assimilated carbon during drought: impacts on respiration in Amazon rainforests. **Philosophical Transactions of the Royal Society B—Biological Sciences**, v. 363, p. 1849–1855, 2008.

MEYER, D.; VERSTRAETE, M.M.; PINTY, P. The effect of surface anisotropy and viewing geometry on the estimation of NDVI from AVHRR. **Remote Sensing Reviews**, v.12, p.3-27, 1995.

MORISITA, M. **Measuring of the dispersion and analysis of distribution patterns. Memoires of the Faculty of Science.** Kyushu University, Series E. Biology, v. 2, p. 215-235, 1959.

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 jan. 2011.

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

MYNENI, R. B.; GANAPOL, B. D. A simplified formulation of photon transport in leaf canopies with finite dimensional scatterers. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 46, p. 135-140, 1991.

MYNENI, R. B.; YANGA, W.; NEMANI, R. R.; HUETE, A. R.; DICKINSON, R. E.; KNYAZIKHIN, Y.; DIDAN, K.; FU, R.; JUÁREZ, R. I. N.; SAATCHI, S. S.; HASHIMOTO, H.; ICHII, K.; SHABANOV, N. V.; TAN, B.; RATANA, P.; PRIVETTE, J. L.; MORISETTE, J. T.; VERMOTE, E. F.; ROY, D. P.; WOLFE, R. E.; FRIEDL, M. A.; RUNNING, S. W.; VOTAVA, P.; EL-SALEOUS, N.; DEVADIGA, S.; SU, Y.; SALOMONSON, V. V. Large seasonal swings in leaf area of Amazon rainforests. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 104, p. 4820–4823, 2007.

NARVAES, I. S. **Avaliação de dados SAR polarimétricos para estimativa de biomassa em diferentes fitofisionomias de florestas tropicais.** 2010. 190 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/08.09.22.43-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3837N9S>>. Acesso em: 19 nov. 2011.

NEPSTAD, D. C.; et al. The effects of rainfall exclusion on canopy processes and biogeochemistry of an Amazon forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. 1-18, 2002.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. Ed. Edgard Blucher Ltda, 1989.

PHILLIPS, O. L.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LEWIS, S. L.; FISHER, J. B.; LLOYD, J.; LOPEZ-GONZALEZ, G.; MALHI, Y.; MONTEAGUDO, A.; PEACOCK, J.; QUESADA, C. A. et al. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. **Science**, v. 323, p. 1344-1347, 2009.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, v. 1, 2007. 127 p.

RADAMBRASIL, 1981 (RADAMBRASIL. **Folha SD. 22 Góias**: geologia, geomorfologia. Pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro: DNPM, p. 636, 1981).

SALESKA, S. R.; DIDAN, K.; HUETE, A. R.; ROCHA, H. R. Amazon forests green-up during 2005 drought. **Science**, v. 318, p. 612-612, 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, 2010.

SHIMABUKURO, Y. E.; MELLO, E. M. K.; MOREIRA, J. C.; DUARTE, V. Segmentação e classificação da imagem sombra do modelo de mistura para mapear desflorestamento na Amazônia. São José dos Campos: INPE, 16 p. (INPE-6147-PUD/029), 1997.

SIMS, D.A.; RAHMAN, A.F.; CORDOVA, V.D.; EL-MASRI, B.Z.; BALDOCCHI, D.D.; BOLSTAD, P.V.; FLANAGAN, L.B.; GOLDSTEIN, A.H.; HOLLINGER, D.Y.; MISSON, L.; MONSON, R.K.; OECHEL, W.C.; SCHMID, H.P.; Wofsy, S.C.; LIUKANG, X. A new model of gross primary productivity for North American ecosystems based solely on the enhanced vegetation index and land surface temperature from MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 1633–1646, 2008.

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.

SIVAM (2002). Serviço de Vigilância da Amazônia/Serviço de Proteção da Amazônia. Banco de dados do IBGE – Versão 6. Recuperação dos dados originais do Projeto RADAMBRASIL. Mapa 1:250000. Manaus, AM.

SOLANO, R.; DIDAN, K.; JACOBSON, A.; HUETE, A. MODIS vegetation indices (MOD13) C5 – User’s guide. The University of Arizona. Tucson: 38 p., 2010.

SOUZA, A. A. **Estudo de fitofisionomias de Cerrado com dados do sensor Hyperion-EO-1**. 2009. 117 p. (INPE-15780-TDI/1523). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/03.24.13.43>>. Acesso em: 12 jan. 2011.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, MG: Editora UFV - Universidade Federal de Viçosa, 2002. 449p.

VIEIRA, S.; CAMARGO, P. B.; SELHORST, D.; SILVA, R.; HUTYRA, L.; CHAMBERS, J. Q.; BROWN, I. F.; HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; WOFSEY, S. C.; TRUMBORE, S. E.; MARTINELLI, L. A. Forest structure and carbon dynamics in Amazonian tropical forests. **Oecologia**, v. 140, p. 468-479, 2004.

XAVIER, A. S. **Estudo da influência da geometria de visada na resposta espectral de classes de cobertura na região amazônica a partir de dados do sensor MISR/TERRA**. 2003. 138 p. (INPE-14211-TDI/1112). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/07.01.10.25>>. Acesso em: 13 jan. 2011.

XAVIER, A. S.; GALVÃO, L. S. View angle effects on the discrimination of selected Amazonian land cover types from a principal-component analysis of MISR spectra. **International Journal of Remote Sensing**, v.26, p.3797-3811, 2005.

XIAO, X., ZHANG, Q.; BRASWELL, B.; URBANSKI, S.; BOLES, S.; WOFSEY, S.; MOORE III, B.; OJIMA, D. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, p. 256–270, 2004.

XIAO, X.; 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, p. 465–473, 2006.

XU, L.; SAMANTA, A.; COSTA, M. H.; GANGULY, S. Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought. **Geophysical Research Letters**, v. 38, p. 1-4, 2011.

WIDLOWSKI, J. L.; PINTY, B.; GOBRON, N.; VERSTRAETE, M. M.; DINER, D. J.; DAVIS, B. Canopy structure parameters derived from multi-angular remote sensing data for terrestrial carbon studies. **Climatic Change**, v. 67, p. 403–415, 2004.

YIKATUXINGU. ONG **YikatuXingu**. O Xingu e a região do Parque Índigena do Xingu (PIX). Disponível em: <http://www.yikatuxingu.org.br/o-xingu-e-a-regiao/o-pix/>. Acesso em: 20 julho 2011.

ZWILLINGER, D.; KOKOSKA, S. **Standard probability and statistics tables and formula**. Boca Raton, London, New York Washigton: CRC Press – Taylor & Francis Group, 1999. 554p.

ANEXO A

PROCEDIMENTOS PARA AQUISIÇÃO, MANIPULAÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS MISR/TERRA

Este tutorial tem como objetivo demonstrar os principais procedimentos necessários para aquisição e manipulação das imagens MISR/Terra. Primeiramente serão indicadas as etapas para aquisição e download das imagens e, posteriormente, para a manipulação e pré-processamento dos dados.

O download das imagens BRF do sensor MISR é realizado a partir da plataforma virtual da NASA (*Langley Atmospheric Sciences Data Center*) pelo site: http://eosweb.larc.nasa.gov/PRODOCS/misr/table_misr.html. É necessário fazer um cadastro, para geração de nome de usuário e senha para acesso aos produtos derivados do sensor MISR. Nesta plataforma também são disponibilizados diversos outros produtos, como também *softwares* voltados para a manipulação destes dados. Diversas outras especificações e informações também se encontram disponíveis no site. A Figura A.1. mostra as etapas para o download e seleção do produtos BRF MISR. Após a entrada no sistema com o nome de usuário e senha, seleciona-se o link *MISR Order and Customization Tool*. A janela para seleção do dado MISR abrirá. Seleciona-se então o tipo de dado a ser utilizado, no caso deste trabalho o produto MIL2ASLS (resolução de 1x1km, 4 bandas espectrais e 9 ângulos de visada). São necessários também a especificação da série temporal que se deseja fazer o download, bem como a localização da região geográfica de interesse. Também se deve fazer o download do produto MIANCAGP (*Ancillary Geographic Product*), para realização do georreferenciamento das imagens. Segue-se o mesmo procedimento. Porém, a busca é feita pelo link *Supporting Products*, ao invés de *Land/Surface*.

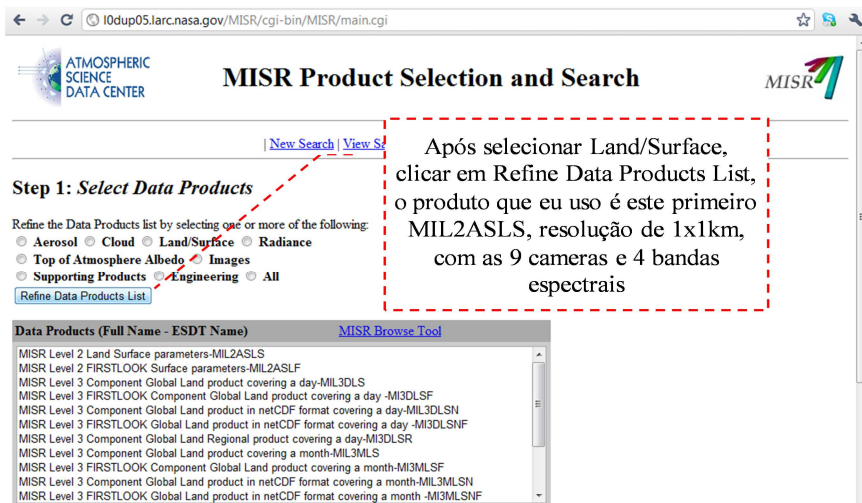
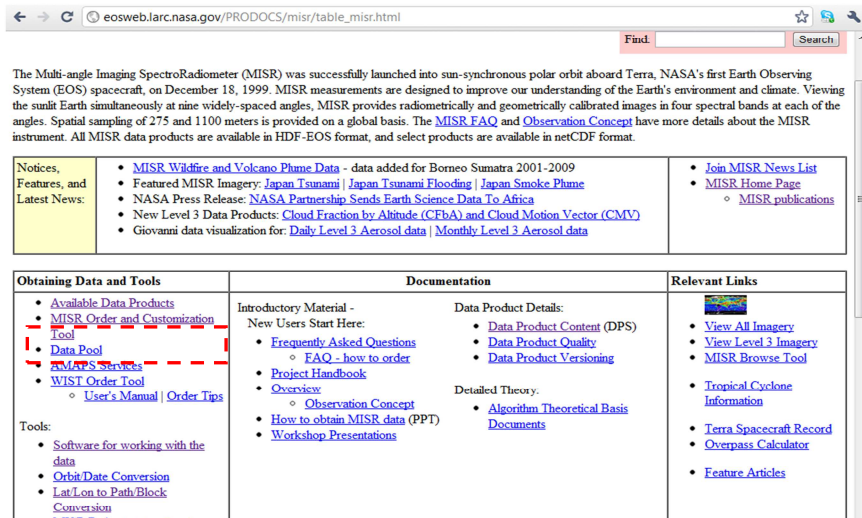
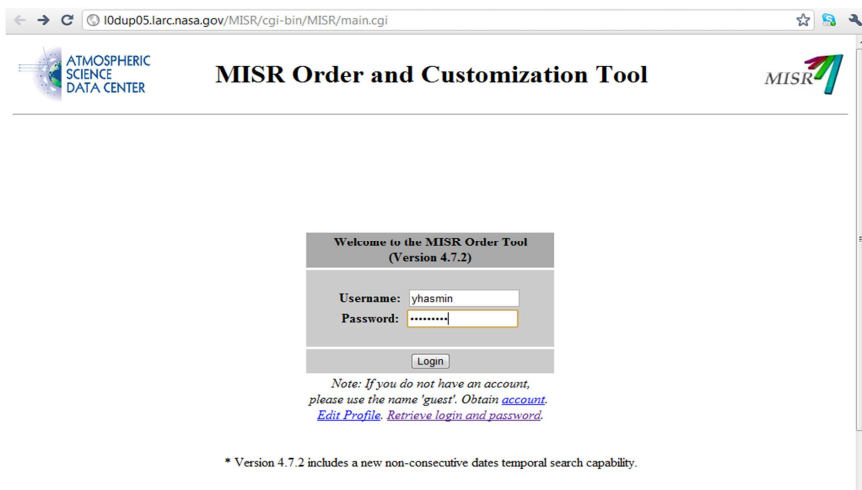


Figura A.1 – Procedimentos para seleção e download dos dados MISR.

Para visualização das imagens MISR, é disponibilizado no site um programa chamado MISR_view. Alternativamente, também pode-se visualizar as imagens através do software ENVI, como também realizar o pré-processamento das imagens. Primeiramente, é necessário baixar uma extensão (também disponível no site http://eosweb.larc.nasa.gov/PRODOCS/misr/tools/envi_tool.html) chamada `misr_envi.l2brf.tar`. A descrição para inserção desta extensão no ENVI é descrita abaixo e também está disponível no site:

Level 2 BRF Extension for the `misr_envi` tool

Installation Instructions

Copy the IDL program files (those with the `.pro` extension) into the ENVI `save_add` directory. This directory is directly under the ENVI directory in your ENVI installation, e.g. for unix `/usr/local/rsi/idl_6.1/products/envi_4.1/save_add` or for Windows

`C:\RSI\IDL61\products\ENVI41\save_add`

In order to invoke the program from the ENVI file menu, add the line

```
3 {MISR L2 for BRF} {not used} {misr_envi_level2brf}
```

into your existing `envi.men` file in the ENVI menu directory under the EOS entries. That section of the menu file should look like

```
2 {EOS}
```

```
3 {ASTER 1A/1B} {open aster} {envi_menu_event}
```

```
3 {MISR L1B2} {not used} {misr_envi}
```

```
3 {MISR L2 for BRF} {not used} {misr_envi_level2brf}
```

```
3 {MODIS 1B} {open modis} {envi_menu_event}
```

Em seguida, utilize o item de menu do ENVI abrir o arquivo MISR Nível 2. Esta extensão consiste em um conjunto de rotinas escritas em ITT (*Visual Information Solutions*) na linguagem IDL que implementa uma função de usuário para trabalhar com dados MISR no ENVI.

Ao abrir a imagem MISR no ENVI, será também solicitado o dado MIANCAGP (ou somente AGP), para que a imagem a ser visualizada já contenha as coordenadas geográficas. Caso a imagem seja aberta sem este produto, ela aparecerá sem o sistema de coordenadas. Após a seleção do dado AGP, o ENVI também solicitará a especificação do bloco, referente à região da área de estudo de interesse, e a câmera que será aberta, conforme mostra a Figura A.2. É importante ressaltar que este procedimento é realizado apenas para um bloco. Caso a área de interesse seja composta por dois ou mais blocos, este procedimento deverá ser repetido para cada um dos blocos separadamente como também para cada câmera. Após o georreferenciamento de cada bloco pode-se então mosaica-los para obtenção de uma imagem completa da área de interesse.

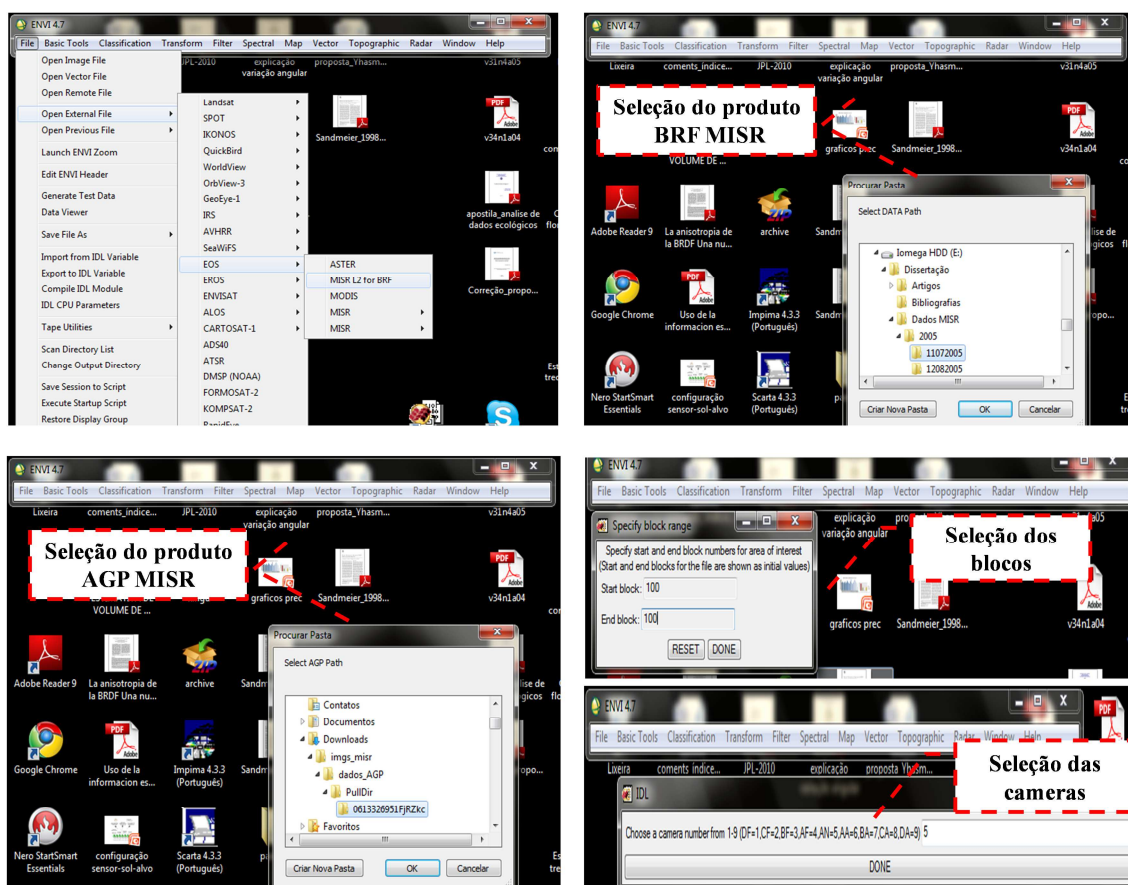


Figura A.2 – Visualização das imagens MISR no ENVI.

Após o carregamento da imagem de interesse no ENVI, é necessário realizar o georreferenciamento com a utilização do dado auxiliar AGP. A Figura A.3 apresenta as etapas para este procedimento.

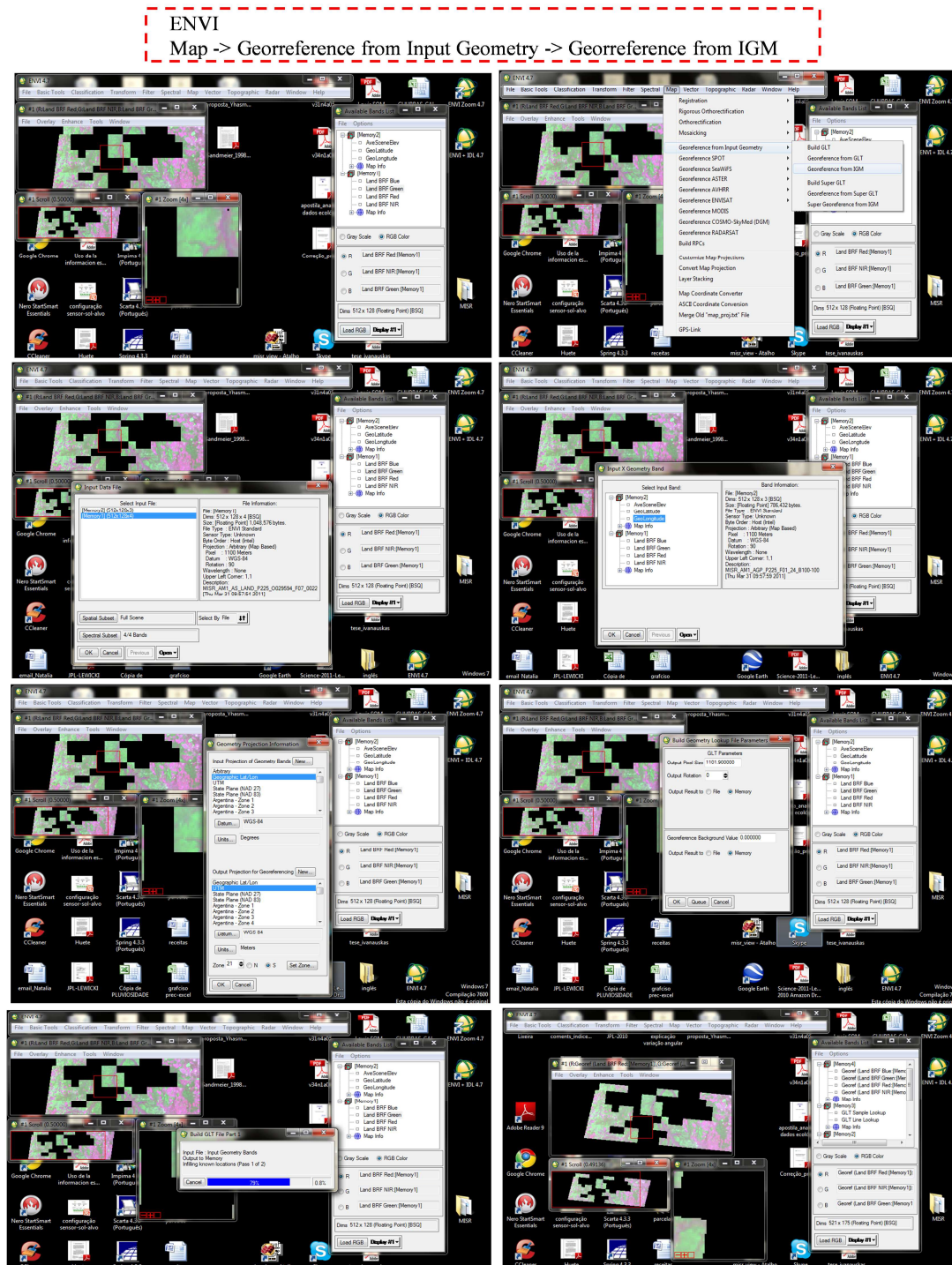


Figura A.3 – Etapas para o georreferenciamento e reprojeção dos dados MISR.

Seleciona-se a imagem em que se deseja aplicar o georreferenciamento. Com isto uma nova janela se abrirá para identificar os parâmetros geométricos (longitude e latitude) que estão no produto AGP. A longitude faz referência ao parâmetro x, e a latitude ao parâmetro y. Posteriormente, é apresentada a opção de reprojeter o dado, ou seja, colocá-lo em outro sistema de projeção cartográfica na janela *Geometry Projection Information*.

Caso seja necessário, pode-se escolher a projeção de preferência nas opções de projeções e datum que o sistema fornece. Após a escolha é necessário inserir a resolução espacial do dado utilizado na janela *Build Geometry Lookup File Parameters* (no caso específico deste produto 1x1km). Após confirmar a operação, o dado será então processado para realização do georreferenciamento e reprojeção.

Conforme supracitado, caso a área de interesse seja composta por mais de um bloco de cena do sensor MISR, é necessária a aplicação deste procedimento para o segundo bloco de interesse. Após, o georreferenciamento do segundo bloco, pode-se então mosaicar os blocos, pois o sistema identificará as coordenadas e “juntará” os blocos corretamente. Cabe salientar que os blocos devem estar sempre no mesmo sistema de projeção, caso contrário o mosaico entre eles não será feito.

Importa-se os blocos já georreferenciados na janela *Map Based Mosaic -> Import Files and Edit Attributes*, e então se modifica os atributos, como *Data Value to Ignore (0)*, para que linhas sobrepostas não apareçam após o mosaico na imagem. Aplica-se então o mosaico. O resultado será a imagem completa da área de interesse composta pelos blocos que a representam. Abaixo, a Figura A.4 mostra o procedimento para realização do mosaico entre os blocos.

ENVI
Map -> Mosaicking -> Georeferenced

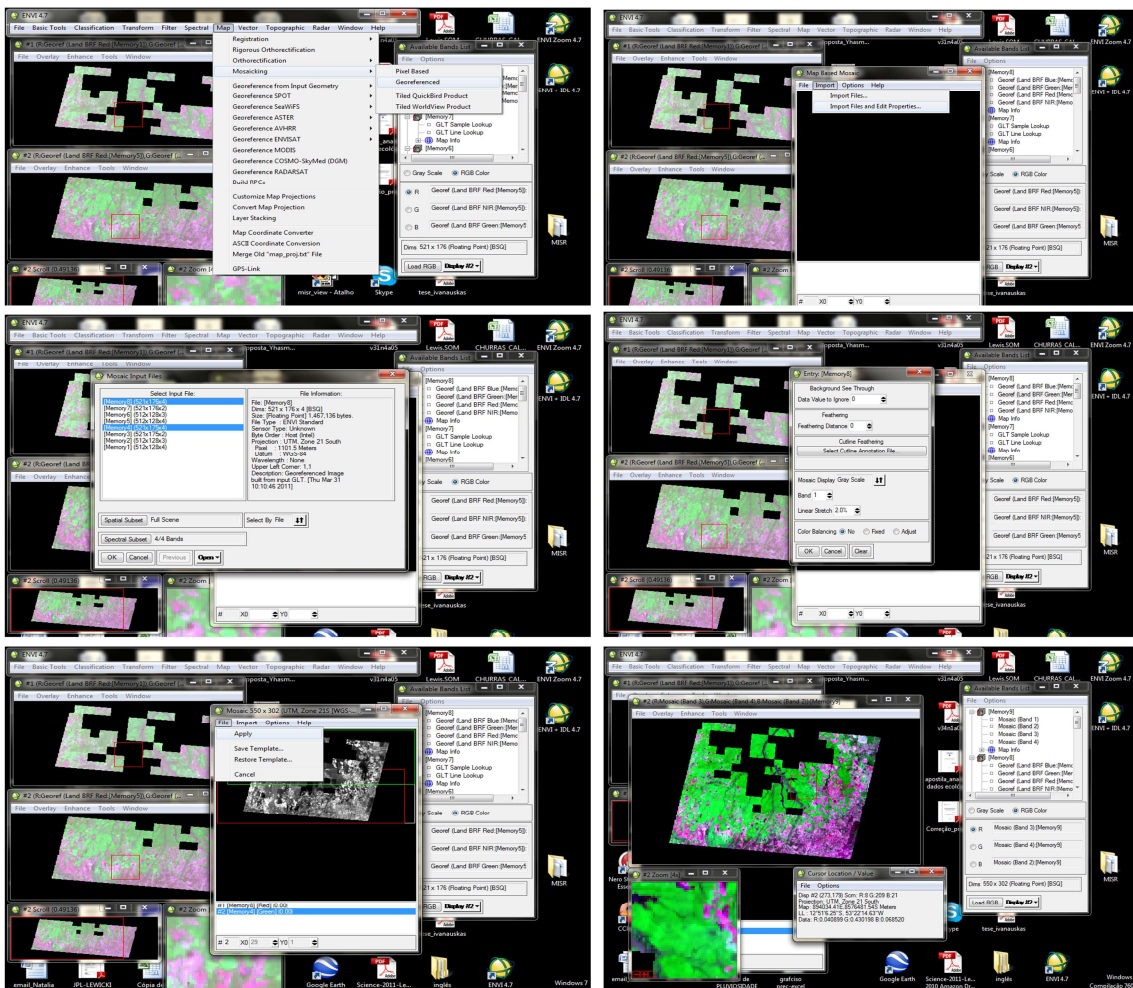


Figura A.4 – Etapas para o mosaico dos blocos georreferenciados.