



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/01.21.18.51-TDI

**AVALIAÇÃO DE DADOS MODIS (MAIAC)  
CORRIGIDOS E NÃO-CORRIGIDOS PARA EFEITOS  
BIDIRECIONAIS NA AMAZÔNIA**

Caio Arlanche Petri

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Sensoriamento Remoto, orientada  
pelo Dr. Lênio Soares Galvão,  
aprovada em 13 de fevereiro de  
2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3SK3KRB>>

INPE  
São José dos Campos  
2019

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

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

### **Presidente:**

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

### **Membros:**

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

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

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

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

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/01.21.18.51-TDI

**AVALIAÇÃO DE DADOS MODIS (MAIAC)  
CORRIGIDOS E NÃO-CORRIGIDOS PARA EFEITOS  
BIDIRECIONAIS NA AMAZÔNIA**

Caio Arlanche Petri

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Sensoriamento Remoto, orientada  
pelo Dr. Lênio Soares Galvão,  
aprovada em 13 de fevereiro de  
2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3SK3KRB>>

INPE  
São José dos Campos  
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Petri, Caio Arlanche.

P448a Avaliação de dados MODIS (MAIAC) corrigidos e não-corrigidos para efeitos bidirecionais na Amazônia / Caio Arlanche Petri. – São José dos Campos : INPE, 2019.

xx + 99 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/01.21.18.51-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientador : Dr. Lênio Soares Galvão.

1. MODIS. 2. Efeitos bidirecionais. 3. Séries temporais.  
4. Índices de vegetação. I.Título.

CDU 528.8(811.3)

---



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

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

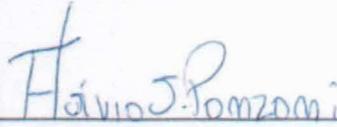
Aluno (a): **Caio Arlanche Petri**

Título: "AVALIAÇÃO DE DADOS MODIS (MAIAC) CORRIGIDOS E NÃO-CORRIGIDOS PARA EFEITOS BIDIRECIONAIS NA AMAZÔNIA"

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

( ) Participação por Video - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Lênio Soares Galvão



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

( ) Participação por Video - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Camilo Daleles Rennó

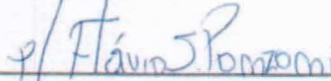


Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

( ) Participação por Video - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Fábio Marcelo Breunig



Convidado(a) / UFSM / Sta Maria - RS

Participação por Video - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 13 de fevereiro de 2019



## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador, Lênio, por todos os ensinamentos e oportunidades até então. Para um dia ver mais longe, como se diz, só mesmo estando sobre os ombros de gigantes.

Agradeço também a todos os meus amigos e família pelos momentos fundamentais de estudo, descanso e diversão durante o mestrado. Dedico a Ana Paula um agradecimento especial pelo companheirismo e carinho. Gosto de imaginar que a menor das coisas que levamos para a vida, por improvável que pareça, é um diploma.

Sou grato por todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram cientificamente para a realização deste trabalho: Flávio Ponzoni, Camilo Rennó, Yhasmin Moura, Catherine Almeida, e, especialmente, Thomas Hilker (*in memoriam*).

Agradeço a todos os pesquisadores do projeto LBA, especialmente aos principais investigadores das torres de fluxo (A. Manzi, A. Nobre, S. Wofsky, S. Saleska, A. Camargo, M. Goulden, S. Miller, H. da Rocha, D. Fitzjarrald, F. Cardoso e M. Waterloo).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.



*“Carcará  
Lá no sertão  
É um bicho que avoa que nem avião  
É um pássaro malvado  
Tem o bico volteado que nem gavião  
Carcará  
Quando vê roça queimada  
Sai voando, cantando,  
Carcará  
Vai fazer sua caçada  
Carcará come inté cobra queimada  
Quando chega o tempo da internada  
O sertão não tem mais roça queimada  
Carcará mesmo assim num passa fome  
Os burrego que nasce na baixada  
Carcará  
Pega, mata e come  
Carcará  
Num vai morrer de fome  
Carcará  
Mais coragem do que home  
Carcará  
Pega, mata e come  
Carcará é malvado, é valentão  
É a águia de lá do meu sertão  
Os burrego novinho num pode andá  
Ele puxa o umbigo inté matá  
Carcará  
Pega, mata e come  
Carcará  
Num vai morrer de fome  
Carcará  
Mais coragem do que home  
Carcará”*

*Carcará, por João do Vale*



## RESUMO

Estudos de florestas tropicais da Amazônia têm se beneficiado da série temporal relativamente longa de índices de vegetação (IVs) produzida pelo sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Entretanto, por ser um sensor com amplo campo de visada, as séries temporais são afetadas por efeitos bidirecionais, mesmo quando produtos compostos de 16 dias são utilizados. O objetivo deste trabalho foi analisar a magnitude dos efeitos bidirecionais na Amazônia sobre a determinação de sete IVs e da reflectância das respectivas bandas do MODIS que compõem estes índices. O Cerrado foi usado como área de referência para comparação dos resultados. Usando o algoritmo MAIAC (*Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction*) para correção dos efeitos atmosféricos e de BRDF, sete IVs foram calculados explorando diferentes intervalos espectrais e significados biofísicos: EVI (*Enhanced Vegetation Index*), GRND (*Green-Red Vegetation Index*), NDII (*Normalized Difference Infrared Index*), NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDWI (*Normalized Difference Water Index*), PRI (*Photochemical Reflectance Index*) e SWND (*SWIR Normalized Difference*). Para a análise comparativa dos fatores potencialmente causadores de efeitos BRDF na Amazônia e no Cerrado, foram avaliados dados de ângulo zenital de visada (AZV), ângulo zenital solar (AZS), ângulo azimutal relativo (AAR) e direção de imageamento, além das condições atmosféricas no momento de aquisição das imagens (qualidade radiométrica dos pixels). Para análise dos efeitos BRDF sobre a reflectância e IVs, foram consideradas mudanças percentuais relativas, testes não-paramétricos (Mann-Whitney U), métricas de Cohen e distâncias angulares entre dados corrigidos e não-corrigidos. Finalmente, após correção BRDF, comparou-se o comportamento sazonal dos sete IVs entre si, usando também dados de GPP (*Gross Primary Production*) e LUE (*Light Use Efficiency*) de três torres de fluxo na Amazônia (Belém, Manaus e Santarém). Os principais resultados mostraram que: (a) As condições atmosféricas de observação na Amazônia tornam este ecossistema mais suscetível a efeitos BRDF quando comparado com áreas de Cerrado, mesmo considerando as mudanças sazonais mais fortes na vegetação savânica; (b) O EVI e o PRI foram os IVs mais sensíveis aos efeitos BRDF, em uma avaliação conjunta das análises estatísticas adotadas; (c) EVI, NDII e NDWI acompanharam os dados de GPP de torres de fluxo na Amazônia, durante a estação seca, mas nem todos os IVs mostraram resposta biofísica consistente entre si. De forma geral, o presente estudo contribui para uma melhor compreensão dos efeitos BRDF sobre a reflectância de bandas e IVs do MODIS.

Palavras-chave: MODIS. Efeitos Bidirecionais. Séries Temporais. Índices de vegetação.



# EVALUATION OF MODIS (MAIAC) DATA CORRECTED AND NON-CORRECTED FOR BIDIRECTIONAL EFFECTS IN THE AMAZON

## ABSTRACT

Studies of tropical rainforests from the Amazon have benefited from the relatively long time series of vegetation indices (VIs) produced by the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sensor. However, because MODIS is a sensor with a large field of view, the time series is affected by bidirectional effects, even when 16-day composite products are used. The objective of this work was to analyse the magnitude of the bidirectional effects in Amazonia on the determination of seven VIs and on the reflectance of the respective MODIS bands that compose these indices. The savannas from the Brazilian *Cerrado* were used as reference areas for comparison of results. Using the MAIAC (Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction) for the correction of atmospheric and BRDF effects, seven VIs were calculated by exploring different spectral ranges and biophysical meanings: EVI (Enhanced Vegetation Index), GRND (Green-Red Vegetation Index), NDII (Normalized Difference Infrared Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDWI (Normalized Difference Water Index), PRI (Photochemical Reflectance Index) and SWND (ShortWave infrared Normalized Difference). For the comparative analysis of the factors that could cause BRDF effects in the Amazon and the *Cerrado*, view zenith angle (VZA), solar zenith angle (SZA), relative azimuth angle (RAA), viewing direction and atmospheric conditions during image acquisition (radiometric quality of the pixels) were evaluated. For the analysis of BRDF effects on reflectance and VIs, relative percentage changes, non-parametric (Mann-Whitney U) tests, Cohen metrics and angular distances between corrected and uncorrected data were considered. Finally, after BRDF correction, the seasonal behaviors of the seven VIs were compared to each other, also using GPP (Gross Primary Production) and LUE (Light Use Efficiency) data from three Amazonian flux towers (Belém, Manaus and Santarém). The main results showed that: (a) The atmospheric conditions in the Amazon make this ecosystem more susceptible to BRDF effects than the *Cerrado*, even considering the stronger seasonal changes observed in the savanna-like vegetation; (b) EVI and PRI were the most sensitive VIs to BRDF effects in a joint evaluation of the adopted statistical analyses; (c) EVI, NDII and NDWI followed the GPP pattern observed in flux towers of the Amazon during the dry season, but some VIs did not show consistent biophysical response to each other. In general, this study contributes for better understanding the BRDF effects on the reflectance of bands and VIs of MODIS.

Keywords: MODIS. Bidirectional Effects. Time Series. Vegetation indices.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1: Direções majoritárias de espalhamento na interação sol-superfície-sensor. ....	12
Figura 2.2: Ângulo zenital de visada (AZS) exemplificado na interação sol-superfície-sensor. ....	14
Figura 2.3: Ângulo zenital solar (AZS) exemplificado na interação Sol-superfície-sensor. ....	15
Figura 2.4: Ângulo azimutal relativo (AAR) exemplificado na interação sol-superfície-sensor. ....	16
Figura 2.5: Fluxograma de funcionamento geral do algoritmo MAIAC. ....	18
Figura 3.1: Metodologia de trabalho usada na investigação. ....	29
Figura 3.2: Localização dos biomas selecionados para o trabalho. ....	31
Figura 4.2: Ângulo azimutal relativo durante a estação seca em observações para o ano de 2008 em florestas tropicais da Amazônia. ....	46
Figura 4.4: Valores de qualidade radiométrica dos pixels recuperados no produto composição MOD13A2 para o ano de 2008. ....	48
Figura 4.5: Dia de composição utilizado (intervalo de 16 dias) para o produto MOD13A2 (2008). ....	49
Figura 4.7: Ângulo azimutal relativo (em graus) para a Amazônia e Cerrado durante o ano de 2008, com base no produto MOD13A2. Os valores mais próximos de zero grau indicam espalhamento preferencial frontal, enquanto que os valores mais próximos de 180 graus indicam espalhamento preferencial de retroespalhamento. ....	51
Figura 4.12: Mudança percentual entre dados corrigidos e não corrigidos para BRDF pelo MAIAC em setembro e junho, para as bandas 1-7 do MODIS (MAIAC). Os comprimentos de onda das bandas estão listados na Tabela 1. ....	59
Figura 4.13: Mudança percentual entre dados corrigidos e não corrigidos para BRDF em junho e setembro, para as bandas 11 e 12 do MODIS (MAIAC). ....	61
Figura 4.14: Mudança percentual entre dados corrigidos e não corrigidos para BRDF em junho e setembro, para os IVs EVI, NDVI, GRND, NDII, NDWI, SWND e PRI do MODIS (MAIAC). ....	62
Figura 4.18: GPP para as torres de fluxo de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém). ....	72

Figura 4.19: LUE para as torres de fluxo de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém).....	73
Figura 4.20: EVI para uma janela de 3x3 pixels ao redor das torres de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém).....	74
Figura 4.21: NDVI para uma janela de 3x3 pixels ao redor das torres de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém). ....	75
Figura 4.22: GRND para uma janela de 3x3 pixels ao redor das torres de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém). ....	76
Figura 4.23: NDII para uma janela de 3x3 pixels ao redor das torres de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém).....	77
Figura 4.24: NDWI para uma janela de 3x3 pixels ao redor das torres de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém). ....	78
Figura 4.25: SWND para uma janela de 3x3 pixels ao redor das torres de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém). ....	79
Figura 4.26: PRI para uma janela de 3x3 pixels ao redor das torres de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém).....	80

## LISTA DE TABELAS

	<b><u>Pág.</u></b>
Tabela 2.1: Bandas do sensor MODIS.....	8
Tabela 3.1: Bandas do sensor MODIS usadas nos cálculos dos índices de vegetação selecionados.....	36
Tabela 3.2: Índices, sua formulação, aplicação principal na literatura e autoria. .....	37
Tabela 3.3: Classificação da Magnitude do Efeito de acordo com a métrica $r$ .	39
Tabela 3.4: Áreas selecionadas para análise da Magnitude do Efeito BRDF sobre o cálculo dos índices de vegetação (IVs). ....	40



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Hipóteses .....	4
1.2. Objetivos .....	5
1.2.1. Objetivos específicos .....	5
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>7</b>
2.1. MODIS .....	7
2.2. Efeitos BRDF em sensores com amplo campo de visada.....	9
2.2.1. Direções de imageamento .....	12
2.2.2. Variáveis de influência em efeitos bidirecionais MODIS .....	13
2.2.2.1. Ângulo zenital de visada .....	13
2.2.2.2. Ângulo zenital solar .....	14
2.2.2.3. Ângulo azimutal relativo .....	15
2.2.2.4. Atmosfera.....	16
2.3. MAIAC: Correção dos efeitos atmosféricos e BRDF .....	17
2.4. Índices de vegetação .....	19
2.4.1. NDVI.....	20
2.4.2. EVI .....	20
2.4.3. PRI .....	21
2.4.4. NDWI.....	22
2.4.5. NDII .....	22
2.4.6. GRND.....	23
2.5. Fenologia da vegetação por satélites na Amazônia e no Cerrado	23
2.5.1. Aplicações na Amazônia .....	25
2.5.2. Aplicações no Cerrado .....	26
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>28</b>
3.1. Seleção das áreas de estudo e obtenção dos dados e produtos MODIS .....	30
3.2. Fatores causadores de efeitos BRDF na Amazônia e Cerrado.....	32

3.2.1.	Análise comparativa da variação em AZS e AZV .....	32
3.2.2.	Análise comparativa da direção de imageamento e do AAR .....	34
3.3.	Magnitude dos efeitos BRDF em bandas e IVs.....	36
3.3.1.	Análise de mudança percentual com a correção BRDF .....	38
3.3.2.	Análise da magnitude dos efeitos BRDF .....	38
3.3.3.	Análise da distância angular entre espectros corrigidos e não-corrigidos para efeitos BRDF .....	41
3.4.	Análise da consistência do comportamento da reflectância e dos IVs após correção dos efeitos BRDF .....	42
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>44</b>
4.1.	Fatores causadores dos efeitos BRDF em dados MODIS .....	44
4.1.1.	Variação relativa em AZS e AZV na Amazônia e no Cerrado .....	44
4.1.2.	Avaliação da influência da direção de imageamento e AAR usando Análise por Componentes Principais (ACP).....	51
4.2.	Magnitude dos efeitos BRDF em bandas e IVs.....	55
4.2.1.	Análise de mudança percentual .....	55
4.2.1.1.	Análise por bandas na Amazônia.....	58
4.2.1.2.	Análise por IVs na Amazônia .....	61
4.2.2.	Análise da magnitude dos efeitos BRDF na Amazônia .....	64
4.2.3.	Análise da distância angular entre espectros.....	69
4.3.	Análise comparativa entre IVs corrigidos para efeitos BRDF e dados de torres de fluxo .....	71
4.3.1.	Dados de torres de fluxo na Amazônia (GPP e LUE).....	71
4.3.2.	EVI .....	73
4.3.3.	NDVI.....	74
4.3.4.	GRND.....	75
4.3.5.	NDII .....	76
4.3.6.	NDWI.....	77
4.3.7.	SWND .....	78
4.3.8.	PRI .....	79
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO.....</b>	<b>81</b>

<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>86</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>89</b>



## 1 INTRODUÇÃO

No sensoriamento remoto, uma das estratégias adotadas para reduzir o tempo de revisita de cena e aprofundar os estudos que envolvem o monitoramento da vegetação é ampliar o campo de visada dos sensores ópticos a bordo dos satélites. Essa estratégia é útil em estudos da fenologia da vegetação para o monitoramento dos possíveis impactos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas tropicais (FERREIRA et al., 2008; HMIMINA et al., 2013; LIANG et al., 2011), da ciclagem de carbono em diferentes ecossistemas, dos processos eco-fisiológicos e hidrológicos e das interações de energia entre a superfície da Terra e a atmosfera (GANGULY et al., 2010; HEINMANN et al., 1998; MALHI et al., 2008).

Este método de aquisição de dados é bem representado pelo sensor orbital MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*), posicionado nas plataformas Terra e Aqua. O sensor MODIS opera com um campo de visada de  $\pm 55^\circ$  do nadir, o que propicia uma resolução temporal de 1 a 2 dias, dada a ampla faixa de imageamento no terreno (2330 km). A plataforma Terra foi lançada em 1999, enquanto a Aqua foi posta em órbita em 2002. Atualmente, ambas as plataformas ultrapassaram seu tempo de operação planejado, de 6 anos (NASA, 2018). Com bandas espectrais bem posicionadas, em termos de resposta bioquímica e biofísica de plantas, tendo uma resolução espacial de 250 m (bandas 1 e 2), 500 m (bandas 3 a 7) e 1 km (bandas 8 a 36), dados do MODIS são adequados para estudos regionais, incluindo ecossistemas brasileiros como a Amazônia e o Cerrado. A disponibilidade de informação praticamente diária, desde 2000, é valiosa para criação de séries temporais, que agregam valor a bases de dados históricas provenientes de outros satélites.

Em contrapartida, devido ao amplo campo de visada usado pelo sensor, a reflectância medida pelo MODIS, sazonalmente ou interanualmente, é afetada pela geometria variável de iluminação e de visada (BANDHARI et al., 2011; HILKER et al., 2017). Devido ao comportamento não-Lambertiano, a resposta espectral da vegetação, registrada pelo MODIS,

varia com a posição relativa do Sol e do sensor (BANDHARI et al., 2011). Em função disso, a resposta espectral é afetada por fatores como o ângulo zenital solar (AZS), o ângulo zenital de visada (AZV), o ângulo azimutal relativo (AAR) e a direção de imageamento (retroespalhamento ou espalhamento frontal) (LYAPUSTIN et al., 2015). A influência destes fatores é parcialmente reduzida quando imagens compostas por múltiplas datas são utilizadas para se selecionar os pixels de melhor qualidade radiométrica de observação, utilizando algoritmos de seleção como o máximo valor, em intervalos de 8, 10 e 16 dias (MEYER et al., 1995; EKLUNDH, 1995). Produtos como o MOD13A2, de índices de vegetação em resolução de 16 dias e resolução espacial de 1 km, adotam este procedimento (NASA, 2018). Entretanto, dependendo das condições atmosféricas da área de estudo e do período de observação (p.ex., estação chuvosa ou seca), a utilização destes produtos compostos do MODIS pode não ser suficiente para eliminar a variabilidade espectral decorrente da geometria de iluminação e de visada, que é dependente do comprimento de onda.

Portanto, em estudos da vegetação com dados de sensores remotos com largo campo de visada como o do MODIS, diversos procedimentos têm sido propostos não apenas para remover os efeitos atmosféricos, como também para corrigir os efeitos BRDF (*bidirectional reflectance distribution function*). O objetivo é obter a informação sobre a reflectância de superfície sem interferências associadas à geometria de aquisição das imagens. Algoritmos como o MAIAC (*Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction*), proposto por Lyaspustin et al. (2015), corrigem os dados atmosféricamente para se obter a reflectância de superfície. Além disso, pode ser usado para a correção dos efeitos bidirecionais, normalizando os efeitos de variação dos ângulos de visada e de iluminação solar, comumente presentes em sensores como o MODIS (BREUNIG et al., 2011; SIMS et al., 2011). No Brasil, especificamente para a Amazônia, exemplos de estudos usando dados MODIS (MAIAC) foram publicados por Machado (2017), Moura et al. (2017), Hilker et al. (2017) e Sousa et al. (2017).

A maioria dos estudos de fenologia da vegetação por satélites, usando o MODIS, tem utilizado um único índice de vegetação (IV): o EVI (*Enhanced Vegetation Index*). Poucos foram os trabalhos no Brasil que consideraram outros IVs na análise (MOURA et al., 2017; MACHADO, 2017; SOUSA et al., 2017). O EVI, que compõe alguns produtos MODIS, foi proposto para reduzir as limitações do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), que tende a saturar com o aumento de densidade de cobertura vegetal. Em contraposição a este ganho de informação, o EVI é também mais sensível aos efeitos BRDF do que o NDVI, o que é um fator importante a considerar na análise de séries temporais do sensor MODIS (MOURA et al., 2012; GALVÃO et al., 2011). Em estudos de florestas tropicais da Amazônia, este índice tem gerado coincidentemente interpretações contraditórias sobre a fenologia da vegetação. Por exemplo, na análise do índice EVI com dados MODIS, Saleska et al. (2007) encontraram uma variação positiva em verdejamento durante a seca severa na Amazônia no ano de 2005, comparada com anos regulares, indicando lógica contrária ao senso comum sobre a reação de florestas tropicais ao estresse hídrico. Entretanto, a mesma lógica foi testada por Xu et al. (2011) para o ano de 2010, outro ano de seca severa, obtendo resultados contrários. Huete et al. (2006) e Galvão et al. (2011), por sua vez, verificaram um efeito sazonal de incremento do índice EVI, sugerindo significados distintos para este comportamento (biofísico e BRDF, respectivamente). Do início para o final da estação seca na Amazônia, observa-se, em geral, um incremento inesperado do EVI com o estresse hídrico. A necessidade de correção BRDF, portanto, trouxe para a literatura um importante questionamento sobre a existência ou não de informação biofísica associada à variação intra- e interanual do EVI. A relevância deste questionamento é sobre o real grau de resiliência das florestas tropicais para um cenário previsto de secas mais frequentes e severas, associadas às mudanças climáticas.

Considerando estes fatos, torna-se de fundamental importância a ampliação dos estudos que abordem os efeitos das correções BRDF em IVs. De fato, pouco se explorou, com dados MODIS, o potencial uso de

outros IVs que atuam em regiões espectrais distintas do EVI, visando compará-los com o comportamento sazonal do EVI. Considerando que vários índices possuem formulações diferenciadas, em faixas espectrais distintas do espectro eletromagnético, é conveniente analisar seu comportamento antes e após as correções dos efeitos bidirecionais usando o MAIAC. Como citado na literatura, não existem estudos que abordem tal questão para explicar o comportamento do EVI, que possui grande sensibilidade à reflectância do NIR e aos efeitos de iluminação e de visada da cena em comparação com IVs normalizados, que tendem a amenizar tais efeitos (SIMS et al., 2011; GALVÃO et al., 2011; 2013; MOURA et al., 2012).

A avaliação desses efeitos na Amazônia pode se beneficiar também da inspeção de outros ambientes como o Cerrado, que pode servir como área de referência na análise. Em relação à Amazônia, o Cerrado tem formações vegetais e condições de imageamento MODIS bem distintas. Diferenças de cobertura vegetal podem causar diferentes efeitos bidirecionais, enquanto que diferenças na localização geográfica entre os ecossistemas resultam em diferentes condições atmosféricas para a geração de imagens. Por exemplo, quando comparado com a Amazônia, as condições atmosféricas mais favoráveis para aquisição de imagens no Cerrado podem produzir uma angulação de visada mais favorável para o sensor MODIS com provável redução relativa dos efeitos BRDF, um fator que ainda não foi investigado.

### **1.1. Hipóteses**

Com base no conhecimento de que a geometria de aquisição de dados do MODIS é uma fonte importante de variações intra- e interanuais de um ou mais IVs e na assunção de que o algoritmo MAIAC corrige adequadamente tais efeitos bidirecionais, testam-se as seguintes hipóteses:

- A magnitude dos efeitos BRDF sobre os IVs é diferente na Amazônia, quando comparado com outras áreas de referência,

como o Cerrado, em função das condições atmosféricas distintas durante a aquisição das imagens MODIS;

- O comportamento dos IVs, do início para o final da estação seca na Amazônia, é consistente entre si, após correção BRDF e comparação com dados de GPP (*Gross Primary Production*) e LUE (*Light Use Efficiency*) de torres de fluxo.

## **1.2. Objetivos**

Este trabalho buscou analisar a magnitude dos efeitos bidirecionais na Amazônia sobre a determinação de sete IVs e da reflectância das respectivas bandas do MODIS que os compõem, verificando se suas variações são consistentes entre si antes e após a correção dos efeitos BRDF pelo algoritmo MAIAC. O Cerrado serviu como área de referência para comparação dos resultados. Os sete IVs considerados na análise, calculados de bandas MODIS do visível, NIR e SWIR, foram: EVI, GRND (*Green-Red Vegetation Index*), NDII (*Normalized Difference Infrared Index*), NDVI, NDWI (*Normalized Difference Water Index*), PRI (*Photochemical Reflectance Index*) e SWND (*ShortWave infrared Normalized Difference*).

### **1.2.1. Objetivos específicos**

- Analisar comparativamente as variações sazonais na geometria de iluminação e de visada do MODIS na Amazônia e no Cerrado, discutindo a influência dos potenciais fatores que causam efeitos BRDF em cada ambiente;
- Verificar a magnitude dos efeitos BRDF na Amazônia para diferentes IVs e bandas, relacionando-os com condições atmosféricas distintas geralmente observadas durante a aquisição das imagens MODIS;

- Verificar se o comportamento dos IVs é consistente com dados de torres de observação na Amazônia, observando comparativamente o comportamento do EVI e dos demais IVs.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. MODIS**

O sensor MODIS está presente em duas plataformas orbitais, Terra e Aqua, com lançamentos realizados em 1999 e 2002, respectivamente. Ele é responsável pelo imageamento da Terra a cada um ou dois dias em órbitas polares sincronizadas. Enquanto a plataforma Terra faz sua passagem na parte da manhã, a plataforma Aqua cobre a mesma área na parte da tarde do mesmo dia no Brasil. Isto atribui ao conjunto de dados grande potencial para observar dinâmicas climáticas diárias. As plataformas Terra e Aqua, entretanto, não possuem somente o sensor MODIS, incluindo cinco sensores para outras finalidades, que não serão discutidas aqui.

O MODIS é um sensor de resolução espacial moderada, variando de 250 m a 1 km, que possibilita estudos em alta resolução temporal. Possui, ao total, 36 bandas (Tabela 2.1) posicionadas desde o visível até o infravermelho termal no espectro eletromagnético, o que o torna de grande capacidade radiométrica para diversas aplicações. Não é considerado, no entanto, um sensor hiperespectral, por não posicionar as bandas, mesmo que estreitas, de forma contígua. A previsão inicial de tempo de operação das plataformas Terra e Aqua era de seis anos, tendo sido ultrapassada por ambos os satélites, que continuam em operação desde seu ano de lançamento (NASA, 2018; JUSTICE et al., 1998; BARNES et al., 1998).

Tabela 2.1: Bandas do sensor MODIS.

Uso Primário	Banda	Comprimento de Onda (nm)
Superfície/Nuvens/Delimitação de aerossóis	1	620 – 670
	2	841 – 876
Superfície/Nuvens/Propriedades dos aerossóis	3	459 – 479
	4	545 – 565
	5	1230 - 1250
	6	1628 - 1652
	7	2105 - 2155
Oceano/Fitoplâncton/Bioquímica	8	405 – 420
	9	438 - 448
	10	483 - 493
	11	526 - 536
	12	546 - 556
	13	662 - 672
	14	673 - 683
	15	743 - 753
Vapor d'água atmosférico	16	862 - 877
	17	890 - 920
	18	931 - 941
Superfície/Temperatura de nuvens	19	915 - 965
	20	3.660 - 3.840
	21	3.929 - 3.989
	22	3.929 - 3.989
Temperatura atmosférica	23	4.020 - 4.080
	24	4.433 - 4.498
Vapor d'água em nuvens <i>cirros</i>	25	4.482 - 4.549
	26	1.360 - 1.390
	27	6.535 - 6.895
Propriedades de nuvens	28	7.175 - 7.475
	29	8.400 - 8.700
Ozônio	30	9.580 - 9.880
	31	10.780 - 11.280
Temperatura de nuvens/superfície	32	11.770 - 12.270
	33	13.185 - 13.485
Temperatura de topo de nuvens	34	13.485 - 13.785
	35	13.785 - 14.085
	36	14.085 - 14.385

Fonte: NASA (2018).

A partir do momento de seu lançamento, diversos produtos derivados das imagens MODIS foram desenvolvidos. Muitos deles passaram a ser oferecidos juntamente com as imagens de radiância (produto inicial) para a comunidade. Os produtos MODIS constituem novas fontes de informação, oferecendo dados processados em diversos níveis e prontos para os usuários, como os IVs. O índice EVI, por exemplo, um dos componentes do produto índice de vegetação do MODIS, se tornou de grande utilidade por facilitar a análise da vegetação de maneira rápida (HUETE et al., 2002). Como consequência do tempo de revisita de cena quase que diário do MODIS, há dados disponíveis com boa qualidade do pixel (baixa cobertura de nuvens e visada próxima do nadir) para observação da superfície terrestre. Por isso, a análise de séries temporais dos produtos MODIS facilita o estudo de dinâmicas da superfície terrestre, com destaque para a sazonalidade da vegetação em escala regional ou para a fenologia da vegetação (HILKER et al., 2009; ZHANG et al., 2006). Zhang et al. (2006) estimaram dinâmicas globais da fenologia da vegetação utilizando cinco métricas distintas, tendo como resultado uma avaliação positiva do sensor MODIS em relação à qualidade da informação gerada. Os autores utilizaram, como forma de avaliação das métricas geradas a partir das imagens, dados de campo e a variação de temperatura. Hilker et al. (2009) utilizaram dados hiperespectrais, gerados em torre de monitoramento, para avaliar sua consistência com dados MODIS, após um procedimento de correção dos efeitos BRDF utilizando o MAIAC. Os autores utilizaram o índice PRI para a estimativa da eficiência de uso da luz. Em termos gerais, os resultados indicaram consistência entre os dados de campo e os dados orbitais, permitindo afirmar que tanto o método de correção BRDF, quanto o uso das imagens, foram adequados para a aplicação do PRI em uma escala regionalizada.

## **2.2. Efeitos BRDF em sensores com amplo campo de visada**

O comportamento de diferentes alvos durante sua interação com a REM pode resultar em diferentes direções de espalhamento. Boa parte dos objetos presentes na superfície terrestre não são Lambertianos, ou seja, podem não possuir reflexão total e com a mesma angulação proporcional

à incidência de REM (JENSEN, 2009). Portanto, a resposta espectral depende da forma como o alvo é iluminado pelo Sol e visto pelo satélite.

Dito isso, pode-se afirmar que a reflectância de superfície é dada por uma função dependente da geometria de visada e da interação entre a REM e o alvo (geometria de iluminação), formando o conjunto de interação fonte-alvo-sensor. A quantidade de energia captada por um sensor, portanto, pode variar de acordo com o espalhamento bidirecional e não apenas com a variação de características físicas, químicas e biológicas dos alvos (MOURA, 2015; RANSON et al., 1985). Os efeitos BRDF são então definidos como a função de interação bidirecional entre fonte, alvo e sensor, considerando a reflectância como unidade principal.

Os produtos relacionados à BRDF para o sensor MODIS passaram a estar disponíveis para a comunidade científica juntamente com a distribuição das imagens do sensor. Isto tem possibilitado a criação de um campo de pesquisa voltado para o estudo dos efeitos bidirecionais sobre diferentes superfícies imageadas pelo MODIS (SCHAAF et al., 2002). Os efeitos BRDF passaram, então, a ser de grande importância para os estudos focados em vegetação, com destaque para o estudo de comportamentos sazonais de IVs (ASNER et al., 1998).

A influência dos efeitos BRDF pode ser exercida, considerando sua definição, de acordo com a variação no ângulo de visada de um sensor. Portanto, também se fazem presentes os efeitos bidirecionais na captura de cenas com o apontamento do sensor fora do nadir. Este apontamento pode estar relacionado com a angulação diretamente imposta ao sensor por posicionamento, ou mesmo com o campo de visada associado ao imageamento. Em uma comparação simplista, se uma lente do tipo “olho de peixe” estivesse posicionada em um satélite, apesar de sua capacidade em abranger grande parcela territorial em comparação com uma lente comum, a mesma seria mais suscetível aos efeitos BRDF nas bordas da imagem causados pela maior angulação na aquisição. Considerando que a vegetação possui comportamento anisotrópico, ou não-Lambertiano, estas diferenças resultam em valores de reflectância

potencialmente distintos de acordo com a geometria de visada (THENKABAIL et al., 2016; HODGSON; KAR, 2008).

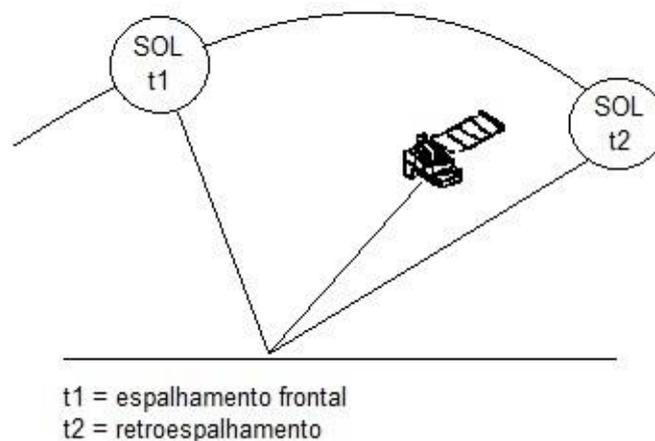
O sensor MODIS possui campo de visada largo, com um *swath* (largura do campo de visada) de 2.330 km (NASA, 2018). Na analogia anterior adotada, o MODIS funcionaria como uma lente “olho de peixe”. Em suas imagens, os efeitos BRDF estão presentes em maior intensidade, quando comparados aos de sensores de campo de visada mais estreitos, como os da série Landsat de satélites. A correção dos efeitos bidirecionais torna-se, portanto, um procedimento importante para obter a reflectância de superfície sem a influência da geometria de iluminação e visada, com a finalidade de tornar os dados comparáveis a outras aquisições realizadas no mesmo domínio espacial em outras datas. Sob outro ponto de vista, ao considerar a influência dos efeitos bidirecionais sobre os IVs, é possível extrair informação sobre a anisotropia da vegetação. Se por um lado os efeitos BRDF podem ser considerados como um ruído na análise de séries temporais, por outro lado eles também podem ser considerados como fonte de informação sobre a estrutura da vegetação (GALVÃO et al., 2013; KEMPENEERS et al., 2008; MOURA, 2015; MOURA et al., 2012).

Nas regiões da Amazônia e do Cerrado, o sensor que melhor expressa tais efeitos BRDF decorrentes da geometria de iluminação e de visada é o *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* (MISR), conforme demonstrado, respectivamente, pelos trabalhos de Moura et al. (2012) e Liesenberg et al. (2007). O MISR possui 9 câmeras multiespectrais intercalibradas, a bordo da plataforma Terra, a mesma do MODIS. Porém, ao contrário do MODIS, a aquisição multiangular sobre um determinado tipo de vegetação é praticamente simultânea, o que possibilita uma melhor observação dos efeitos bidirecionais. Por outro lado, a resolução espectral do MISR é relativamente baixa, contendo três bandas na faixa do visível e uma banda na região do NIR, com resolução espacial de 1 km. Comparado ao MODIS, a resolução temporal do MISR é relativamente baixa (16 dias)

### 2.2.1. Direções de imageamento

Para compreender os conceitos de efeitos bidirecionais, as direções de espalhamento da REM em sua interação com a superfície, quando captadas por um sensor, são usualmente divididas em duas formas principais de espalhamento detectado: o espalhamento frontal e o retroespalhamento (LYAPUSTIN, 1999; VERMONTE e KOTCHENOVA, 2008). Quando captada pelo sensor posicionado em direção oposta ao Sol (espalhamento frontal), a imagem tende a conter mais sombras. Isso ocorre pois esta é a posição (ou intervalo de posições) onde maior sombra é gerada pelo Sol nos alvos. O caso do retroespalhamento é exatamente o oposto, quando o sensor está posicionado do mesmo lado que o Sol em relação ao alvo imageado. Por estar na face mais iluminada, menos sombras são captadas. A Figura 2.1 apresenta as variações entre o retroespalhamento e o espalhamento frontal. Este é um conceito particularmente importante nos efeitos bidirecionais, estando principalmente ligado ao ângulo azimutal relativo (HILKER et al., 2009).

Figura 2.1: Direções majoritárias de espalhamento na interação sol-superfície-sensor.



Fonte: Produção do autor.

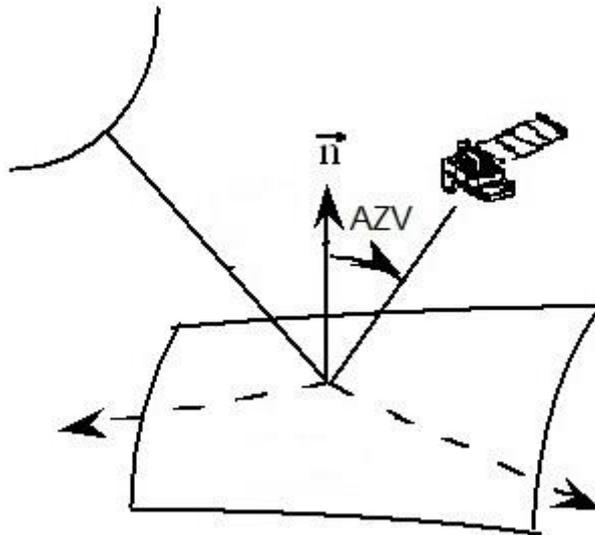
## **2.2.2. Variáveis de influência em efeitos bidirecionais MODIS**

Ao analisar os efeitos causadores de efeitos bidirecionais exclusivamente para o sensor MODIS, podemos destacar as variáveis de geometria de observação e iluminação, além da atmosfera. A seguir, é discutido cada um dos fatores.

### **2.2.2.1. Ângulo zenital de visada**

O ângulo zenital de visada (AZV) pode ser definido pelo ângulo que é formado entre o sensor e uma reta normal perpendicular, traçada a partir do alvo observado a partir da superfície (Figura 2.2). É especialmente importante na análise de angulação do pixel em algoritmos de seleção de pixels por qualidade, uma vez que pixels com alto AZV perdem qualidade radiométrica e sofrem efeitos atmosféricos mais intensos. Para o caso do MODIS, o AZV pode variar de  $\pm 55^\circ$  do nadir, com os pixels da borda da imagem representando condições extremas de observação. Shibayama e Wiegand (1985) definem o AZV como uma variável de grande influência conforme se aumenta a inclinação da observação realizada. Em um experimento controlado, realizado muito antes da existência da MODIS, o efeito do AZV foi medido regularmente em ângulos crescentes para o NIR. Os resultados mostraram com clareza a redução de sinal observada com o aumento do AZV, relacionando-se com as direções de espalhamento.

Figura 2.2: Ângulo zenital de visada (AZS) exemplificado na interação sol-superfície-sensor.

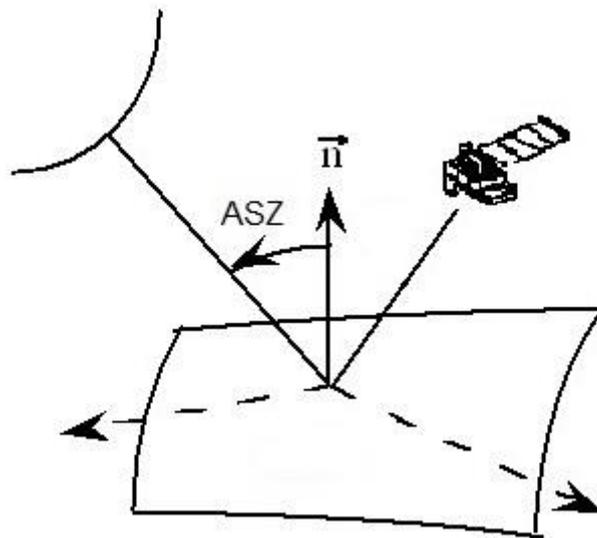


Fonte: Produção do autor

#### 2.2.2.2. Ângulo zenital solar

O ângulo zenital solar (AZS) pode ser definido pelo ângulo formado entre o Sol, no momento da aquisição, e uma reta normal perpendicular ao alvo imageado (superfície). Em termos gerais, é o AZV para a interação Sol-superfície. É importante, juntamente com o AZV, para a determinação de direção majoritária de espalhamento no momento da aquisição e no controle de interação atmosférica. Quanto maior for o AZS no momento de aquisição da imagem, maior será a quantidade de sombras vistas pelo satélite. Os efeitos de sombreamento serão mais nítidos com o aumento da resolução espacial. Diferenças sazonais no AZS tendem a ser maiores em médias latitudes, podendo alcançar valores consideráveis. Para Shibayama e Wiegand (1985), em seu estudo controlado, o AZS causou efeitos de incremento no sinal conforme foi aumentado a partir de 20 graus. Este comportamento, posteriormente, foi relacionado à interação com a direção de espalhamento e as próprias características do alvo estudado na banda NIR.

Figura 2.3: Ângulo zenital solar (AZS) exemplificado na interação Sol-superfície-sensor.



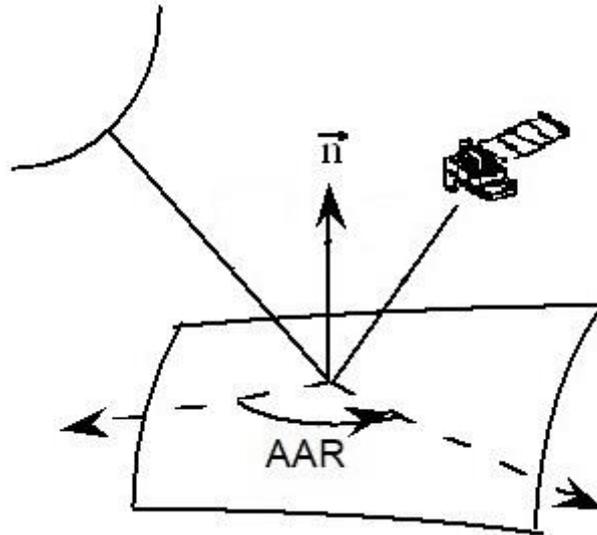
Fonte: Produção do autor.

### 2.2.2.3. Ângulo azimutal relativo

O ângulo azimutal relativo (AAR) é dado por uma diferença entre dois ângulos projetados na superfície (azimute): o azimute solar e o azimute do sensor. Um azimute é o ângulo projetado em um plano, não importando seu fator de declinação, apenas a orientação (SHIBAYAMA e WIEGAND, 1985; VERMONTE e KOTCHENOVA, 2008). Neste caso, o azimute central adotado pelo MODIS se situa na orientação norte, variando de 0 até 180 graus no produto MAIAC. O AAR é particularmente importante na definição do espalhamento majoritário presente em uma imagem ou direção de imageamento (retroespalhamento ou espalhamento frontal). Por considerar fatores de posição solar e do sensor, esta é a forma mais fácil de estabelecer a posição de espalhamento preferencial. Porém, somente com os outros dois ângulos (AZV e AZS), o espalhamento preferencial da imagem poderá ser completamente descrito. Hilker et al. (2009) encontraram valores de AAR variantes entre retroespalhamento e espalhamento frontal em observações MODIS para a estação seca, com observações entre 20 e

50 graus (retroespalhamento) e entre 130 e 150 graus (espalhamento frontal), dependendo da observação MODIS utilizada.

Figura 2.4: Ângulo azimutal relativo (AAR) exemplificado na interação sol-superfície-sensor.



Fonte: Produção do autor.

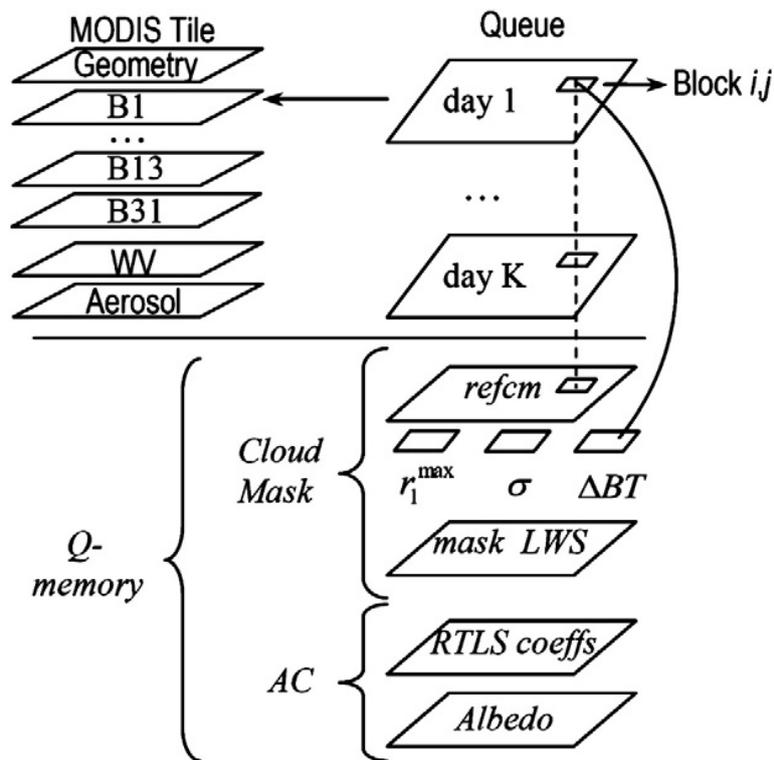
#### 2.2.2.4. Atmosfera

A atmosfera é um fator de influência nos efeitos bidirecionais pela atenuação/espalhamento da energia e pela presença de nuvens. A influência atmosférica poderá ser maior ou menor dependendo de sua composição no momento da aquisição da imagem (LYAPUSTIN et al., 2012). De forma geral, quanto mais aerossóis estiverem presentes, maior será o espalhamento atmosférico. Este efeito se intensifica com o aumento do AZV e do AZS, visto que a distância percorrida pela REM se torna maior com visadas mais distantes do nadir. A presença de nuvens, por sua vez, é responsável pela eliminação de pixels em processos de geração de imagens compostas, uma vez que a observação óptica da superfície se torna inviável.

### 2.3. MAIAC: correção dos efeitos atmosféricos e BRDF

O MAIAC (*Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction*) é um algoritmo de correção atmosférica e multiangular para imagens MODIS (LYAPUSTIN et al., 2008). De forma geral, ele foi desenvolvido com a finalidade de converter com maior precisão os dados para reflectância de superfície considerando parâmetros atmosféricos e características intrínsecas do sensor, como o apontamento no pixel e as variações naturais de iluminação da cena. Desta forma, o algoritmo é capaz de corrigir os efeitos BRDF presentes nas imagens e nos produtos MODIS de forma satisfatória. Mais especificamente, o algoritmo pode ser dividido em: detecção de nuvens, remoção de efeitos de aerossóis e correção atmosférica (LYAPUSTIN et al., 2011a; 2011b; 2012). As etapas funcionam com a aplicação de uma janela móvel de série temporal de até 16 dias, na resolução de 1 km. Desta forma, os parâmetros são ajustados automaticamente e geram um produto corrigido contínuo. A correção BRDF, descrita por Lyapustin et al. (2012), que faz parte da divisão de correção atmosférica do algoritmo, considera parâmetros de albedo espectral de superfície e fatores de influência da reflectância bidirecional na janela de série temporal para adaptar a função de distribuição da reflectância bidirecional do modelo. A Figura 2.5 demonstra o procedimento geral do algoritmo MAIAC. É possível observar que o ajuste de geometria encontra-se no topo da cadeia de ações do algoritmo em um *tile* (ou cena) do MODIS. O algoritmo possui blocos de movimentação dentro das observações diárias, que aplicam as correções após a aplicação de máscara de nuvens com base em classificações automáticas de neve, água e nuvens (etapa “refcm”).

Figura 2.5: Fluxograma de funcionamento geral do algoritmo MAIAC.



Fonte: Lyapustin et al. (2012).

O modelo de transferência radiativa do MAIAC para modelagem BRDF é o Ross-Thick Li-Sparse (RTLS). *Look-up tables* (LUT) também armazenam funções pré-computadas de transferência radiativa e permitem modelagem precisa da radiação no topo da atmosfera (ou *top of the atmosphere*, TOA) para os comprimentos de onda captados pelo sensor, utilizando parâmetros como a geometria de visada (LYAPUSTIN et al., 2011a; HILKER et al., 2017). O MAIAC foi adotado como um produto oficial do MODIS. Os dados corrigidos para os efeitos atmosféricos são disponibilizados pela USGS (*Unites States Geological Service*) gratuitamente.

Ao aplicar o MAIAC para dados MODIS na Amazônia e compará-los a dados medidos em torre de monitoramento, Hilker et al. (2009) encontraram forte correlação para o índice PRI, indicando que o algoritmo de correção se comportou de forma satisfatória. Desta forma, torna-se possível utilizar dados MODIS para tornar variáveis, como o IV utilizado,

regionalizadas. Nesse sentido, Hilker et al. (2017) destacaram que a aplicação do MAIAC em larga escala permite a inversão de modelos biofísicos, ao explorar as características multiangulares do MODIS. Moura (2015) utilizou em seu estudo os dados MODIS automaticamente corrigidos pelo MAIAC para explorar a multi-angularidade, buscando relacionar tais parâmetros às medidas de rugosidade de dosséis florestais na Amazônia. A base de comparação utilizada pela autora foram levantamentos com LIDAR (*Light Detection And Ranging*) e atributos de radar orbitais, tendo sido encontradas boas correlações entre os dados. Além disso, foi encontrado bom relacionamento entre os dados de anisotropia e estimativas do índice de área foliar (IAF).

#### **2.4. Índices de vegetação**

Os índices de vegetação (IVs), de forma geral, correspondem a formulações matemáticas entre faixas espectrais. Os IVs são utilizados com a finalidade de ressaltar, de forma visual ou numérica, atributos espectrais da vegetação (FERREIRA et al., 2008; JACKSON e HUETE, 1991). Estes atributos, por sua vez, possuem respostas diferenciadas para determinadas observações do alvo (vegetação) como, por exemplo, o estresse hídrico (THENKABAIL et al., 2016). Dessa forma, é possível estabelecer relações entre o estado da vegetação, desmatamento ou mesmo dinâmicas fenológicas pela aplicação de IVs espectrais. Em suas formulações mais comuns, os IVs costumam utilizar a diferença normalizada entre bandas espectrais, a exemplo do índice NDVI. Esta característica introduz um peso igualitário entre as bandas utilizadas. Porém, existem IVs de formulações não-normalizadas, a exemplo do EVI (FERREIRA et al., 2008). Os IVs considerados para este trabalho serão descritos matematicamente a seguir, com as regiões espectrais e com as bandas MODIS comumente utilizadas na literatura para a sua aplicação.

### 2.4.1. NDVI

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), proposto por Rouse et al. (1973), é composto por uma diferença normalizada entre as regiões espectrais do NIR e do vermelho. Sua aplicação no campo da ciência é muito ampla, sendo o IV mais comum em trabalhos que abordam vigor vegetativo (FERREIRA et al., 2008). É também muito utilizado para a identificação de florestas nativas, pois ressalta a vegetação em relação a outras coberturas da terra (LIMA et al., 2013). Em agricultura, o NDVI é tido como parâmetro importante no monitoramento de safras. Para o sensor MODIS, o NDVI pode ser calculado pela atribuição das bandas 1 e 2, respectivas às regiões do vermelho e do NIR. A formulação matemática do NDVI e as bandas do MODIS usadas para seu cálculo estão indicadas na Equação 2.1.

$$NDVI = \frac{(NIR_{b2} - Vermelho_{b1})}{(NIR_{b2} + Vermelho_{b1})} \quad (2.1)$$

### 2.4.2. EVI

O EVI (*Enhanced Vegetation Index*), proposto por Huete et al. (1997), se destaca como o mais utilizado IV não-normalizado, com aplicações potenciais semelhantes as do NDVI. O EVI foi proposto para minimizar os problemas de saturação do NDVI em coberturas vegetais densas e para reduzir o efeito do substrato em vegetação esparsa. O EVI possui, devido à sua formulação, um fator de substrato (ou solo) e também um fator de compensação atmosférica pelo uso da banda equivalente a região espectral do azul. Devido a isso, o EVI é considerado um índice de maior complexidade do que a diferença normalizada simples em uma razão de bandas (THENKABAIL et al., 2016). Porém, Galvão et al. (2011, 2013) e Moura et al. (2012) encontraram alta dependência deste índice para a região do NIR, indicando que seu resultado será muito correlacionado com a banda NIR utilizada para representá-lo. Além disso, os referidos autores indicam que o EVI é sensível às variações nas geometrias de

iluminação e visada, gerando influências nos resultados quando se utilizam sensores como o MODIS, de largo campo de visada. Nestes casos, a correção BRDF é recomendada para a correta interpretação do índice. A formulação matemática do EVI está exposta na Equação 2.2.

$$EVI = 2,5 \frac{[NIR_{b2} - Vermelho_{b1}]}{[NIR_{b2} + 6(Vermelho_{b1}) - 7,5(Azul_{b3}) + 1]} \quad (2.2)$$

### 2.4.3. PRI

O PRI (*Photochemical Reflectance Index*), proposto por Gamon et al (1997), é um índice sensível aos pigmentos carotenoides, como a xantofila. Tal característica se deve ao posicionamento das bandas utilizadas na região do visível, mais especificamente no verde. Assim, sua aplicação é de interesse dos campos de pesquisa em fitossanidade, tanto em áreas naturais quanto agricultura, para identificar o momento de início da senescência em plantas. Sua aplicação está diretamente relacionada com as estimativas de eficiência de uso da luz (ou *light use efficiency*, LUE) (THENKABAIL et al., 2016). Matematicamente, é representado por uma razão de bandas normalizadas. Por utilizar duas bandas do verde muito próximas em comprimentos de onda, o seu cálculo a partir de sensores multiespectrais convencionais, como os das missões Landsat e CBERS (*China-Brazil Earth-Resources Satellite*), não é possível. Portanto, o emprego desse índice é feito com o uso sensores de campo (espectroradiômetros) ou hiperespectrais aerotransportados e orbitais, conforme apresentado por Thenkabail et al. (2016). Como exceção, o sensor MODIS, apesar de multiespectral, possui bandas suficientemente estreitas e bem localizadas para a determinação aproximada deste índice, gerando estudos com dados MODIS focados no uso deste IV (HILKER et al., 2009). A formulação matemática do PRI está indicada na Equação 2.3, com a utilização das bandas 11 e 12 do MODIS.

$$PRI = \frac{(Verde_{b11} - Verde_{b12})}{(Verde_{b11} + Verde_{b12})} \quad (2.3)$$

#### 2.4.4. NDWI

O NDWI (*Normalized Difference Water Index*), proposto por Gao (1996), é composto pela diferença normalizada entre duas bandas da região espectral do NIR. O índice tem como sua principal aplicação, sendo esse o propósito de sua criação, a estimativa de variabilidade da presença de água nas folhas e, conseqüentemente, em dosséis (ROBERTS et al., 2006; GAO, 1996). A formulação matemática do NDWI está exposta na Equação 2.4.

$$NDWI = \frac{(NIR_{b2} - NIR_{b5})}{(NIR_{b2} + NIR_{b5})} \quad (2.4)$$

#### 2.4.5. NDII

O NDII (*Normalized Difference Infrared Index*), proposto por Hunt e Rock (1989), é um índice de diferença normalizada que opera exclusivamente na região do infravermelho com uma banda no NIR e outra no SWIR. Sua aplicação em vegetação é difundida pela eficiência em identificação de umidade, de uma forma geral. Tal sensibilidade resulta em significativas variações sazonais de acordo com a disponibilidade hídrica da estação (RODRÍGUEZ-MORENO e BULLOCK, 2013). A formulação matemática do NDII está exposta na Equação 2.5.

$$NDII = \frac{(NIR_{b2} - SWIR_{b6})}{(NIR_{b2} + SWIR_{b6})} \quad (2.5)$$

#### 2.4.6. GRND

O GRND (*Green-Red Normalized Difference*), proposto por Moura et al. (2017), é um índice de diferença normalizada de bandas situadas apenas na região visível do espectro eletromagnético, mais especificamente nas faixas espectrais do verde e do vermelho. Foi proposto para monitorar o brotamento de folhas novas na Amazônia com dados hiperespectrais obtidos em uma torre na Floresta Nacional (FLONA) Tapajós. Na literatura, existem proposições semelhantes para outras finalidades em caráter multiespectral, podendo ser denominado por GRVI (*Green-Red Vegetation Index*) (MOTOHKA et al., 2010) e também MPRI (*Modified Photochemical Reflectance Index*) (YANG et al., 2008). Considerando sua composição espectral de bandas na equação, suas aplicações em vegetação evidenciam características sobre a fitossanidade em relação à sua coloração, perda de folhas e brotamento de folhas jovens (MOURA et al., 2017; MOTOHKA et al., 2008). É um índice suscetível a influência da sombra, e pouco recomendado para o uso sobre corpos hídricos (LINHARES et al., 2013). Por tratar apenas de bandas no visível, sua aplicação é ampla em uma grande variedade de sensores (MOURA et al., 2017; MONTIBELLER et al., 2017; PETRI et al., 2017). A formulação matemática do GRND está exposta na Equação 2.6.

$$GRND = \frac{(Verde_{b4} - Vermelho_{b1})}{(Verde_{b4} + Vermelho_{b1})} \quad (2.6)$$

#### 2.5. Fenologia da vegetação por satélites na Amazônia e no Cerrado

Fenologia, de uma forma geral, pode ser definida pelo estudo da temporalidade sazonal de eventos, considerando seu ciclo de vida. É, portanto, um campo de estudo focado em dinâmicas temporais. A fenologia da vegetação se caracteriza pelo estudo de tais dinâmicas aplicado a plantas em diversas escalas como dosséis, unidades da paisagem ou mesmo biomas (MACHADO, 2017; RATHCKE e LACEY, 1985). As alterações fenológicas vegetais são conhecidas como

respostas da vegetação a condicionantes de seu estado biológico, tipicamente a variabilidade climática sazonal. Dessa forma, é entendido que a mudança no clima em uma escala temporal definida se apresenta como o principal fator da presença de alteração fenológica em plantas. A definição de períodos, como estação seca ou estação chuvosa, é uma forma típica de caracterização de domínios temporais e climáticos para a fenologia da vegetação, procurando concentrar dentro dos mesmos um conjunto de informações utilizável para a obtenção de resultados sobre a dinâmica fenológica do objeto de estudo (MACHADO, 2017; ANDERSON, 2012).

Os estudos focados em fenologia da vegetação necessitam da definição de uma ou mais formas de obtenção dos dados, geralmente organizados em séries temporais. São ressaltados, portanto, os dados obtidos por sensoriamento remoto para a aplicação em fenologia da vegetação. Entretanto, os dados obtidos a partir de plataformas orbitais não são o único destaque dentro do campo desta aplicação em sensoriamento remoto. Diversos trabalhos utilizam sensores instalados em torres de monitoramento para detectar alterações fenológicas, sejam eles associados a dados de maior abrangência territorial ou não (HILKER et al., 2017; MOURA et al., 2017). Dentre os principais sensores orbitais utilizados para estudar a fenologia da vegetação, destacam-se os que possuem maior disponibilidade de dados em séries temporais ou com alta revisita de cena, evitando problemas como a eventual cobertura de nuvens e a perda de informação biofísica da vegetação por resolução temporal baixa.

O sensor MODIS, dentre outras características positivas para a fenologia de vegetação, possui resoluções temporal e espectral adequadas, além da cobertura de terreno com resolução espacial moderada para estudos em escala regional. O MODIS tem sido utilizado em estudos de fenologia da vegetação em grandes áreas na Amazônia e no Cerrado (MOURA et al., 2017; LIESENBERG et al., 2007). A aplicação de sensores como os da série Landsat (OLI e TM e ETM+), de menor resolução espectral e maior resolução espacial (em relação ao MODIS), se faz possível para

estudos focados em regiões mais específicas, possuindo um tempo de revisita aceitável. Destaca-se a utilização de sensores hiperespectrais para tais finalidades, sendo que os mesmos possuem grande potencial de análise dos dados devido a sua fina resolução espectral. Porém, como desvantagem significativa, têm-se a pouca disponibilidade de dados hiperespectrais organizados espacialmente e temporalmente de forma a possibilitar estudos fenológicos para a vegetação (THENKABAIL et al., 2016; JACON, 2016).

### **2.5.1. Aplicações na Amazônia**

No contexto do estudo da fenologia da vegetação para a Amazônia, resultados controversos têm sido encontrados para diferentes estudos considerando a aplicação do índice EVI durante eventos de secas severas. Saleska et al. (2007) observaram que houve um aumento na taxa de verdejamento pela variação positiva do índice ao longo da seca severa de 2005. De forma comparativa, porém com resultados contraditórios, Xu et al. (2011) observaram declínio na mesma taxa de verdejamento pelo EVI, desta vez no contexto da seca intensa de 2010. Os resultados de Saleska et al. (2007) geraram outras pesquisas para tentar entender o possível comportamento inesperado do EVI na Amazônia para eventos de secas severas, respondendo positivamente ao aumento da insolação e a menor disponibilidade hídrica. As variações sazonais do EVI, de acordo com a literatura, podem ter relação com o brotamento de folhas novas do início para o final da estação seca (*leaf flush*), eventuais mudanças no índice de área foliar (IAF) em folhas jovens e maduras, modificações na estrutura do dossel pela mortalidade de árvores e variações diurnas do conteúdo de água das folhas (ANDERSON et al., 2010; BRANDO et al., 2010; FROLKLING et al., 2011; MYNENI et al., 2007).

Como uma outra linha de raciocínio, buscando explicar o motivo das variações sazonais para o índice EVI, Galvão et al. (2011; 2013) e Moura et al. (2012), na análise de dados MODIS (Terra), Hyperion (EO-1) e MISR (Terra), demonstraram que o índice possui grande sensibilidade a

efeitos de iluminação e de visada. Os denominados efeitos bidirecionais são realçados por sensores com largo campo de visada, como o MODIS. De fato, os resultados evidenciaram que o EVI, por sua característica não-normalizada, torna-se muito dependente da região do NIR e, ao mesmo tempo, é sensível à direção de imageamento do MODIS para efeitos BRDF. Morton et al. (2014) corrigiram uma série temporal MODIS para os efeitos BRDF, obtendo como resultado uma redução na variabilidade sazonal do EVI. O modelo de correção utilizado considerou a posição relativa do satélite e do Sol, ou ângulo azimutal relativo. Por outro lado, a correção de dados MODIS para os efeitos BRDF, feita por outros autores na Amazônia usando o MAIAC (MOURA et al., 2017), ainda indicou um incremento residual do EVI do início para o final da estação seca. Embora com menor magnitude, o efeito persistiu após a correção BRDF. Os resultados apresentados reafirmam a necessidade de ampliação de estudos sobre a fenologia da vegetação na Amazônia com dados já corrigidos para os efeitos.

### **2.5.2. Aplicações no Cerrado**

No Cerrado, usando dados MODIS, se destacam trabalhos que buscam medir a dinâmica sazonal e a separabilidade de fitofisionomias do bioma (BORGES, 2014; SILVA et al., 2010; LIESENBERG et al., 2007). O maior enfoque para este tipo de aplicação se dá pela grande variabilidade fitofisionômica do bioma, resultando em uma maior mistura de composições de campos, savanas e florestas (KLINK e MACHADO, 2005; BORGES, 2014; IBGE, 2017). Borges (2014) utilizou dados MODIS organizados em série temporal de 2000 até 2011, com a aplicação do índice EVI, para caracterizar a fenologia da cobertura florestal de Cerrado no Oeste da Bahia. Para isso, os dados foram classificados utilizando o algoritmo *spectral angle mapper* (SAM), precedido pela escolha de um filtro adequado à área de estudo. Os resultados apresentaram grande heterogeneidade de acordo com a composição fenológica. Variações sazonais significativas, atribuídas à variabilidade climática local, também foram encontradas.

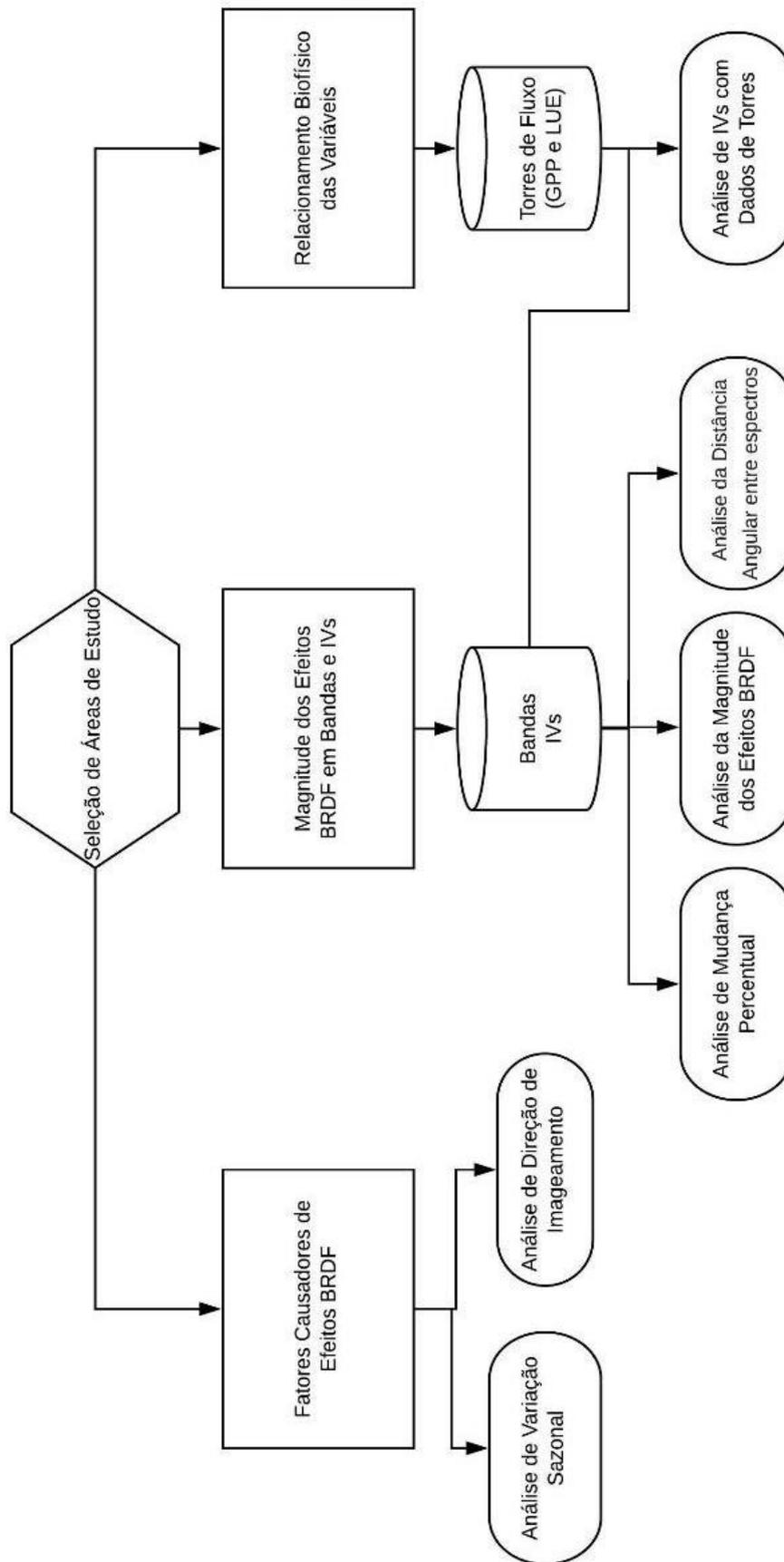
Silva et al. (2010) utilizaram o modelo linear de mistura espectral (MLME) aplicado sobre imagens MODIS da região do Cerrado mato-grossense para identificar diferentes fitofisionomias, em uma escala temporal de 2000 até 2002. Os resultados obtidos indicaram que a utilização das frações solo e sombra, resultantes do MLME, foram mais apropriadas à discriminação de fitofisionomias durante a estação seca. Porém, para a discriminação de composições fitofisionômicas muito semelhantes, os autores indicaram a utilização das imagens fração derivadas da estação chuvosa.

Liesenberg et al. (2007), por sua vez, buscaram caracterizar a dinâmica sazonal de cinco diferentes fitofisionomias de Cerrado, bem como analisar sua separabilidade espectral, pela aplicação dos índices NDVI e EVI sobre imagens MODIS do ano de 2004. Os resultados mostraram que o NDVI se apresentou mais eficiente para a discriminação de fitofisionomias na estação seca, havendo aumento na facilidade de discriminação da estação chuvosa para a seca. Além disso, destacaram a Floresta Estacional decídua como a fitofisionomia mais caracterizada pela perda de folhas entre as estações chuvosa e seca, e também pelo rápido verdejamento com a volta das precipitações ao final da estação seca. A mistura dos dois objetivos em comum evidencia, portanto, que estudos fenológicos no Cerrado impõem a necessidade de boa separabilidade entre grupos florísticos em seu extenso gradiente natural.

### **3 METODOLOGIA**

As etapas metodológicas deste trabalho estão expostas na Figura 3.1. Inicialmente, foi feita a seleção de áreas de estudo no âmbito de biomas/ecossistemas desejados para o estudo. Posteriormente, áreas de estudo em escala mais detalhada foram definidas para cada etapa. A primeira etapa analítica foi a de investigação dos fatores causadores dos efeitos BRDF, com análises de variação sazonal. Em seguida, foi mensurada a magnitude dos efeitos BRDF tanto em bandas quanto em IVs selecionados em três diferentes análises. Finalmente, os IVs foram comparados com dados de torres de fluxo.

Figura 3.1: Metodologia de trabalho usada na investigação.



Fonte: Produção do autor.

### **3.1. Seleção das áreas de estudo e obtenção dos dados e produtos MODIS**

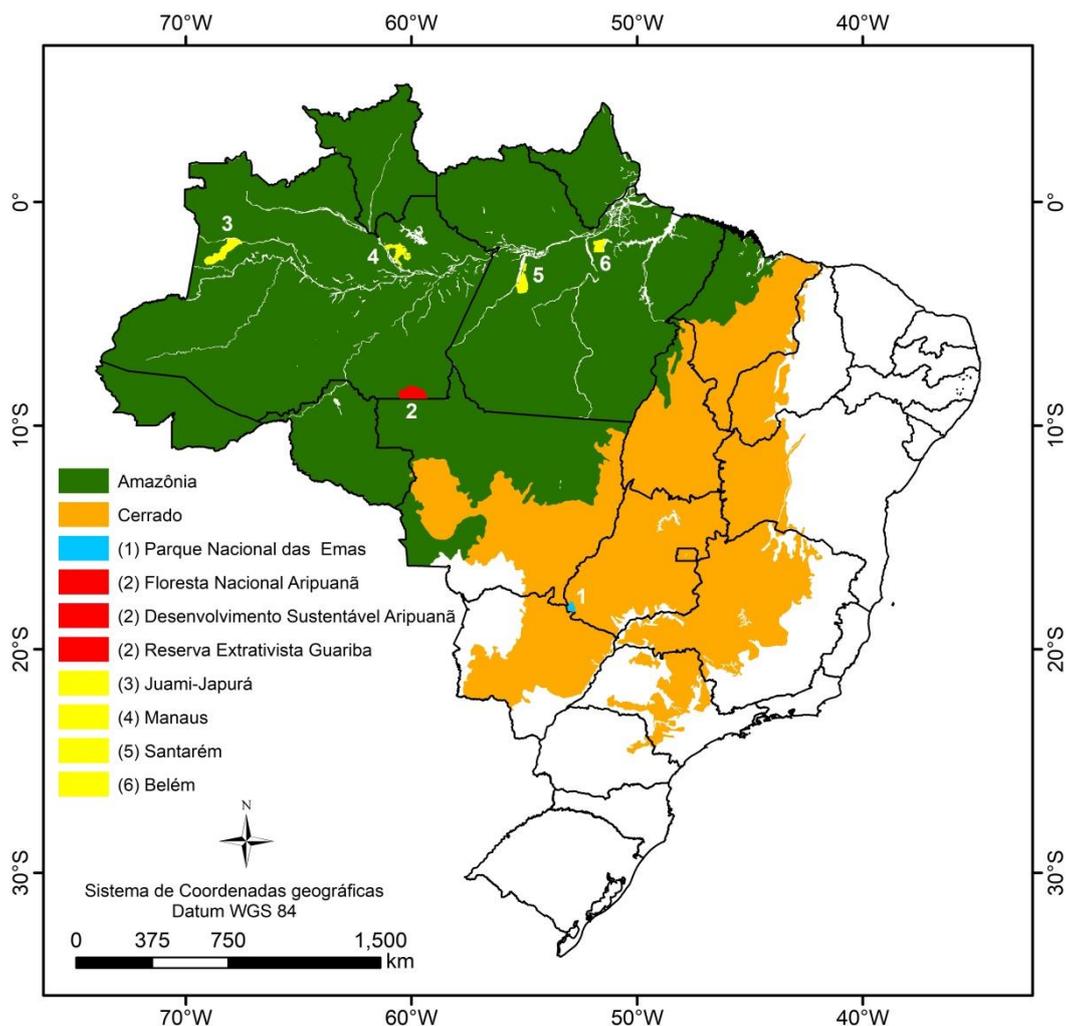
O estudo incluiu a Amazônia e o Cerrado, que correspondem a regiões contíguas no território brasileiro e possuem, juntos, grande representatividade da área total do país (Figura 3.2). Estes ecossistemas foram selecionados por conter tipos de vegetação distintos e por representar condições atmosféricas completamente diferentes durante a aquisição das imagens MODIS. Portanto, o Cerrado serviu de referência de comparação de resultados obtidos na Amazônia. A diferenciação no clima afeta a disponibilidade de imagens com boa qualidade ou o número de pixels com alta qualidade radiométrica nos produtos MODIS. Ela propicia a análise da variabilidade nos parâmetros descritores da geometria de iluminação e de visada em cada ambiente.

Para este trabalho, os limites adotados para a Amazônia e o Cerrado respeitam a divisão climática e de vegetação apresentada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018). É importante ressaltar que esta divisão se diferencia das demais divisões definidas para fins administrativos, como a Amazônia Legal, em área de abrangência e limites de transição. Tal escolha se justifica pela necessidade de analisar as áreas escolhidas em termos de fenologia da vegetação e não em uma delimitação político-administrativa.

O Cerrado e a Amazônia foram utilizados em sua área total em parte da etapa de análise da variação sazonal e na análise de mudança percentual da reflectância das bandas do MODIS e de seus IVs. Posteriormente, áreas de estudo menores foram definidas em Unidades de Conservação (UCs) com a finalidade de isolar características da vegetação de florestas ou de savanas. Nas etapas de análise de variação sazonal, de análise por componentes principais e parcialmente na análise de mudança percentual de dados introduzidas com a correção BRDF, as áreas definidas foram um conjunto de três UCs no sul da Amazônia (Reserva extrativista Guariba, Floresta Nacional de Aripuanã e Reserva de Desenvolvimento

Sustentável Aripuanã), considerando amostragens de 100 pixels em cada área para as análises. Finalmente, para as etapas de análise da magnitude dos efeitos BRDF, análise da distância angular entre espectros e análise de IVs com dados de torres de fluxo, as UCs foram selecionadas para tratar somente da Amazônia em uma larga extensão longitudinal. Nas duas primeiras etapas citadas, quatro áreas foram amostradas em 400 pixels (Juami-Japurá, Manaus, Santarém e Belém) de forma a representar áreas na Amazônia em uma latitude próxima (próximas a 2 graus) e em uma maior amplitude longitudinal. Na etapa de comparação com dados de torres de fluxo, Juami-Japurá foi excluída pela ausência de dados e a amostragem adotou a extensão de janelas de 3x3 pixels ao redor das torres.

Figura 3.2: Localização dos biomas selecionados para o trabalho.



Fonte: Produção do autor. Dados IBGE (2018).

Os dados MODIS foram utilizados a partir de duas fontes: o MAIAC em composições de 16 dias e resolução de 1 km, fonte principal da investigação dos efeitos BRDF e sua correção; e o produto MOD13A2, de IVs compilados em 16 dias em resolução de 1 km, utilizado de maneira complementar na demonstração dos fatores causadores de efeitos BRDF. Estes dados são disponibilizados gratuitamente pela USGS em diferentes níveis de processamento. Os dados MAIAC foram utilizados originalmente sem a correção BRDF, porém com a correção atmosférica (LYAPUSTIN et al., 2012). O processamento dos dados, incluindo a correção BRDF, foi parcialmente realizada por Thomas Hilker (*in memoriam*). A última fonte de dados utilizada no trabalho foram torres de fluxo na Amazônia (SALESKA et al., 2013). Foram utilizados dados de GPP e LUE das torres de Manaus (K34), Santarém (K67) e de Belém (CAX).

### **3.2. Fatores causadores de efeitos BRDF na Amazônia e Cerrado**

A investigação dos fatores causadores dos efeitos BRDF teve como base os dados auxiliares dos produtos MODIS. Parâmetros descritores da geometria de aquisição de dados em composições de múltiplas datas e de qualidade atmosférica do pixel foram analisados.

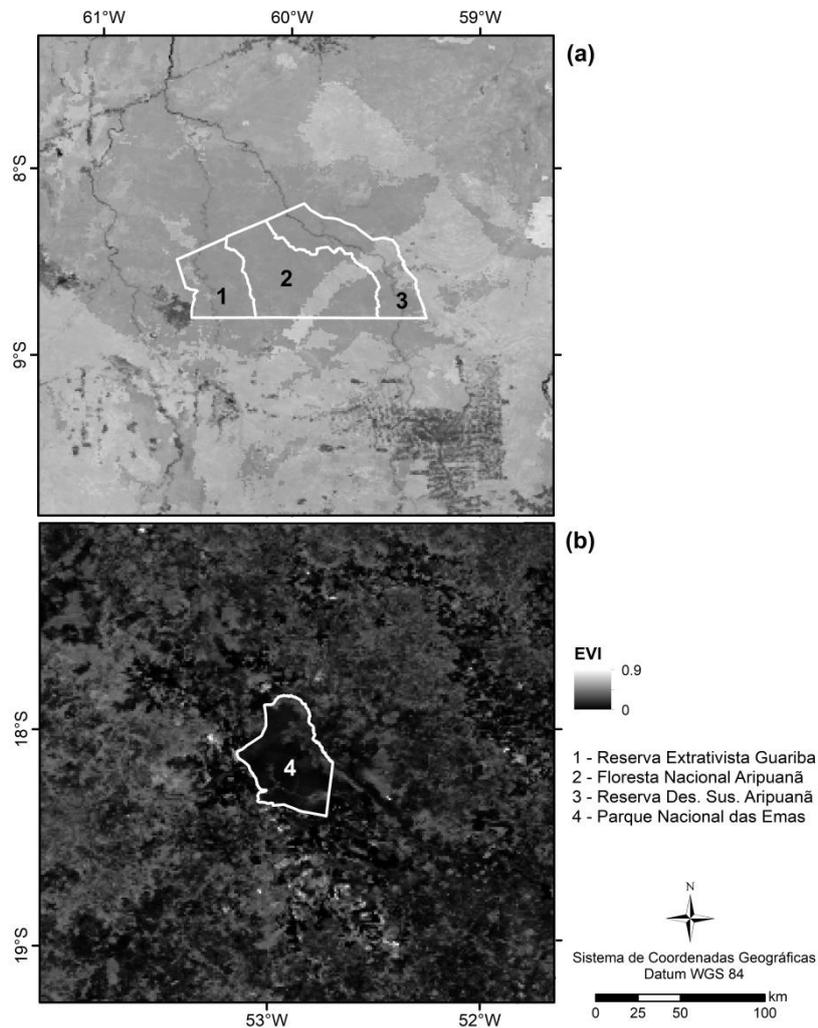
#### **3.2.1. Análise comparativa da variação em AZS e AZV**

Os dados utilizados para esta análise foram derivados do produto MODIS MOD13A2 para o ano de 2008, em resolução espacial de 1 km e composições de 16 dias. Este ano foi escolhido por não ter apresentado evento de seca severa, propiciando a observação de um comportamento padrão ou regular no regime climático dos dois ecossistemas. Para isso, dados pluviométricos (CEMADEN, 2018) para as cidades de Manaus (AM) e Belém (PA) foram inspecionados interanualmente para confirmar 2008 como um ano sem anormalidades climáticas relevantes para a análise.

Usando as delimitações completas da Amazônia e do Cerrado, o AZV e o AZS foram espacializados em composições mensais com foco nas alterações sazonais observáveis em larga escala. Outras variáveis como o dia da composição e a qualidade do pixel pelo produto MOD13A2 foram utilizadas de forma a explicar as mudanças sazonais de acordo com a cobertura de nuvens e seleção de pixels.

Posteriormente, para consolidar os resultados da etapa anterior, uma análise focada em três unidades de conservação contíguas na Amazônia (Floresta Nacional de Aripuanã, Reserva Extrativista do Guariba e Reserva de Desenvolvimento Sustentável Aripuanã) e em uma no Cerrado (Parque Nacional das Emas) foi promovida utilizando os mesmos dados para avaliação do ASZ, AZV e AAR para o ano de 2008 (Figura 3.3). Estas unidades foram selecionadas para representar áreas com vegetação distinta, variando de florestas ombrófilas densas na Amazônia até savanas e vegetação arbustiva no Cerrado. Uma amostragem aleatória de 100 pixels foi estabelecida dentro das áreas na Amazônia e no Cerrado.

Figura 3.3: Localização das unidades de conservação (UCs) selecionadas para análise na (a) Amazônia (Floresta Nacional de Aripuanã, Reserva Extrativista do Guariba e Reserva de Desenvolvimento Sustentável Aripuanã) e no (b) Cerrado (Parque Nacional das Emas).



Fonte: ICMBIO (2018) e Autor.

### 3.2.2. Análise comparativa da direção de imageamento e do AAR

Esta análise foi feita em duas etapas usando dados MODIS (MAIAC) de reflectância de superfície das bandas 1 a 7, não corrigidos para os efeitos bidirecionais e agregados em composições de 16 dias (1 km de tamanho de pixel): (a) fixando uma data em 2008 e variando a direção preferencial de imageamento para a Floresta Nacional de Aripuanã e Parque Nacional das Emas; e (b) usando dados MODIS (MAIAC) de várias datas ao longo da estação seca (junho a outubro) de 2008 e analisando a variação temporal de AAR sobre estas UCs.

Em ambos os casos, com a finalidade de detectar variações de brilho decorrentes destes fatores, aplicou-se análise por componentes principais (ACP) sobre os dados de reflectância. Basicamente, a ACP busca a redução da dimensionalidade dos dados através da combinação linear da resposta espectral das bandas (no caso analisado), descorrelacionando e organizando os dados em função da variância (WOLD et al., 1987). As primeiras componentes, de maior variância, concentram a maior parte da informação, podendo ser utilizadas ao invés do conjunto total de bandas para reduzir a dimensionalidade dos dados. No presente trabalho, na primeira análise, as variáveis utilizadas para ACP foram os valores de reflectância das primeiras sete bandas do MODIS correspondentes a uma única data, mas de diferentes direções de espalhamento e unidades de conservação na Amazônia e no Cerrado ( $n = 100$  pixels por site). Na segunda análise, as variáveis utilizadas para ACP foram os valores de reflectância das primeiras sete bandas do MODIS correspondentes a diferentes datas na estação seca para dois sites (um na Amazônia e outro no Cerrado).

Na primeira etapa da análise, fixou-se o dia juliano 200 (18 de julho) de 2008 e amostrou-se 100 pixels sobre cada uma das duas UCs. Com isso, manteve-se o estágio fenológico da vegetação fixo para se analisar os efeitos bidirecionais da direção de imageamento. O conjunto de dados da primeira parte da análise totalizou, portanto, 200 pixels. Os dados MODIS (MAIAC) foram separados nas composições de 16 dias de acordo com a direção de imageamento: pixels vistos na direção de retroespalhamento (AAR próximo a  $180^\circ$ ) e pixels imageados na direção de espalhamento frontal (AAR próximo a  $0^\circ$ ). Vale lembrar não há um valor específico de AAR que defina um limiar entre as direções prioritárias de espalhamento, sendo ele um indicativo da direção com maior presença em amostragens de acordo com o valor. Autovalores, autovetores e escores componentes principais foram avaliados.

Na segunda etapa da análise, a direção prioritária de espalhamento foi mantida em retroespalhamento. Foram considerados os valores de reflectância de superfície das primeiras sete bandas do MODIS (MAIAC)

nos meses de julho, agosto, setembro e outubro. Utilizando o mesmo conjunto de pixels, procedeu-se a aplicação de ACP de forma similar à etapa anterior.

### 3.3. Magnitude dos efeitos BRDF em bandas e IVs

A avaliação da magnitude dos efeitos BRDF, tanto nas bandas MODIS quanto nos IVs selecionados, teve como objetivo demonstrar espacialmente e estatisticamente os impactos da correção BRDF na Amazônia. Nesta etapa, como nas anteriores, o Cerrado foi adotado como um bioma de referência, mas, posteriormente, o foco foi a Amazônia, diante de resultados preliminares que indicaram a maior importância dos efeitos BRDF neste ambiente.

Nove bandas do MODIS foram selecionadas para compor esta análise e para o posterior cálculo dos IVs. As bandas estão listadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Bandas do sensor MODIS usadas nos cálculos dos índices de vegetação selecionados.

<b>Banda</b>	<b>Comprimento de Onda (nm)</b>	<b>Região Espectral</b>
1	620 - 670	Vermelho
2	841 - 876	NIR
3	459 - 479	Azul
4	545 - 565	Verde
5	1230 - 1250	NIR
6	1628 - 1652	SWIR
7	2105 - 2155	SWIR
11	526 - 536	Verde
12	546 - 556	Verde

Fonte: NASA (2018).

Um conjunto de sete IVs foi selecionado para o estudo, tendo diferentes bandas espectrais e formulações (Tabela 3.2). Foi dada preferência por IVs de aplicação comum na literatura para dados MODIS, com exceção da proposição de um IV centrado exclusivamente na região do SWIR, utilizando as bandas 6 e 7 do MODIS. Além dos tradicionais NDVI e EVI,

que compõem os produtos índices de vegetação do MODIS, foram determinados os seguintes IVs: GRND, NDII, NDWI, SWND e PRI. Os índices EVI e NDVI foram selecionados por sua utilização ampla na literatura, fonte de discussões sobre a resiliência de florestas para eventos de seca severa (mais especificamente sobre o EVI) e outros temas. O GRND foi selecionado por sua capacidade de identificar o brotamento de folhas novas e estar localizado em bandas da região visível. NDII e NDWI foram selecionados por sua sensibilidade à presença de água e por sua interação entre diferentes regiões espectrais. O PRI foi selecionado por sua capacidade de medir a resposta fotoquímica da vegetação, podendo estar relacionado à LUE. Finalmente, o SWND (*SWIR normalized difference*) foi proposto como um IV localizado somente na região do SWIR, potencialmente capaz de identificar alterações relacionadas ao estresse vegetativo.

Tabela 3.2: Índices, sua formulação, aplicação principal na literatura e autoria.

Índice	Formulação Matemática	Aplicação	Autor
NDVI	$\frac{(NIR_{b2} - Vermelho_{b1})}{(NIR_{b2} + Vermelho_{b1})}$	Estrutura da vegetação	Rouse et al. (1973)
EVI	$2,5 \frac{[NIR_{b2} - Vermelho_{b1}]}{[NIR_{b2} + 6(Vermelho_{b1}) - 7,5(Azul_{b3})]}$	Estrutura da vegetação	Huete et al. (1997)
PRI	$\frac{(Verde_{b11} - Verde_{b12})}{(Verde_{b11} + Verde_{b12})}$	Eficiência de uso da luz	Gamon et al. (1997)
NDWI	$\frac{(NIR_{b2} - NIR_{b5})}{(NIR_{b2} + NIR_{b5})}$	Água no dossel	Gao (1996)
NDII	$\frac{(NIR_{b2} - SWIR_{b6})}{(NIR_{b2} + SWIR_{b6})}$	Disponibilidade hídrica	Hunt e Rock (1989)
GRND	$\frac{(Verde_{b4} - Vermelho_{b1})}{(Verde_{b4} + Vermelho_{b1})}$	Brotamento de folhas	Moura et al. (2017)
SWND	$\frac{(SWIR_{b6} - SWIR_{b7})}{(SWIR_{b6} + SWIR_{b7})}$	Stress vegetativo	Proposto pelo autor

Fonte: Thenkabail et al. (2016); NASA (2018); o autor.

### **3.3.1. Análise de mudança percentual com a correção BRDF**

A primeira métrica escolhida para estimar a magnitude dos efeitos BRDF em bandas e IVs foi a mudança percentual ou diferença relativa em porcentagem, decorrente da correção BRDF sobre os dados MODIS (MAIAC), quando comparada com os dados MODIS (MAIAC) não corrigidos. A análise foi feita tanto nas imagens, quanto nas amostras de pixels. A análise focalizou a série temporal dos anos de 2000 até 2014, especialmente o período de junho até setembro representando a estação seca na Amazônia. Na prática, a estação seca varia de 1 a 5 meses na Amazônia. Os cálculos consideraram a amplitude de cada IV na estação seca ( $IV_{\text{setembro}} - IV_{\text{junho}}$ ), determinando-se as mudanças percentuais destes valores entre dados corrigidos e não-corrigidos para os efeitos BRDF em relação ao início da estação seca.

A representação dos resultados das mudanças percentuais decorrentes da correção BRDF na amplitude de cada IV na estação seca foi feita pixel-a-pixel. Por consistência de análise dos dados, um procedimento similar foi adotado para as bandas.

### **3.3.2. Análise da magnitude dos efeitos BRDF**

Para consolidar a avaliação da etapa anterior, procedeu-se uma análise estatística das mudanças observadas sobre os IVs com a correção dos efeitos BRDF. Desta forma, adotou-se a análise da Magnitude do Efeito (*Effect Size*) (BORENSTEIN et al., 2009; ELIS, 2010; FRITZ et al., 2012) como um método estatístico capaz de quantificar e classificar as mudanças de acordo com uma escala de efeitos.

Para tal finalidade, aplicou-se inicialmente o teste não paramétrico de Mann-Whitney (teste U) para avaliar se as diferenças entre os conjuntos de dados MODIS (MAIAC) corrigidos e não corrigidos para os efeitos BRDF foram estatisticamente significantes. Neste teste, as amostras são aproximadas de uma distribuição normal e tratadas como amostras independentes. O teste U de Mann-Whitney é calculado com a atribuição de um ranking para os valores das duas amostras.

Usando os valores de U, a métrica “d” (COHEN, 1988; FURUKAWA e LEUCHT, 2011) foi calculada com a finalidade de classificar os resultados de acordo com a magnitude do efeito. A significância em 0,01 foi utilizada como parâmetro para aceitação das diferenças estatisticamente significantes entre as duas amostras. Com o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados em uma unidade conhecida, os valores de “d” foram convertidos para “r”. É importante ressaltar, porém, que tal conversão não causa diferenciação no posicionamento das classes de magnitude do efeito. A classificação da magnitude do efeito (Cohen, 1988) pode ser vista na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Classificação da Magnitude do Efeito de acordo com a métrica *r*.

<b>Magnitude do Efeito (Effect Size)</b>	<b>Valor de “r”</b>
Sem efeito	< 0,1
Baixo efeito	0,1 – 0,3
Médio efeito	0,3 – 0,5
Forte efeito	> 0,5

Fonte: Cohen (1988).

Quatro áreas de estudo foram definidas na Amazônia para esta análise. Três delas são UCs que contêm torres de observação na Amazônia. De forma geral, foi definida uma latitude constante, de aproximadamente 2 graus Sul, variando no sentido Leste-Oeste abrangendo UCs próximas a Manaus, Santarém e Belém, além de mais uma área representando o Oeste da Amazônia no Brasil (sem torre de observação). Para os cálculos desta etapa, uma amostragem aleatória de 400 pontos foi estabelecida dentro de cada área após a eliminação de pixels de borda com contaminação por edição manual dos polígonos. Este número de pixels foi adotado para aumentar o grau de confiabilidade do teste estatístico com base no tamanho das áreas utilizadas. O intervalo temporal adotado foi a estação seca do ano de 2002, de 30 de maio até o dia 5 de outubro. A mudança do ano de referência de 2008 para 2002 ocorreu nesta etapa

com o objetivo de compatibilização com os dados de torres de fluxo que serão utilizados nas etapas seguintes. É importante salientar, contudo, que 2002 também representa um ano sem eventos de seca severa. A Tabela 3.4 apresenta as quatro localidades selecionadas.

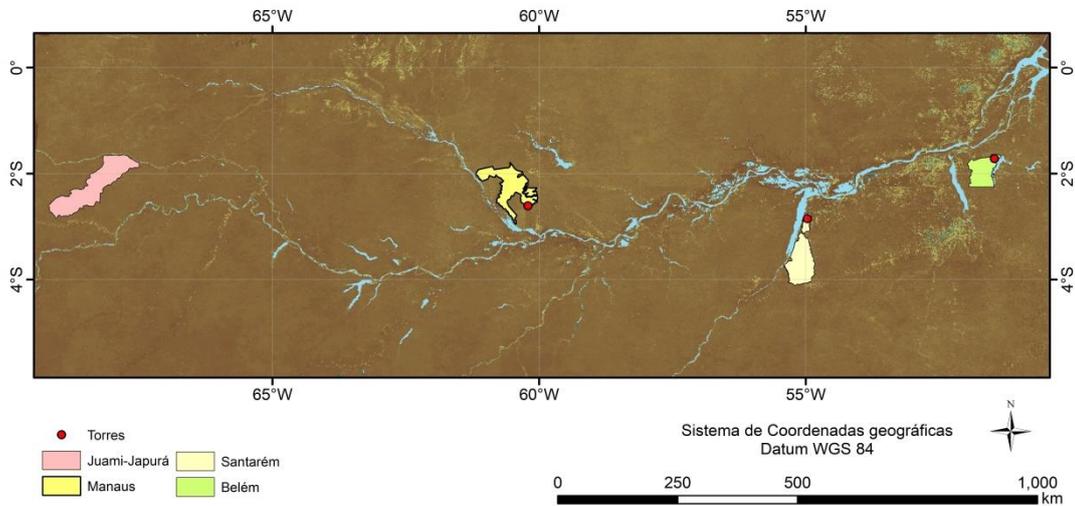
Tabela 3.4: Áreas selecionadas para análise da Magnitude do Efeito BRDF sobre o cálculo dos índices de vegetação (IVs).

Área	UC	Localização	Vegetação predominante
Juami-Japurá	Estação Ecológica Juami-Japurá	1°51'S / 67°45'W	Floresta tropical úmida de terra firme
Manaus	Estação Experimental de Silvicultura Tropical, INPA	2°36,5'S / 60°12,5'W	Floresta tropical úmida
Santarém	Floresta Nacional Tapajós	2°51'S / 54°58'W	Floresta tropical úmida
Belém	Floresta Nacional Caxiuanã	1°43'S / 51°27,5'W	Floresta tropical, floresta tropical densa de várzea

Fonte: ICMBIO (2018); ALMEIDA et al., 2018; SALESKA et al., 2013; Autor.

A Figura 3.4 apresenta a localização das áreas escolhidas, ilustrando a latitude aproximadamente constante (2° S) e a variação Leste-Oeste composta por florestas tropicais.

Figura 3.4: Localização das áreas selecionadas na Amazônia para análise da Magnitude do Efeito BRDF sobre o cálculo de índices de vegetação (IVs). A posição das torres de fluxo em três das quatro áreas está indicada.



Fonte: ICMBIO (2018) e Autor.

### 3.3.3. Análise da distância angular entre espectros corrigidos e não-corrigidos para efeitos BRDF

A análise da distância angular foi feita para observar eventuais diferenças, introduzidas pela correção BRDF, na forma das curvas temporais (mudanças de "fase"). A análise foi feita para a reflectância de cada uma das sete bandas do MODIS e para cada um dos sete IVs considerados no trabalho (Tabela 3), no período de 30 de maio até 5 de outubro de 2002.

Calculou-se uma métrica angular (ADELINE et al., 2018; KRUSE et al., 1993), pixel-a-pixel, equivalente a utilizada pelo classificador *Spectral Angle Mapper* (SAM), determinando os valores angulares médios como resultado final. As áreas de estudo da etapa anterior (Figura 8) foram mantidas, assim como as amostragens aleatórias de 400 pixels. Para o cálculo, foi estabelecido um espectro de referência baseado nos dados não corrigidos para BRDF, de forma a criar uma curva temporal base para cada IV. A métrica angular pode ser definida por:

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\rho_{ref}}{IC(\lambda_i)} \cdot \rho_{ICV}^{\lambda(i)}}{\left( \sum_{i=1}^N \frac{\rho_{ref}}{IC^2(\lambda_i)^{1/2}} \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^N \frac{\rho_{ref}}{IC^2(\lambda_i)^{1/2}} \right)} \right) \quad (3.3)$$

Quanto menor for o valor de  $\alpha$ , mais semelhantes são os formatos entre a curva não corrigida e corrigida (ADELINE et al., 2018). Portanto, quanto maior forem os valores de distância angular, maiores serão as modificações na forma das curvas ou a sensibilidade de uma dada banda ou IV ao procedimento de correção BRDF.

### 3.4. Análise da consistência do comportamento da reflectância e dos IVs após correção dos efeitos BRDF

A última etapa metodológica do trabalho foi a avaliação qualitativa dos resultados obtidos em bandas específicas e IVs com relação a dados de campo extraídos de torres de fluxo na Amazônia. A comparação direta dos dados foi realizada pela compatibilização em escala temporal dos dois conjuntos de dados. Para isso, foi escolhido o ano de 2002 como ano referência com a maior quantidade de dados das torres de fluxo. Para Belém, entretanto, o ano de 2000 foi selecionado com o mesmo propósito.

Para adequar os pixels à posição das torres, janelas de 3x3 pixels foram estabelecidas ao redor das mesmas. Com isso, foram mantidas as localidades das áreas de estudo anteriormente selecionadas para a Amazônia, porém em um contexto focado nos dados de torre. As torres selecionadas foram Manaus (K34), Santarém (K67) e Belém (CAX). A área de Juami-Japurá, no Oeste do estado do Amazonas, não continuou a ser utilizada por não conter uma torre de fluxo.

Mesmo assim, a variação Leste-Oeste na Amazônia pôde ser mantida para a visualização da informação das bandas e IVs em conjunto com os dados de torres. As variáveis escolhidas para análise foram *gross primary production* (GPP) e *light use efficiency* (LUE). Em geral, ambos as variáveis selecionadas são capazes de indicar a consistência de comportamento sazonal dos IVs, uma vez que alterações na

produtividade e eficiência de uso da luz levam, de maneira indireta, a aumento observado nos IVs. Os dados são extraídos consecutivamente e compilados em dados semanais, com base em informação gerada no projeto LBA (*Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*) (SALESKA et al., 2013; NASA, 2018). O cálculo da LUE seguiu o método de Almeida et al. (2018). Os dados semanais foram posicionados em composições mensais para a compatibilização com as amostragens MODIS e para que a abrangência dos dados fosse ampliada para o maior número de meses possível.

## **4 RESULTADOS**

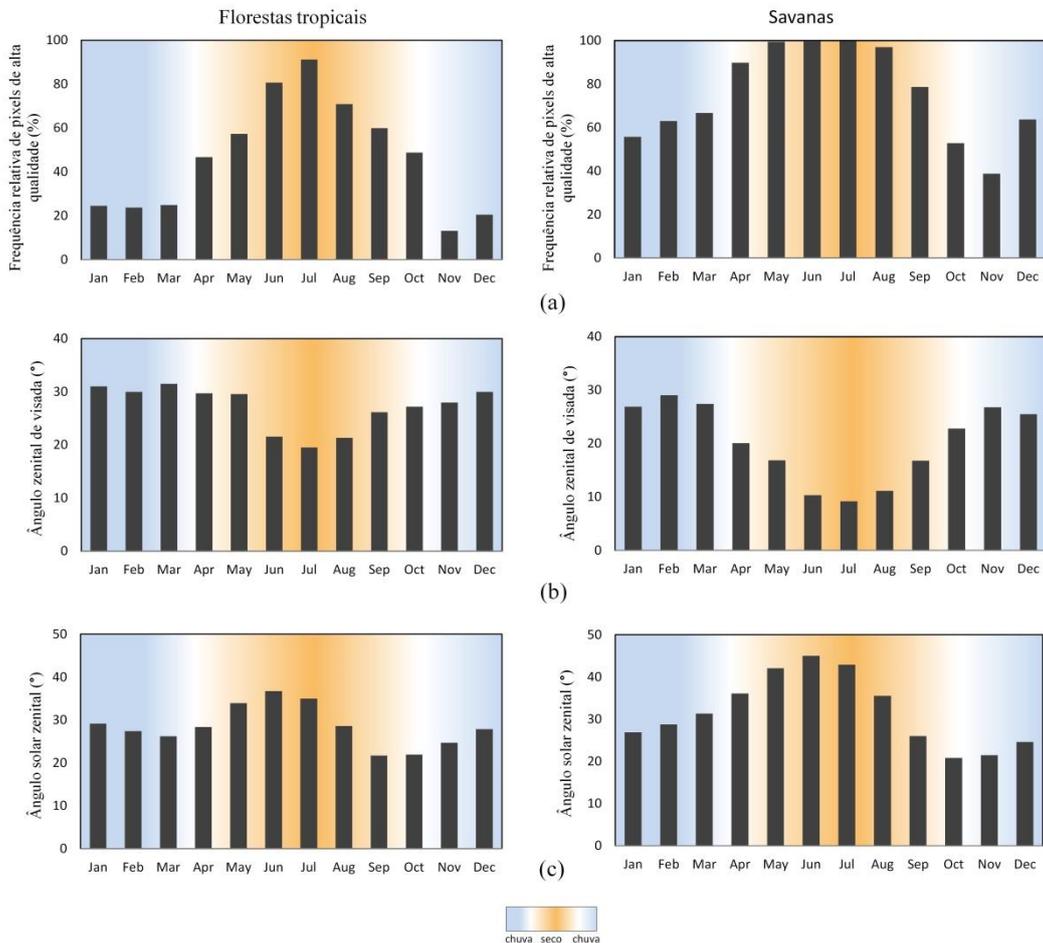
Os resultados obtidos a partir das análises desenvolvidas neste trabalho estão divididos em seções específicas e indicam, de maneira geral, os fatores causadores dos efeitos BRDF, sua magnitude de influência conjunta sobre bandas e IVs e a consistência de dados corrigidos para efeitos BRDF com dados de torres de fluxo para a Amazônia.

### **4.1. Fatores causadores dos efeitos BRDF em dados MODIS**

#### **4.1.1. Variação relativa em AZS e AZV na Amazônia e no Cerrado**

A Figura 4.1 apresenta as variações na frequência relativa de pixels de alta qualidade radiométrica (código 0 para o produto MOD13A2) e nos parâmetros AZV e ASZ para florestas tropicais da Amazônia e savanas do Cerrado. Os resultados se referem as UCs da amazônia e do Cerrado selecionadas para estudo. É possível observar com clareza as diferenças nas variáveis para cada bioma, com maior quantidade de pixels de alta qualidade radiométrica para o Cerrado durante boa parte do ano. Durante a estação seca, pixels de alta qualidade no Cerrado se mantêm próximos de 100%. Na Amazônia, a taxa se aproxima de 80%, com valores menores durante todo o ano. O AZV possui valores mais baixos para o Cerrado durante a estação seca quando comparado à Amazônia. Esta informação está relacionada à qualidade da observação, uma vez que pixels com menor AZV serão selecionados sempre que possível quando as condições atmosféricas forem mais favoráveis. O AZS é maior para o Cerrado durante a estação seca do que para a Amazônia, pela localização geográfica deste ecossistema em médias latitudes.

Figura 4.1: Frequência relativa de pixels de alta qualidade radiométrica (a), ângulo zenital de visada (b) e ângulo zenital solar (c) para savanas do Cerrado e florestas tropicais da Amazônia.

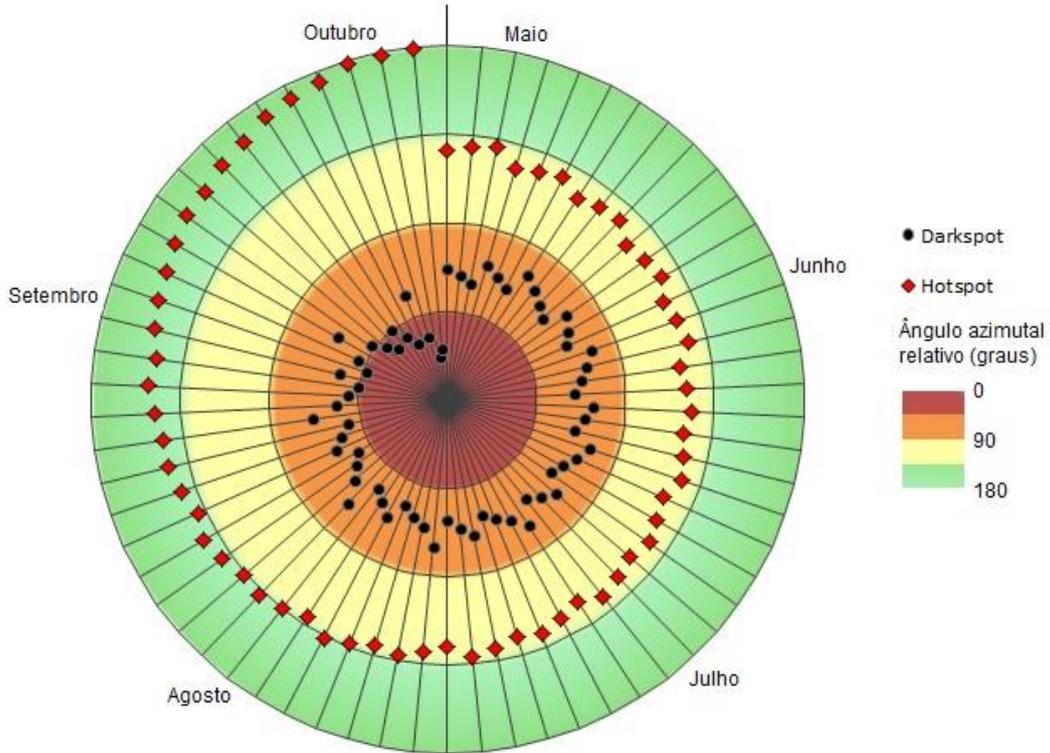


Fonte: Produção do autor.

Ao se fixar a localização nas florestas tropicais da Amazônia (UCs) e observar o comportamento da estação seca no ano de 2008 (maio até outubro), o AAR apresentou tendências distintas quando a observação se deu com direção prioritária de espalhamento frontal ou retroespalhamento. O espalhamento frontal sofreu uma sensível redução do início para o final da estação seca, enquanto que o retroespalhamento apresentou um aumento. Este comportamento se reflete na tendência geral de uma aproximação dos ângulos de 180 graus e 0 graus, que representam o valor máximo de direção em *darkspot* e *hotspot*, respectivamente (Figura 4.2). A alternância de direção de espalhamento detectada acontece porque o local imageado recebe cobertura de mais de uma cena (ou passagem) do MODIS. Assim, cada passagem alternada

representa uma direção majoritária de espalhamento, possibilitando a análise sazonal do comportamento de cada direção de espalhamento.

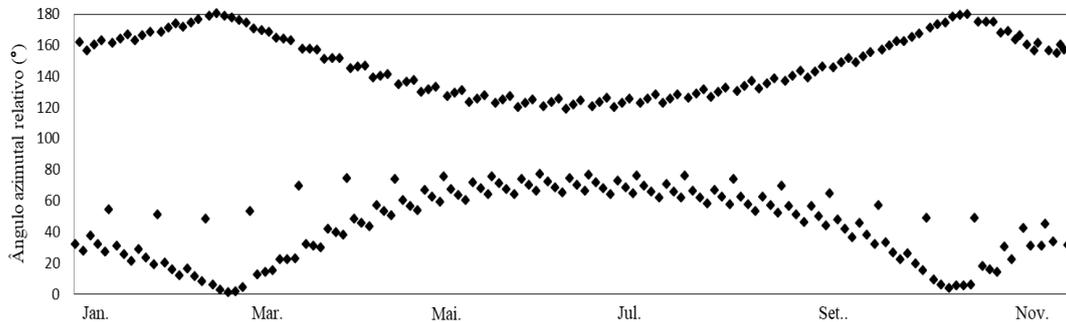
Figura 4.2: Ângulo azimutal relativo durante a estação seca em observações para o ano de 2008 em florestas tropicais da Amazônia.



Fonte: Produção do autor.

Para facilitar a interpretação dos resultados do AAR, a observação do comportamento anual completo se faz necessária. A Figura 4.3 ilustra as observações, para o mesmo local, em darkspot e hotspot, para o ano de 2008. No final da estação seca, mais observações MODIS são vistas na direção 0-180°. Na prática, isso representa mais pixels na direção de retroespalhamento vistos pelo sensor ou maiores quantidades de energia refletida na direção do instrumento, quando comparado com junho a agosto.

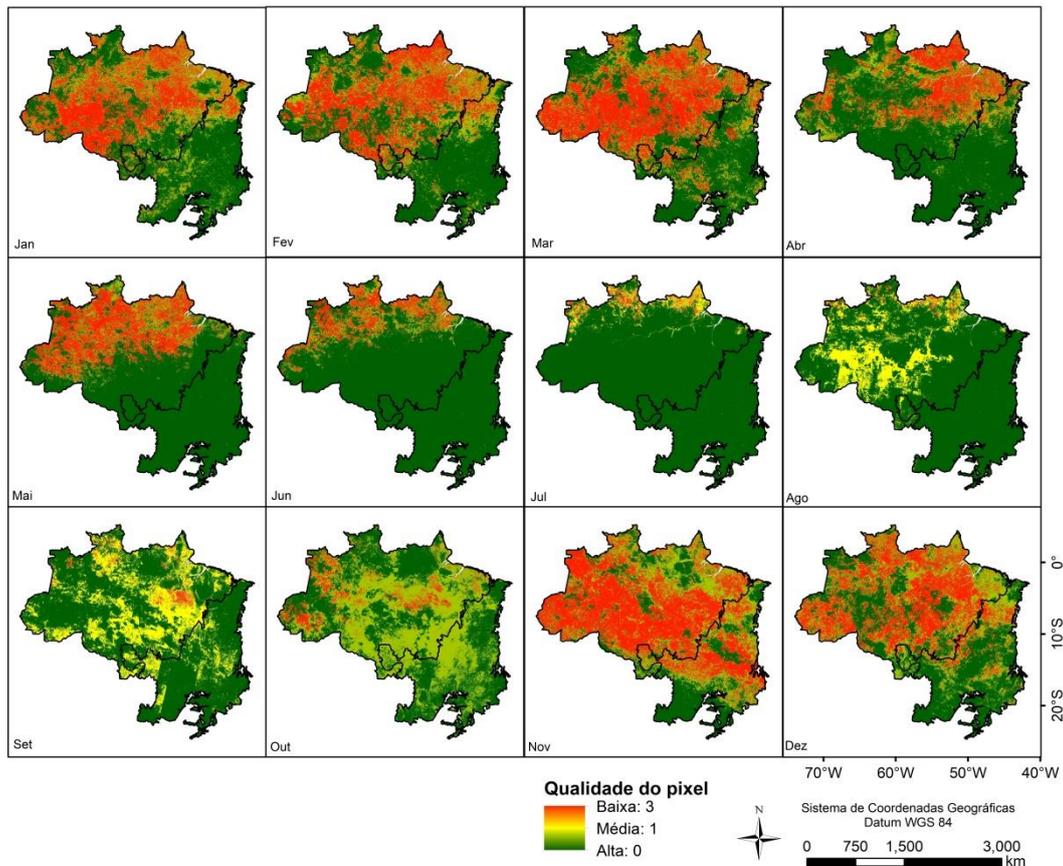
Figura 4.3: Ângulo azimutal relativo para o ano de 2008 considerando as observações de hotspot e darkspot em conjunto para florestas tropicais na Amazônia, com base no MAIAC.



Fonte: Produção do autor.

Em uma abordagem espacializada, é possível observar novamente a melhoria da qualidade radiométrica dos pixels da estação chuvosa (novembro a maio) para a seca (junho a outubro) nos dois ecossistemas (Figura 4.4). Na estação seca, os pixels de baixa qualidade radiométrica se concentram na região norte da Amazônia, havendo uma melhoria na qualidade dos pixels recuperados para compor o produto MOD13A2 do norte para o sul da região Amazônica e na direção do Cerrado.

Figura 4.4: Valores de qualidade radiométrica dos pixels recuperados no produto composição MOD13A2 para o ano de 2008.

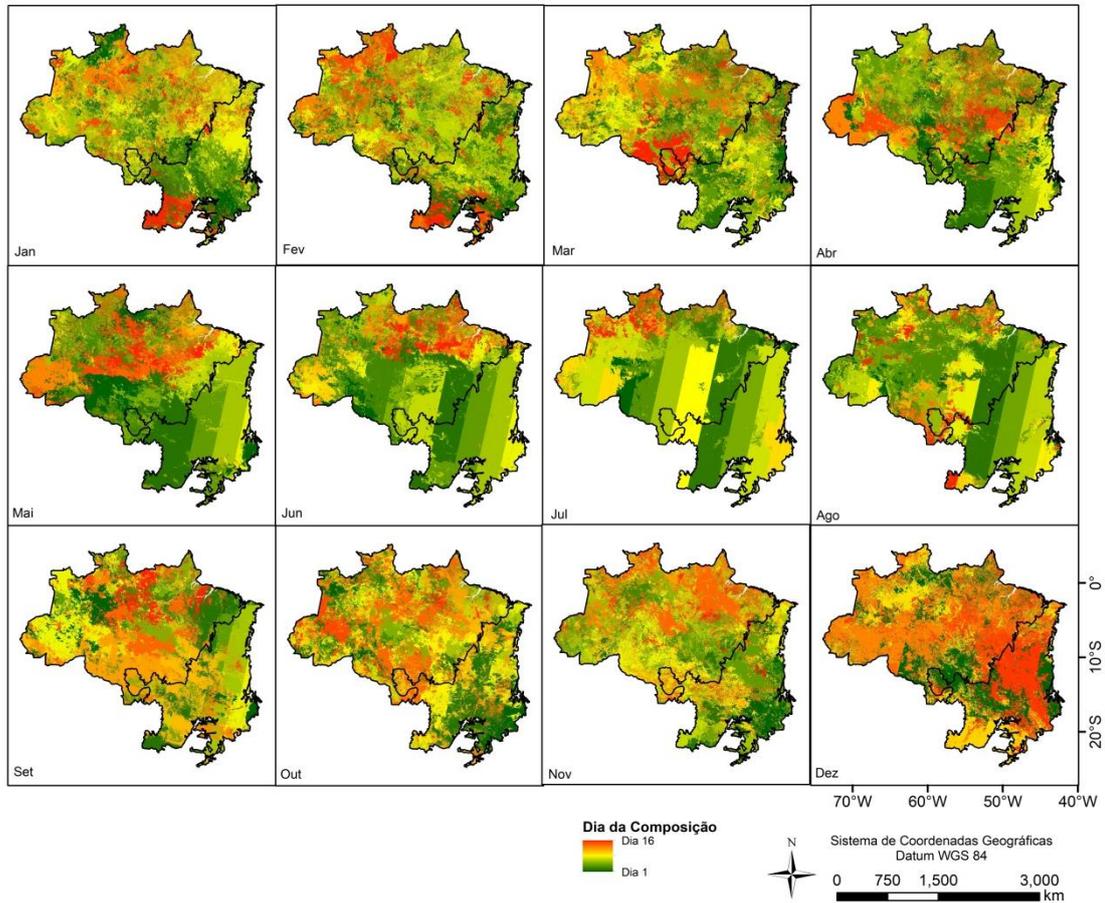


Fonte: Produção do autor.

De maneira complementar, uma variável que permite confirmar o impacto direto da qualidade do pixel, corresponde às datas selecionadas para a composição de 16 dias do produto MOD13A2 (Figura 4.5). Com condições ideais da atmosfera para observação, as composições tendem a obedecer uma mesma faixa de passagem do sensor, com diminuição do número de datas usadas no produto composição de 16 dias. Porém, conforme as condições de observação se deterioram com a estação chuvosa, a composição passa a conter pixels selecionados de datas distintas dentro do intervalo de 16 dias, uma vez que regiões próximas podem apresentar condições atmosféricas variadas. Mesmo assim, como mostrado anteriormente, o intervalo de 16 dias pode não ser suficiente para gerar composições apenas com pixels de alta qualidade radiométrica. Apesar de não ter sido avaliado neste trabalho, é possível

antecipar que os problemas de qualidade dos pixels se tornarão mais acentuados com a utilização de produtos compostos de 8 dias.

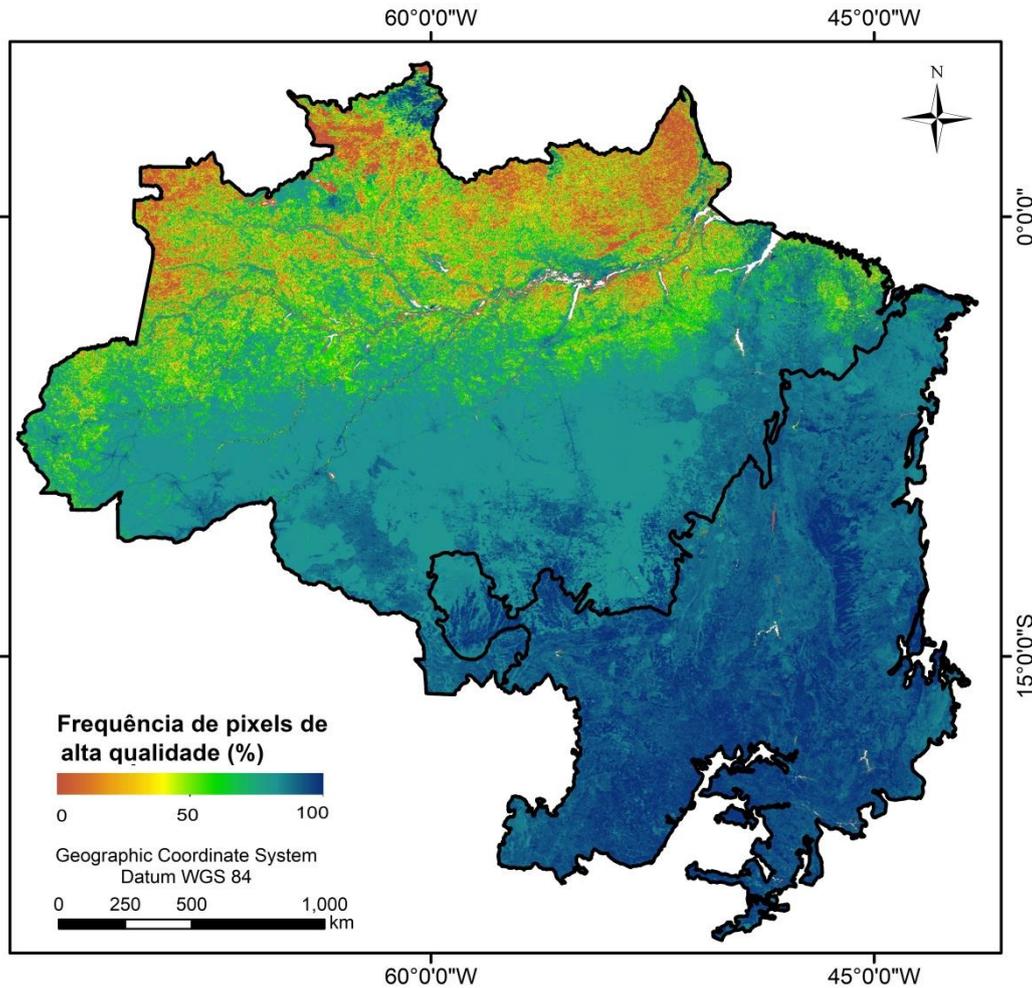
Figura 4.5: Dia de composição utilizado (intervalo de 16 dias) para o produto MOD13A2 (2008).



Fonte: Produção do autor.

Ao utilizar o MAIAC para obter a porcentagem de pixels válidos para o Cerrado e para a Amazônia (Figura 4.6), os resultados obtidos foram semelhantes para o período de junho, considerando o período total de 2000 a 2014. De forma concordante, na estação seca, a qualidade de observação para o Cerrado foi alta, enquanto que o norte da Amazônia mostrou qualidade de observação mais baixa do que o sul durante todo o ano.

Figura 4.6: Frequência de pixels de alta qualidade (pixels válidos MAIAC) para o mês de junho (2000-2014).

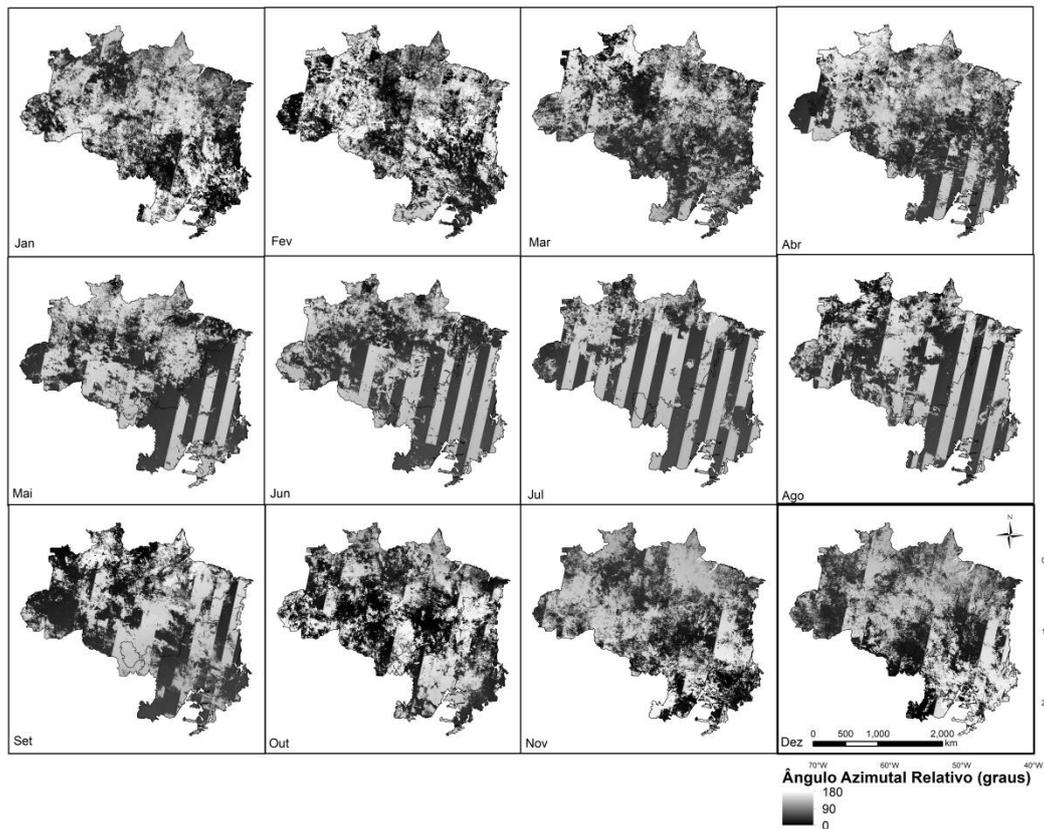


Fonte: Produção do autor.

Finalmente, a observação espacializada do AAR pelo produto MOD13A2 permitiu compreender, com maior detalhe, a distribuição geral das direções de espalhamento de acordo com a passagem do MODIS, se relacionando com o AZV e o AZS no momento da aquisição dos dados (Figura 4.7). Entretanto, só foi possível observar a distribuição do AAR quando não houve cobertura de nuvens, com os meses chuvosos apresentando padrão de AAR variado de acordo com o dia de composição selecionado. Na Figura 4.7, embora a escala de valores de AAR seja diferente da escala utilizada no produto MAIAC (Figura 4.3), os resultados são consistentes, pois evidenciam uma mudança de AAR do

início (junho) para o final da estação seca (setembro) na Amazônia e no Cerrado.

Figura 4.7: Ângulo azimutal relativo (em graus) para a Amazônia e Cerrado durante o ano de 2008, com base no produto MOD13A2. Os valores mais próximos de zero grau indicam espalhamento preferencial frontal, enquanto que os valores mais próximos de 180 graus indicam espalhamento preferencial de retroespalhamento.



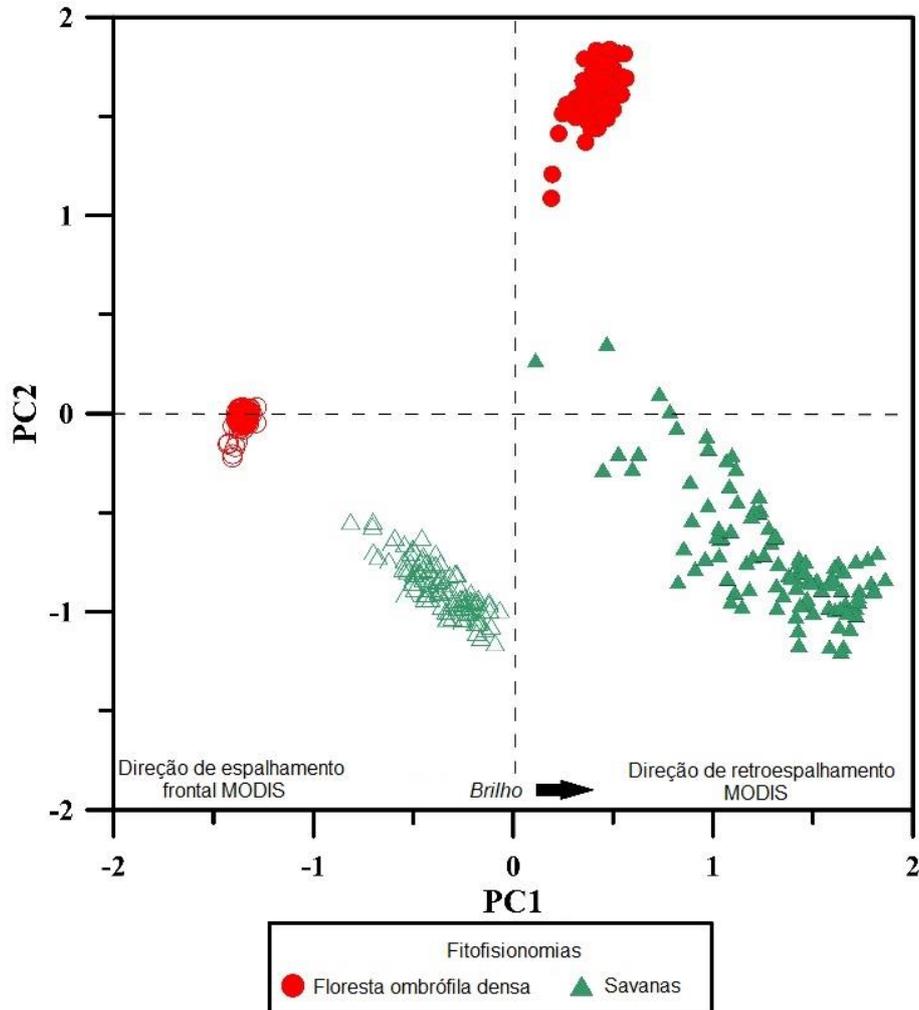
Fonte: Produção do autor.

#### 4.1.2. Avaliação da influência da direção de imageamento e AAR usando Análise por Componentes Principais (ACP)

Os resultados da ACP, usando a reflectância das primeiras sete bandas do MODIS, mostraram a separabilidade entre a floresta ombrófila densa da Floresta Nacional de Aripuana e as savanas do Parque Nacional das Emas em ambas direções de imageamento, principalmente na direção de retroespalhamento (Figura 4.8). Os resultados MODIS (MAIAC) foram obtidos em um período fixo (composição de 16 dias), centrado em 18 de julho de 2008, portanto, não sendo influenciado, em cada tipo de vegetação, pela fenologia. As primeiras duas componentes foram

responsáveis por 98% da variância cumulativa (76% para CP1 e 22% para CP2). Os fatores de peso aproximadamente constantes para os autovetores de CP1 ( $>0.8$ ), expressando uma contribuição aproximadamente igualitária de cada banda para explicar esta componente, indicaram que ela mostrou variações de brilho (reflectância média) dos pixels. Conforme esperado, o brilho aumentou da direção de espalhamento frontal para a direção de retroespalhamento em função da menor quantidade de sombras vistas pelo sensor. Quando comparada com o Cerrado, a floresta ombrófila densa da Amazônia apresentou distribuição de pixels mais concentrada, típica de uma formação mais homogênea de dossel, e menor brilho (Figura 4.8). Quando os espectros de vegetação MODIS (MAIAC) foram inspecionados, fortes diferenças na reflectância da banda do NIR foram observadas (curvas não apresentadas). A reflectância média e o desvio padrão ( $n = 100$  pixels) da banda 2 do MODIS aumentou para a floresta ombrófila densa de  $23,3 \pm 1,0\%$  (espalhamento frontal) para  $37,0 \pm 2,6\%$  (retroespalhamento). A segunda componente pode ser interpretada como uma variável de estrutura de dossel, sendo fortemente influenciada pela resposta do NIR, conforme se deduziu da inspeção dos autovetores associados a CP2.

Figura 4.8: Projeção dos primeiros dois escores componentes principais (PC1 e PC2), mostrando aumento de brilho, para floresta ombrófila densa (Floresta Nacional de Aripuanã, na Amazônia) e savanas (Parque Nacional das Emas no Cerrado), da direção de espalhamento frontal (vazado) para a de retroespalhamento (preenchido). Os resultados se referem à composição 16 dias do MODIS (MAIAC) centrada em 18 de julho de 2008.

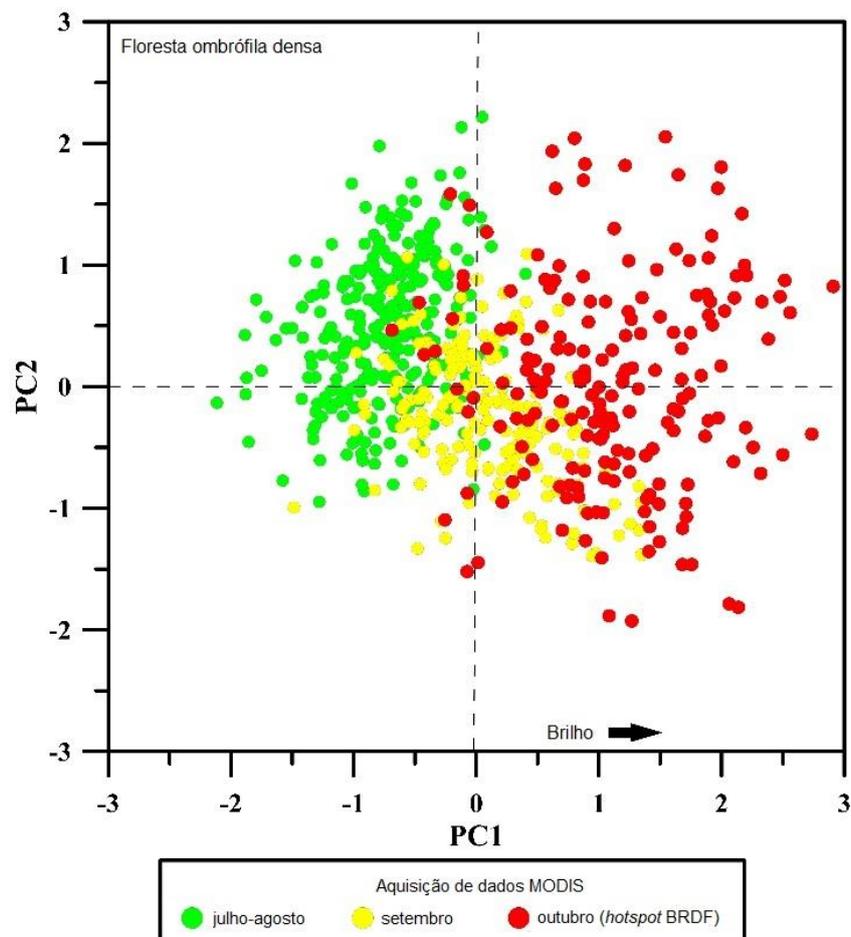


Fonte: Produção do autor.

Ao se adotar uma perspectiva temporal para a ACP, fixando as composições na direção de retroespalhamento, foi possível observar um aumento de brilho para floresta ombrófila densa do início para o final da estação seca de 2008 (julho a outubro), novamente representado pela primeira componente (Figura 4.9). Nesta abordagem, as duas primeiras componentes representaram 82% da variância acumulada (59% para CP1 e 23% para CP2). O comportamento dos autovetores para CP1 foi similar ao do exemplo anterior. As variações de brilho detectadas pela ACP estão

diretamente relacionadas à análise de variação do AAR, que tem os maiores valores de retroespalhamento (ângulos próximos de 180 graus) no final da estação seca. Para o Cerrado (resultados não mostrados), não houve tendência bem definida porque as variações espectrais foram aparentemente controladas pela sazonalidade/fenologia da vegetação. Da estação chuvosa para a seca no Cerrado, a resposta espectral é fortemente influenciada pelas maiores quantidades de vegetação não fotossinteticamente ativa e pela redução do índice de área foliar capturadas pelo MODIS.

Figura 4.9: Variações de brilho na floresta ombrófila densa (Floresta Nacional de Aripuanã na Amazônia) produzidas por variações do ângulo azimutal relativo (AAR) do início (julho) para o final (outubro) da estação seca de 2008.



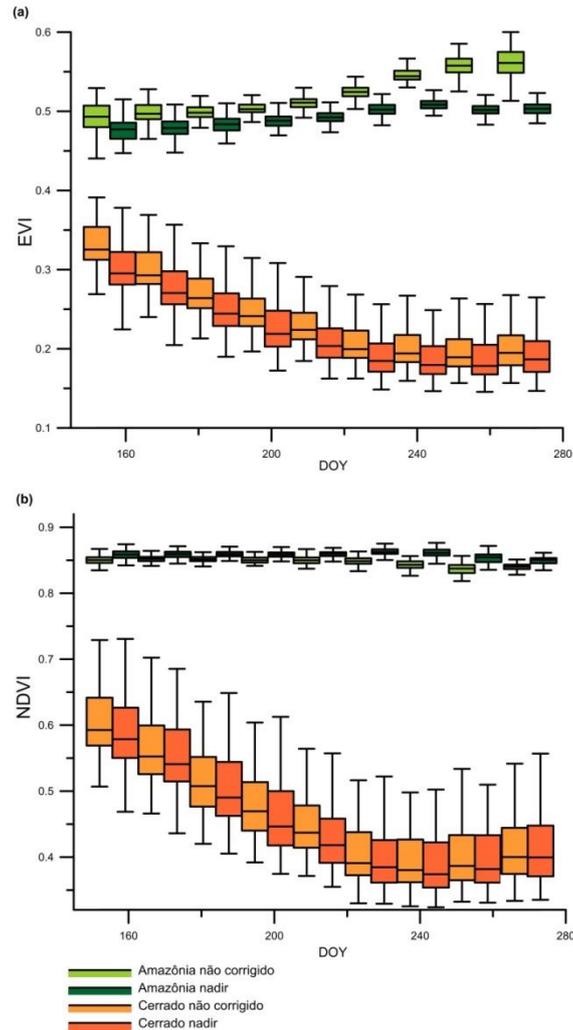
Fonte: Produção do autor.

## **4.2. Magnitude dos efeitos BRDF em bandas e IVs**

### **4.2.1. Análise de mudança percentual**

Antes da análise propriamente dita da mudança percentual introduzida pela correção BRDF, é importante observar as diferenças nos valores absolutos dos IVs e da reflectância de algumas bandas para áreas da Amazônia e Cerrado. A Figura 4.10 mostra as diferenças entre EVI e NDVI para dados corrigidos e não-corrigidos para efeitos bidirecionais. Os dois IVs foram calculados de dados MODIS (MAIAC) ao longo da estação seca de 2008 para floresta ombrófila densa (Floresta Nacional de Aripuanã) e para savanas (Parque Nacional das Emas). Na floresta ombrófila densa da Amazônia, a correção BRDF causa uma redução nos valores de EVI, principalmente no final da estação seca, com diminuição do aspecto ascendente da curva no final da série temporal. Quando comparado com o EVI, o impacto da correção BRDF é menor para o NDVI. Para o Cerrado, ambos IVs não apresentam diferenças estatisticamente significantes após a correção BRDF.

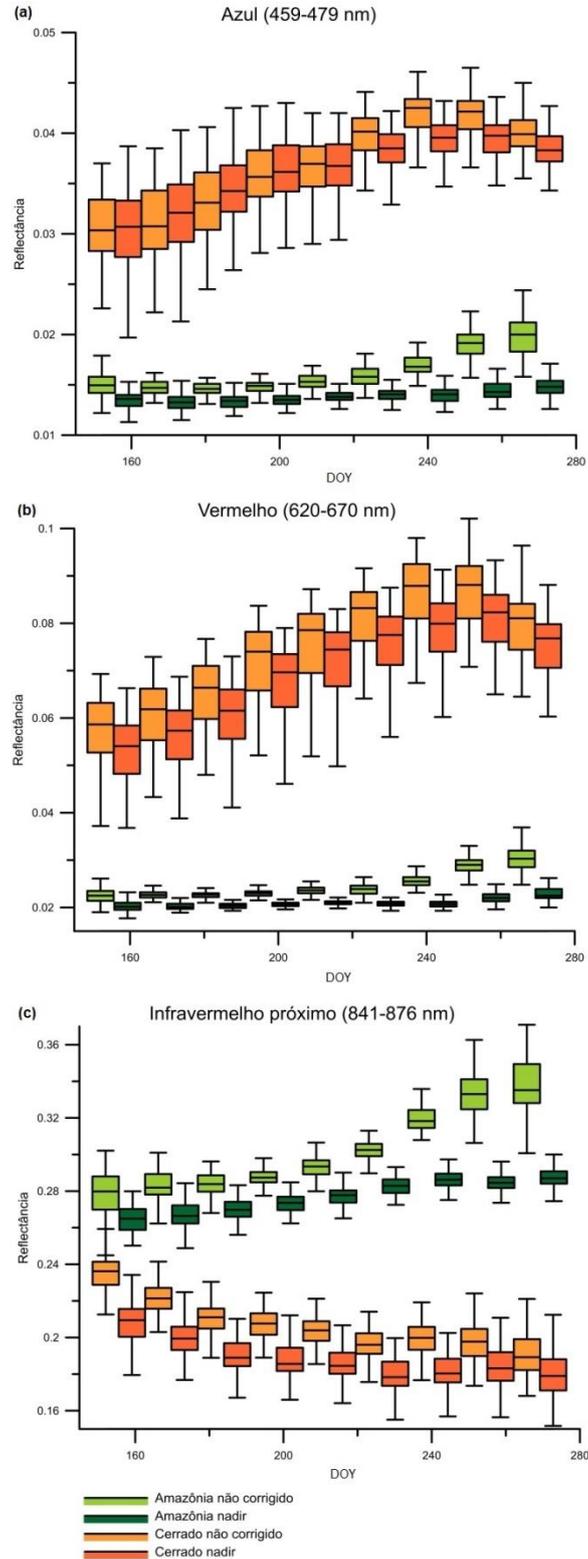
Figura 4.10: Variações de (a) EVI e (b) NDVI para floresta ombrófila densa (Floresta Nacional de Aripuanã, RESEX Guariba e Reserva de Desenvolvimento Sustentável Aripuanã) e savanas (Parque Nacional das Emas no Cerrado) antes e após a correção dos efeitos BRDF. Os índices foram calculados de dados MODIS (MAIAC) obtidos na estação seca de 2008.



Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.11 ilustra o comportamento da reflectância das bandas que compõem o EVI e NDVI (bandas 1, 2 e 3 do MODIS). Para a maioria das datas, tanto para a floresta, quanto para o Cerrado, a reflectância nas três bandas diminui com a correção BRDF. Para floresta ombrófila densa, as maiores diferenças são observadas no final da estação seca. Para o Cerrado, as diferenças não são estatisticamente significantes.

Figura 4.11: Variações de reflectância das bandas MODIS (MAIAC) do (a) azul, (b) vermelho e (c) infravermelho próximo, corrigidas e não corrigidas para efeitos BRDF, para floresta ombrófila densa (Floresta Nacional Aripuanã; RESEX Guariba e Reserva de Desenvolvimento Sustentável Aripuanã) e savanas (Parque Nacional das Emas no Cerrado) na estação seca de 2008.



Fonte: Produção do autor.

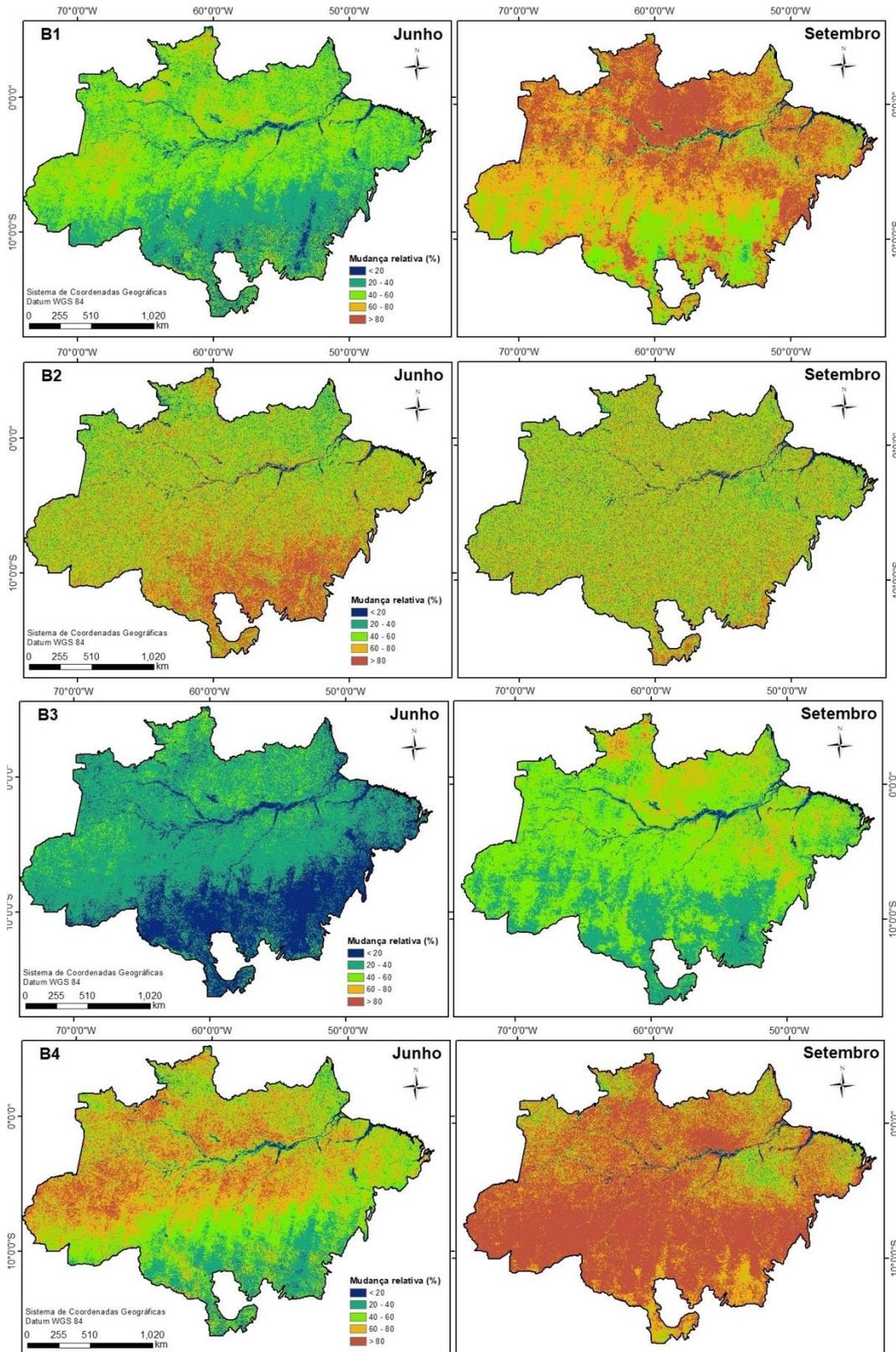
Com base nestes e em outros resultados não apresentados, que mostraram pequenas diferenças decorrentes da correção BRDF no Cerrado, é possível assumir que a contribuição adicional das áreas de Cerrado para o trabalho não se justificam para as análises espacializadas e por amostragem estatística, assim como para a análise de consistência com dados de torre de fluxo. Os resultados de mensuração da magnitude dos efeitos BRDF seriam provavelmente não significativos. Desta forma, o foco principal do trabalho na Amazônia foi mantido.

#### **4.2.1.1. Análise por bandas na Amazônia**

A análise de mudança percentual da reflectância considerou as sete primeiras bandas do MODIS (Figura 4.12), além das bandas 11 e 12, utilizadas posteriormente para o cálculo do índice PRI. Em geral, resultados variados foram encontrados de acordo com a região espectral da banda selecionada. Por exemplo, as bandas do visível 1, 3 e 4 (vermelho, azul e verde, respectivamente) apresentaram aumento significativo na mudança percentual promovida pela correção BRDF de junho para setembro. Já as bandas da região do infravermelho próximo (2 e 5), em parte por já possuírem grandes mudanças em junho, não apresentaram mudanças de grande magnitude em relação a setembro. As bandas do infravermelho próximo, ao contrário das do visível, apresentaram redução no impacto da correção BRDF em setembro. Para as duas bandas do SWIR (6 e 7), comportamentos inversos de mudança percentual foram observados: enquanto a banda 6 teve redução no impacto da correção para a Amazônia, a banda 7 apresentou aumento.

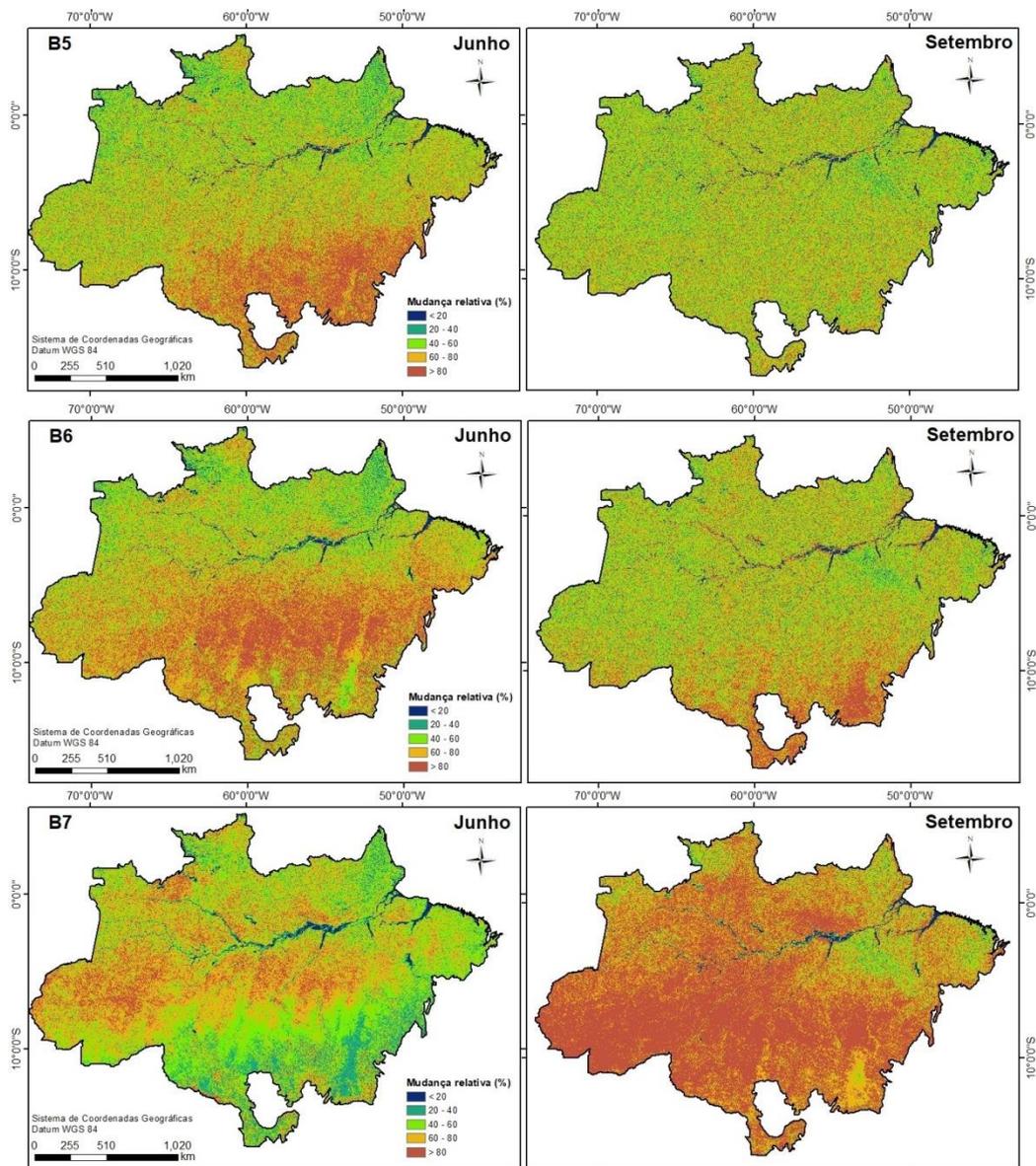
Em um panorama geral da Amazônia, pode-se destacar a região sul do ecossistema, incluindo a zona de transição para o Cerrado, como uma área diferenciada em relação às partes central e norte. Além das variações na cobertura vegetal, isso pode refletir as condições atmosféricas mais favoráveis para aquisição de imagens do Norte para o Sul da Amazônia.

Figura 4.12: Mudança percentual entre dados corrigidos e não corrigidos para BRDF pelo MAIAC em setembro e junho, para as bandas 1-7 do MODIS (MAIAC). Os comprimentos de onda das bandas estão listados na Tabela 1.



continua

Figura 4.12: Conclusão.



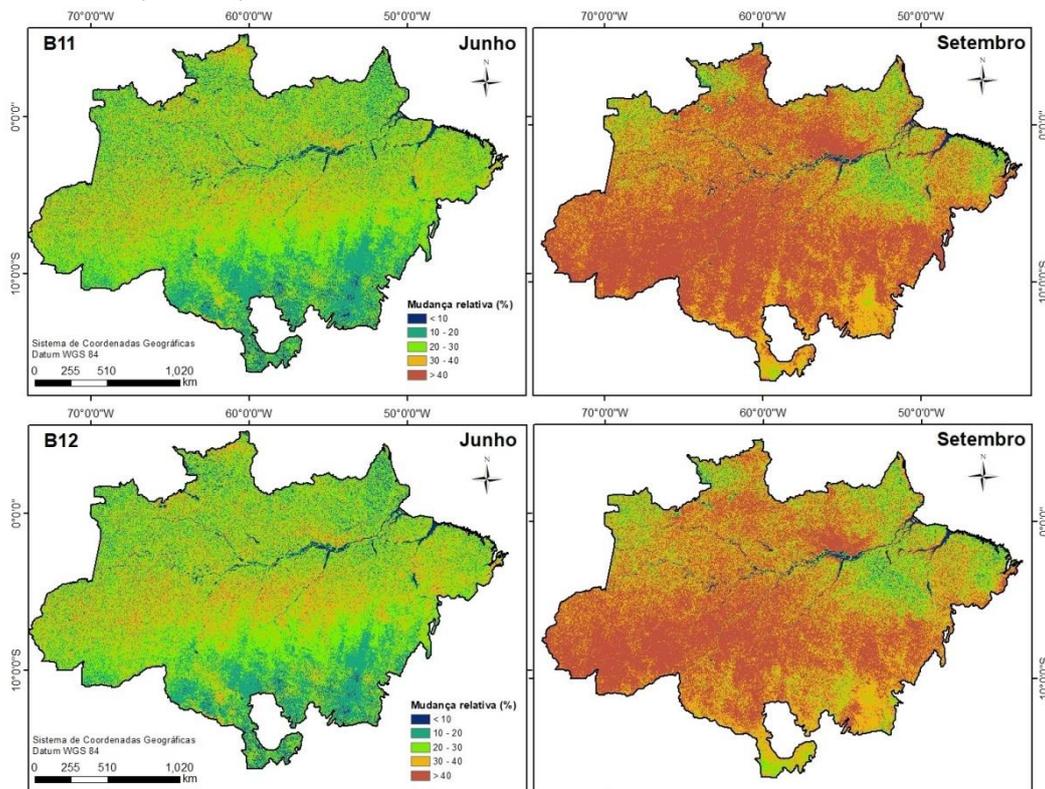
Fonte: Produção do autor.

É importante destacar também o resultado particular da banda 2 (NIR), muito utilizada em IVs como o EVI e o NDVI para o MODIS. As mudanças introduzidas pela correção BRDF foram fortes, mas não mostraram um comportamento sazonal igual ao observado nas bandas do visível.

As bandas 11 e 12 da faixa espectral do verde, com resolução espacial de 1 km, foram analisadas separadamente por sua aquisição diferenciada da banda 4 do verde com resolução espacial de 500 m (Figura 4.13). O comportamento das duas bandas localizadas na região do verde (visível)

foi de aumento no impacto da correção BRDF de junho para setembro, assim como o verificado nas outras bandas do visível. Em geral, as diferenças das bandas 11 e 12 para a banda 4, também na região do verde, foram pouco notáveis na visualização das imagens. Em geral, a banda 12 apresentou mudanças relativas menores em setembro do que a banda 11.

Figura 4.13: Mudança percentual entre dados corrigidos e não corrigidos para BRDF em junho e setembro, para as bandas 11 e 12 do MODIS (MAIAC).



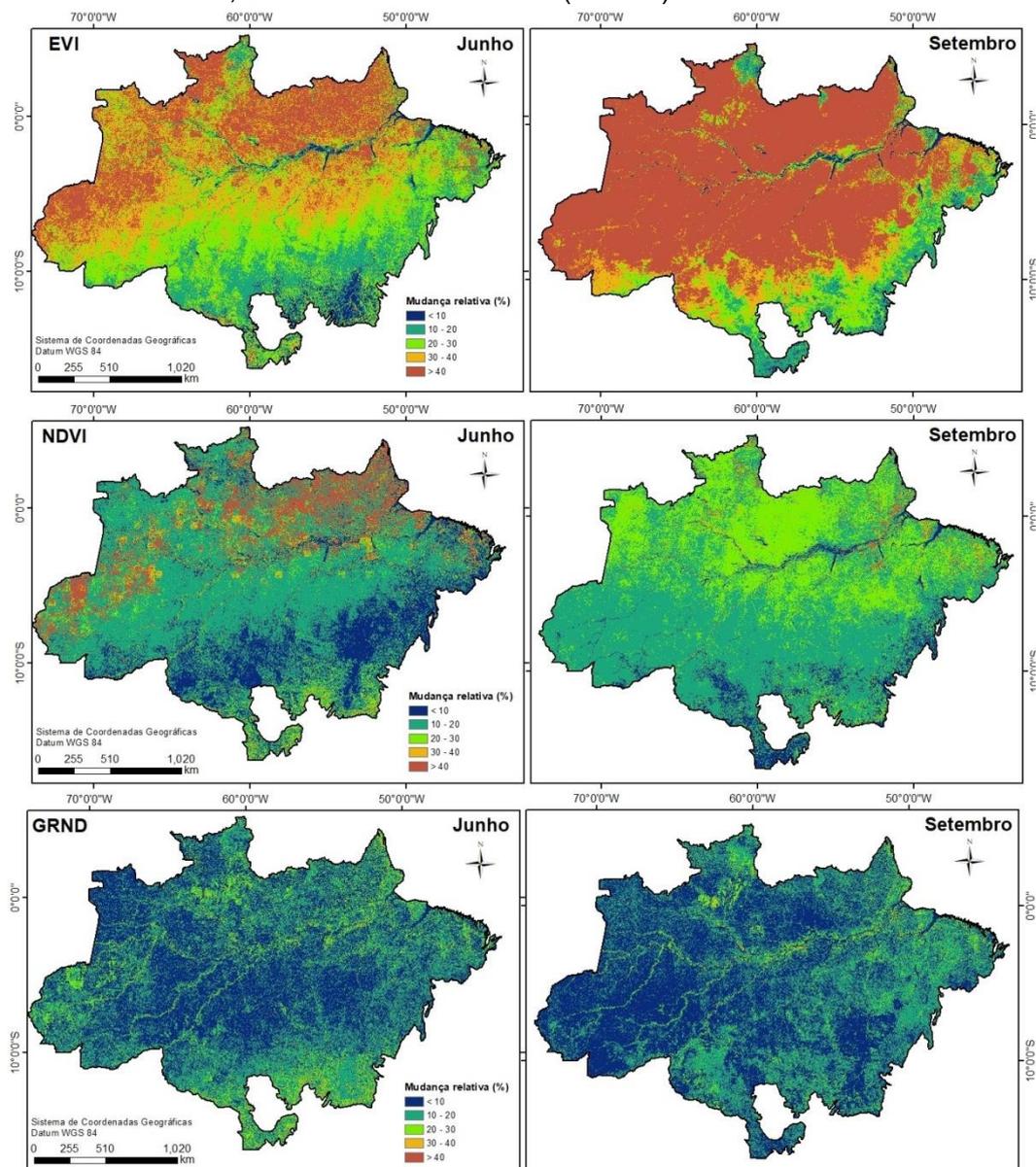
Fonte: Produção do autor.

#### 4.2.1.2. Análise por IVs na Amazônia

A análise por IVs, assim como a análise por bandas, considerou os dados após o cálculo da mudança percentual entre dados corrigidos e não corrigidos para efeitos BRDF nos meses de junho e setembro (Figura 4.14). Em geral, os índices mais sensíveis aos efeitos BRDF em ambos os meses (junho e setembro) foram o EVI, PRI e SWND, conforme indicado pelas cores esverdeadas e avermelhadas na Figura 23. Os IVs exclusivamente formulados com bandas do visível (GRND e PRI)

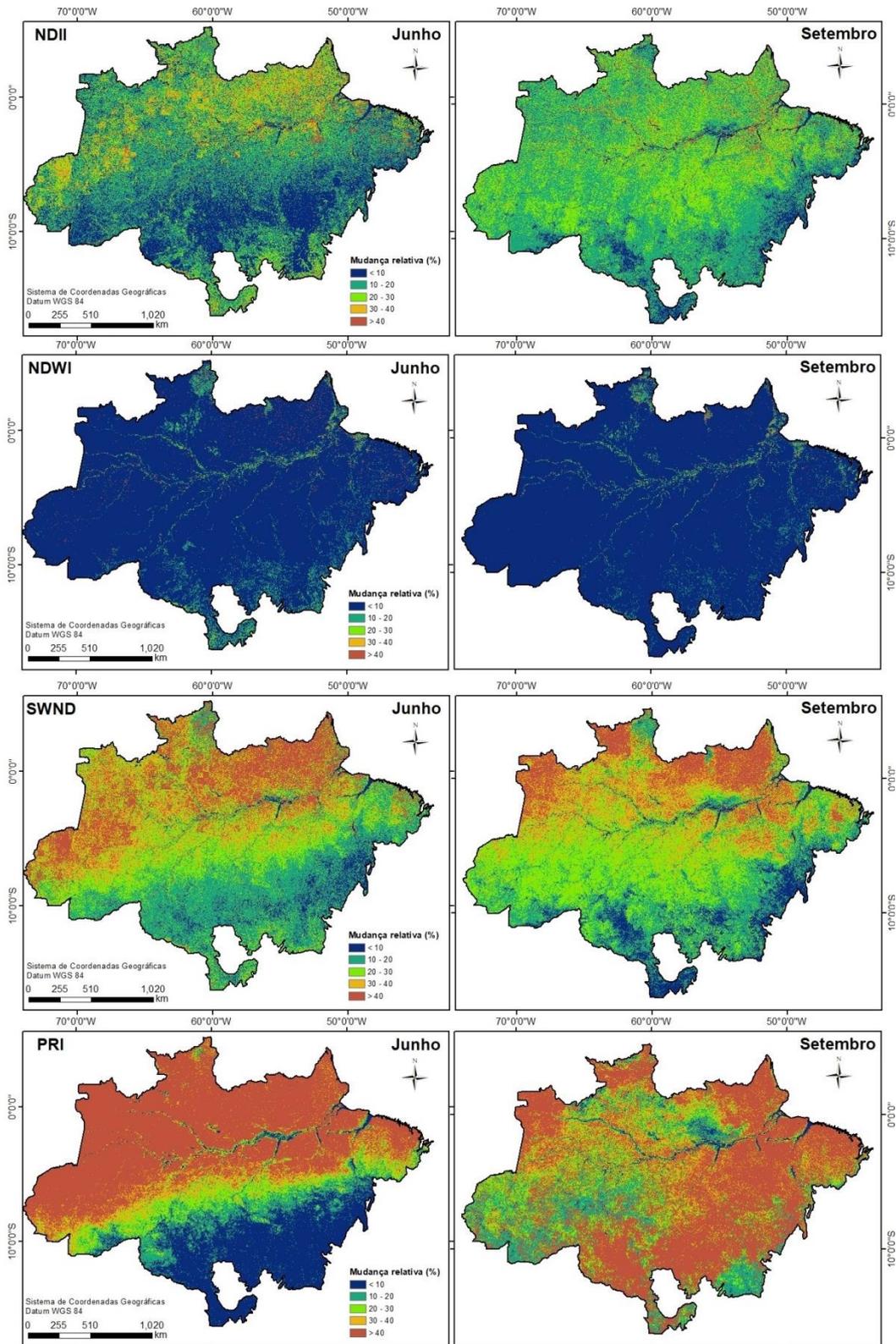
apresentaram resultados bastante distintos entre si. O GRND, em geral, teve impacto da correção BRDF baixo para junho e setembro, com uma sensível redução nas mudanças percentuais no final da estação seca. Enquanto isso, o PRI apresentou mudanças elevadas para o norte da Amazônia, com um gradiente de redução se iniciando na região central. A região sul, entretanto, apresentou mudanças baixas.

Figura 4.14: Mudança percentual entre dados corrigidos e não corrigidos para BRDF em junho e setembro, para os IVs EVI, NDVI, GRND, NDII, NDWI, SWND e PRI do MODIS (MAIAC).



continua

Figura 4.14: Conclusão.



Fonte: Produção do autor.

Para os IVs formulados com bandas do visível e do NIR (EVI e NDVI), comportamentos bastante distintos também foram observados. O EVI

apresentou valores elevados de mudança percentual em junho na Amazônia como um todo que se acentuaram nas porções centrais e sul em setembro. O NDVI apresentou mudanças inferiores as do EVI, que foram mais intensas no final da estação seca e na porção norte da região.

Para o NDWI, índice formulado inteiramente na região do infravermelho, pequenas mudanças com a correção BRDF foram observadas, tanto em junho, quanto em setembro. Este resultado pode estar relacionado com a alta correlação entre as duas bandas utilizadas (bandas 2 e 5) que, de acordo com a análise por bandas, apresentaram mudanças observáveis entre junho e setembro, porém sempre em magnitude muito semelhante. Com o cálculo do IV, as diferenças acabam por se anular. Já o NDII, elaborado a partir de bandas do NIR e do SWIR, apresentou mudanças mais semelhantes às do NDVI, com valores mais altos no norte da Amazônia devido aos efeitos BRDF e menores em direção a setembro.

Por último, o SWND, IV proposto neste trabalho para representar apenas a região SWIR nas bandas MODIS (bandas 6 e 7), apresentou um gradiente bem definido de mudanças maiores ao norte, medianas ao centro e baixas ao sul da Amazônia. Entretanto, foram pequenas as mudanças observadas entre junho e setembro para este índice, com uma leve tendência de aumento dos efeitos da correção BRDF na região central da Amazônia.

#### **4.2.2. Análise da magnitude dos efeitos BRDF na Amazônia**

A análise da magnitude do efeito BRDF, com base na métrica  $r$  de Cohen (1988), calculada de testes estatísticos não paramétricos (Mann-Whitney U), foi feita em quatro áreas selecionadas na Amazônia durante o período representativo da estação seca em 2002 (Juami-Japurá, Manaus, Santarém e Belém). Os resultados para as bandas (Tabela 4.1) mostraram que a magnitude dos efeitos BRDF foi significativo para a maior parte das bandas, locais e datas. Apenas os campos em branco na tabela representam dados em que o valor de “p” foi maior do que 0,001, indicando que os dados corrigidos e não corrigidos para efeitos BRDF não

eram estatisticamente diferentes, de acordo com os testes de Mann-Whitney U.

É possível observar que as datas iniciais, para todos os locais, tenderam a apresentar efeitos BRDF com intensidade mais baixa. A partir de agosto, entretanto, todas as amostragens apresentaram valores de  $r$  indicadores de forte efeito ( $r$  maior do que 0.5). Os valores de  $r$  aumentaram de maio para outubro, o que é coincidente com o incremento no AAR mostrado em seções anteriores (Figura 4.9) e com as maiores diferenças mensais observadas nos espectros do NDVI e EVI (Figura 4.10).

Tabela 4.1: Magnitude dos efeitos BRDF, expressa pela métrica  $r$ , calculada do teste não paramétrico de Mann-Whitney, para a reflectância das bandas MODIS. Os resultados são apresentados para quatro áreas na Amazônia durante o período de maio a outubro de 2002.

		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B11	B12
<b>Juami-Japurá</b>	30-mai	0.44	0.47	0.40	0.46	0.47	0.43	0.46		
	15-jun	0.27	0.23	0.26	0.29	0.22	0.19	0.29		
	1-jul	0.46	0.44	0.41	0.52	0.41	0.32	0.50		
	17-jul	0.59	0.65	0.56	0.65	0.65	0.41	0.66	0.05	0.05
	2-ago	0.79	0.80	0.72	0.81	0.80	0.44	0.79	0.68	0.68
	18-ago	0.83	0.83	0.78	0.85	0.83	0.53	0.83	0.73	0.72
	3-set	0.83	0.83	0.80	0.84	0.83	0.59	0.82	0.64	0.61
	19-set	0.85	0.84	0.81	0.85	0.84	0.57	0.83	0.84	0.84
	5-out	0.83	0.82	0.77	0.83	0.83	0.50	0.80	0.81	0.79
<b>Manaus</b>	30-mai	0.20	0.21	0.18	0.16	0.21	0.19	0.19		
	15-jun	0.62	0.60	0.58	0.64	0.58	0.58	0.65	0.11	0.11
	1-jul	0.82	0.79	0.80	0.83	0.78	0.70	0.81	0.71	0.71
	17-jul	0.83	0.80	0.80	0.84	0.79	0.56	0.81	0.83	0.83
	2-ago	0.82	0.79	0.78	0.83	0.79	0.58	0.79	0.83	0.83
	18-ago	0.83	0.81	0.77	0.84	0.80	0.63	0.79	0.84	0.84
	3-set	0.84	0.82	0.80	0.86	0.82	0.69	0.82	0.86	0.86
	19-set	0.85	0.84	0.84	0.86	0.84	0.77	0.84	0.87	0.86
	5-out	0.85	0.83	0.84	0.86	0.84	0.78	0.84	0.86	0.86
<b>Santarém</b>	30-mai	0.46	0.49	0.42	0.51	0.49	0.45	0.48		
	15-jun	0.69	0.69	0.66	0.76	0.73	0.70	0.72	0.36	0.35
	1-jul	0.73	0.62	0.64	0.74	0.70	0.60	0.70	0.75	0.74
	17-jul	0.77	0.66	0.64	0.77	0.74	0.49	0.72	0.79	0.78
	2-ago	0.69	0.68	0.64	0.70	0.69	0.44	0.70	0.63	0.63
	18-ago	0.66	0.67	0.59	0.68	0.69	0.42	0.64	0.57	0.57
	3-set	0.77	0.78	0.68	0.79	0.80	0.44	0.74	0.80	0.78
	19-set	0.82	0.83	0.78	0.84	0.85	0.64	0.81	0.85	0.85
	5-out	0.82	0.83	0.80	0.84	0.84	0.67	0.83	0.75	0.62
<b>Belém</b>	30-mai	0.23	0.27	0.29	0.24	0.27	0.23	0.32	0.08	0.07
	15-jun	0.64	0.73	0.60	0.74	0.71	0.71	0.70	0.08	0.08
	1-jul	0.36	0.35	0.29	0.40	0.35	0.18	0.35	0.28	0.28
	17-jul	0.26	0.27	0.22	0.28	0.24	0.05	0.24	0.25	0.25
	2-ago	0.59	0.61	0.51	0.63	0.61	0.25	0.56	0.48	0.49
	18-ago	0.74	0.73	0.68	0.76	0.71	0.38	0.69	0.69	0.69
	3-set	0.75	0.74	0.71	0.77	0.73	0.38	0.71	0.75	0.74
	19-set	0.76	0.74	0.74	0.78	0.74	0.44	0.73	0.69	0.68
	5-out	0.78	0.75	0.74	0.79	0.75	0.42	0.74	0.62	0.60



Classificação adaptada de Cohen (1988).

Fonte: Produzido do autor.

A análise da magnitude dos efeitos BRDF para os IVs apresentou comportamento mais variável do que a análise por reflectância das bandas, com alguns índices claramente mais sensíveis aos efeitos BRDF do que outros (Tabela 4.2). O IV mais sensível aos efeitos BRDF, com base na métrica  $r$ , foi o EVI, apresentando efeitos mais fortes na maior parte das datas e para todas as localidades. Para o EVI, a métrica  $r$

aumentou de maio para setembro e outubro em todas as áreas, portanto, sendo maior no final da estação seca. NDVI e PRI também foram sensíveis aos efeitos BRDF. Os IVs com menores valores de  $r$  foram o NDWI e o GRND.

Tabela 4.2: Magnitude dos efeitos BRDF, expressa pela métrica  $r$ , calculada do teste não paramétrico de Mann-Whitney, para os índices de vegetação do MODIS. Os resultados são apresentados para quatro áreas na Amazônia durante o período de maio a outubro de 2002.

		EVI	GRND	NDII	NDVI	NDWI	PRI	SWND
<b>Juami-Japurá</b>	30-mai	0.43	0.01	0.08	0.33	0.05	0.10	0.35
	15-jun	0.20	0.01	0.03	0.16	0.03		0.21
	1-jul	0.38	0.02	0.02	0.29	0.05		0.30
	17-jul	0.58	0.01	0.05	0.39	0.02	0.05	0.31
	2-ago	0.76	0.06	0.07	0.62	0.04	0.53	0.28
	18-ago	0.78	0.04	0.11	0.68	0.04	0.55	0.30
	3-set	0.79	0.07	0.12	0.69	0.07	0.41	0.38
	19-set	0.82	0.08	0.13	0.74	0.10	0.65	0.30
	5-out	0.77	0.02	0.14	0.71	0.13	0.49	0.26
<b>Manaus</b>	30-mai	0.14	0.00	0.03	0.09	0.03		0.13
	15-jun	0.61	0.05	0.04	0.50	0.16	0.08	0.58
	1-jul	0.78	0.05	0.05	0.71	0.18	0.51	0.65
	17-jul	0.77	0.08	0.08	0.75	0.10	0.63	0.34
	2-ago	0.76	0.17	0.13	0.72	0.08	0.64	0.31
	18-ago	0.77	0.16	0.22	0.73	0.06	0.74	0.31
	3-set	0.79	0.09	0.26	0.76	0.07	0.68	0.23
	19-set	0.82	0.14	0.32	0.81	0.12	0.73	0.29
	5-out	0.81	0.07	0.24	0.81	0.17	0.76	0.38
<b>Santarém</b>	30-mai	0.46	0.02	0.12	0.26	0.03		0.38
	15-jun	0.60	0.03	0.10	0.40	0.05	0.28	0.54
	1-jul	0.52	0.17	0.13	0.43	0.05	0.66	0.43
	17-jul	0.55	0.28	0.12	0.52	0.07	0.67	0.22
	2-ago	0.63	0.26	0.16	0.52	0.03	0.46	0.12
	18-ago	0.65	0.10	0.12	0.49	0.03	0.44	0.13
	3-set	0.75	0.08	0.11	0.59	0.02	0.65	0.15
	19-set	0.81	0.07	0.19	0.67	0.05	0.53	0.22
	5-out	0.82	0.02	0.26	0.69	0.06	0.40	0.33
<b>Belém</b>	30-mai	0.19	0.11	0.13	0.16	0.04		0.23
	15-jun	0.67	0.01	0.23	0.34	0.12	0.01	0.50
	1-jul	0.31	0.06	0.05	0.22	0.05	0.17	0.12
	17-jul	0.24	0.08	0.00	0.20	0.06	0.18	0.07
	2-ago	0.56	0.04	0.06	0.37	0.04	0.22	0.12
	18-ago	0.68	0.00	0.09	0.52	0.05	0.39	0.16
	3-set	0.69	0.02	0.07	0.56	0.04	0.39	0.15
	19-set	0.70	0.02	0.13	0.57	0.03	0.36	0.14
	5-out	0.73	0.07	0.11	0.64	0.00	0.16	0.14

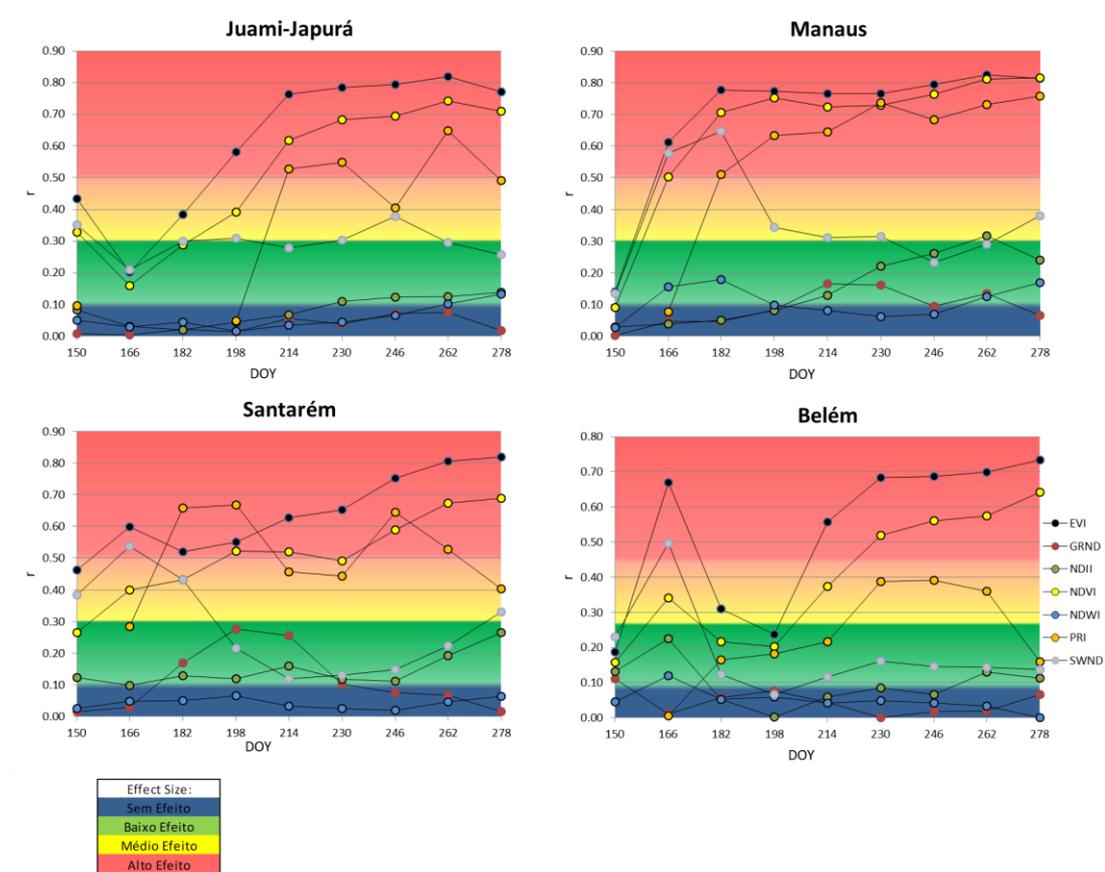
Effect Size:
Sem Efeito
Baixo Efeito
Médio Efeito
Alto Efeito

Classificação adaptada de Cohen (1988).

Fonte: Produção do autor.

Para analisar as tendências temporais com maior detalhe, a métrica  $r$  para os IVs foi plotada em função do tempo (Figura 4.15). É possível observar, novamente, a maior sensibilidade do EVI aos efeitos BRDF, seguido pelo NDVI. Para as áreas de Juami-Japurá e Manaus, estes dois IVs têm valores de  $r$  crescentes ao longo da estação seca. Os demais IVs possuem comportamentos variados ao longo do tempo em todas as localidades.

Figura 4.15: Magnitude dos efeitos BRDF, expressa pela métrica  $r$ , calculada do teste não paramétrico de Mann-Whitney para os índices de vegetação do MODIS. Os resultados para as quatro áreas se referem ao período de maio a outubro de 2002.



Fonte: Produção do autor.

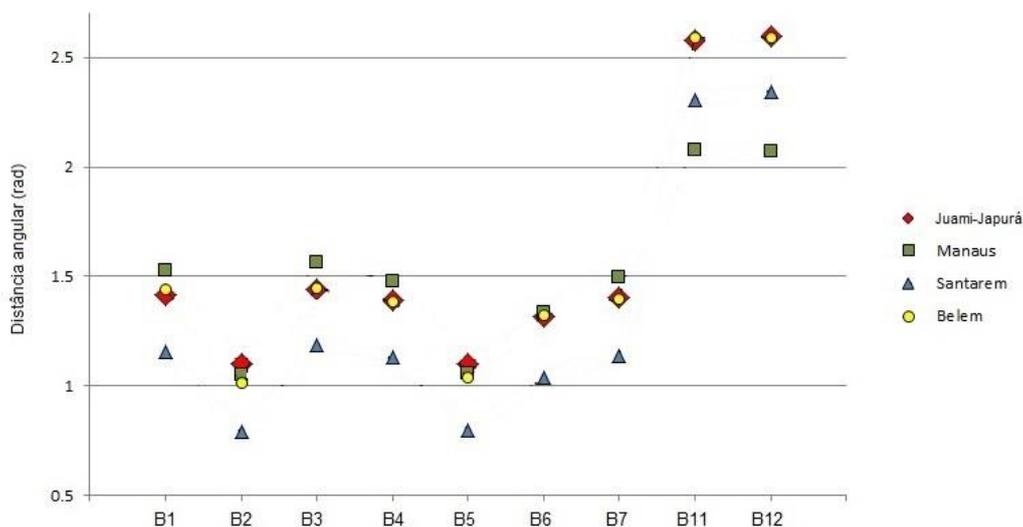
Portanto, quando comparados com a análise prévia da mudança percentual, os resultados da análise de magnitude dos efeitos BRDF mostraram concordância quanto à sensibilidade do EVI e, em algumas poucas datas e locais, do PRI e SWND, para os efeitos bidirecionais. Houve discordância quanto ao comportamento do NDVI nas análises.

### **4.2.3. Análise da distância angular entre espectros**

A análise de distância angular entre espectros de reflectância por banda e IVs, corrigidos e não corrigidos para os efeitos BRDF, mostrou quanto uma curva diferiu da outra no período de 30 de maio até 5 de outubro de 2002. Maiores valores de distância angular indicaram mudanças de forma das curvas temporais de uma determinada banda ou IV, decorrentes do procedimento de correção BRDF.

Para as bandas MODIS selecionadas, os maiores valores angulares foram observados nas bandas 11 e 12 (Figura 4.16). A reflectância destas bandas foi medida pelo MODIS na faixa espectral do verde com 1 km de resolução espacial. As bandas 11 e 12 apresentaram valores maiores do que 2 radianos para todas as localidades analisadas. Nas bandas 1 até 7, valores entre 0,5 e 1,5 radianos foram observados, com os menores valores se concentrando nas bandas 2 e 5, ambas na região do infravermelho próximo. As bandas 1, 3 e 4, representando respectivamente Vermelho, Azul e Verde, apresentaram valores semelhantes e consistentes entre as diferentes localidades. As bandas 6 e 7, pertencentes a região do SWIR, apresentaram distâncias angulares crescentes em relação a banda 5. Ao analisar as localidades selecionadas separadamente, é possível afirmar que Santarém obteve os menores valores de distância angular entre espectros de reflectância para as primeiras sete bandas do MODIS, enquanto que as demais localidades valores aproximadamente similares nestas bandas.

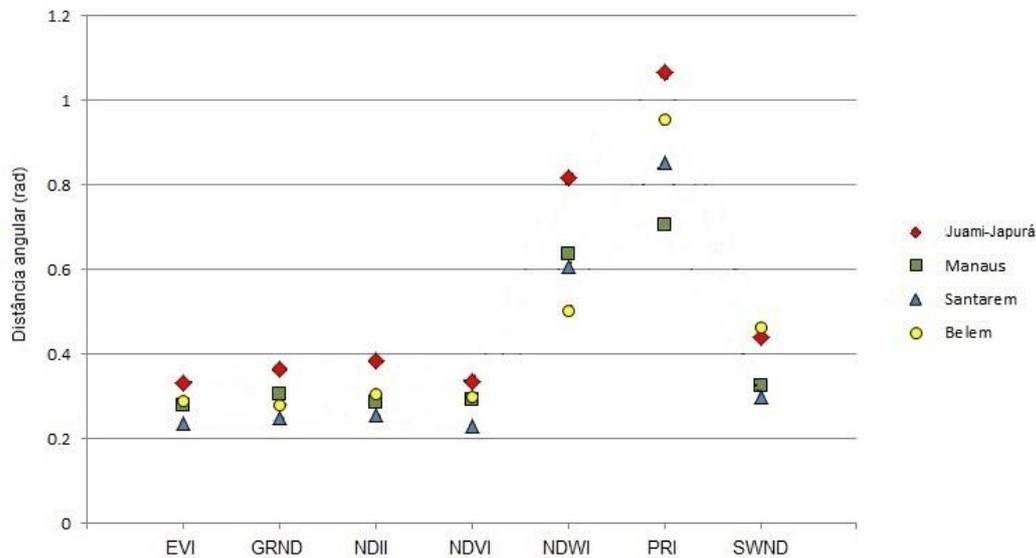
Figura 4.16: Variação de distância angular entre espectros temporais (30 de maio até 5 de outubro de 2002) de bandas MODIS selecionadas em quatro locais na Amazônia, para dados corrigidos e não corrigidos para efeitos BRDF.



Fonte: Produção do autor.

Os IVs selecionados, em comparação com a reflectância das bandas, apresentaram distâncias angulares relativamente menores, porém comparáveis dentro de seu grupo (Figura 4.17). O índice PRI (bandas 11 e 12) apresentou valores mais altos de distância angular do que os outros índices. Entretanto, o NDWI também apresentou distâncias angulares relativamente altas, com valores de 0,5 até 0,8 radianos. Tal resultado indica que os dois IVs sofreram mudanças maiores na forma de seus espectros temporais quando os dados foram corrigidos para efeitos BRDF. Os outros índices, incluindo o EVI e NDVI, permaneceram na mesma faixa de mudança angular, de 0,2 até 0,4 radianos. O SWND, entretanto, superou os valores até aproximadamente 0,5 radianos para Belém e Juami-Japurá. Considerando as localidades selecionadas, é possível afirmar que Santarém apresentou os menores valores de distância angular para os IVs, enquanto Juami-Japurá apresentou os maiores valores.

Figura 4.17: Variação de distância angular entre espectros temporais (30 de maio até 5 de outubro de 2002) de índices de vegetação em quatro locais na Amazônia, para dados corrigidos e não corrigidos para efeitos BRDF.



Fonte: Produção do autor.

### 4.3. Análise comparativa entre IVs corrigidos para efeitos BRDF e dados de torres de fluxo

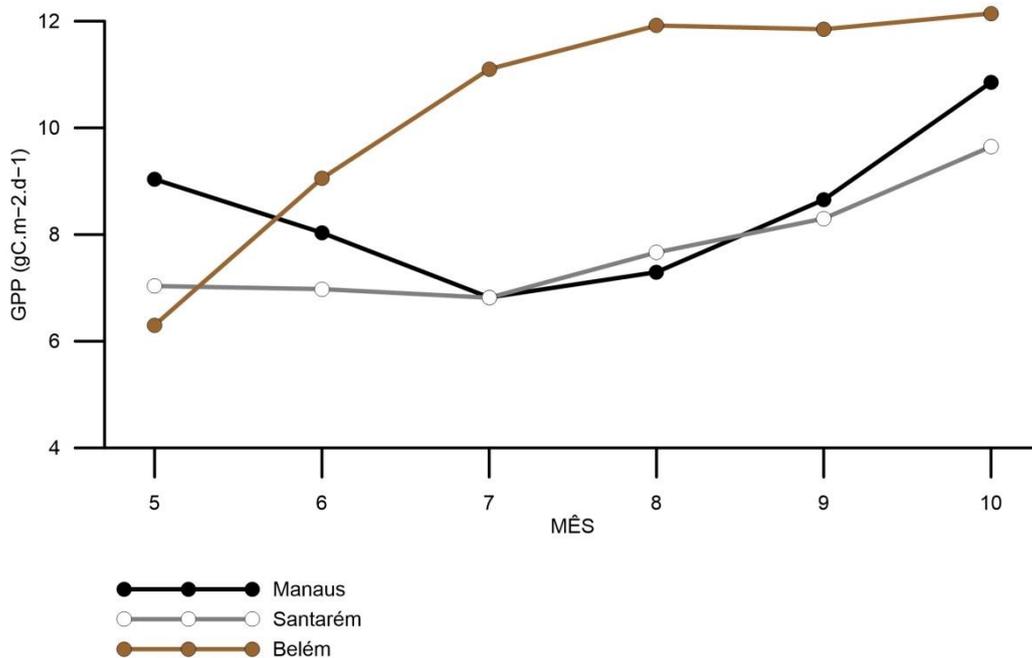
A análise comparativa dos IVs com dados de torres de fluxo na Amazônia foi feita para três das quatro localidades selecionadas (Manaus, Santarém e Belém) em janelas de 3x3 pixels. Juami-Japurá não possui torre de fluxo e, portanto, seus dados de IVs foram desconsiderados nessa etapa. O ano de 2002 foi escolhido para esta etapa, em detrimento do ano de 2008, por conta da disponibilidade maior de dados de GPP e LUE, a ponto de tornar possível a comparabilidade entre os dados das torres de fluxo e os IVs.

#### 4.3.1. Dados de torres de fluxo na Amazônia (GPP e LUE)

A GPP representa a produção primária medida pela torre de fluxo. Seu significado se relaciona com o brotamento de folhas, estrutura da vegetação e vigor vegetativo. Portanto, um incremento na GPP com o tempo indica que a vegetação está entrando em um estado mais produtivo, comum em períodos chuvosos. Nos resultados obtidos, é

possível observar que a GPP apresentou valores mais altos de julho para setembro para as três localidades: Manaus, Santarém e Belém (Figura 4.18). Os valores mais altos foram observados em Belém, que corresponde ao ano 2000. Nas duas outras torres, os resultados se referem a 2002. Portanto, o fato mais importante observado na Figura 4.18 é a existência de valores mais altos de GPP observados no final da estação seca em relação ao início da mesma.

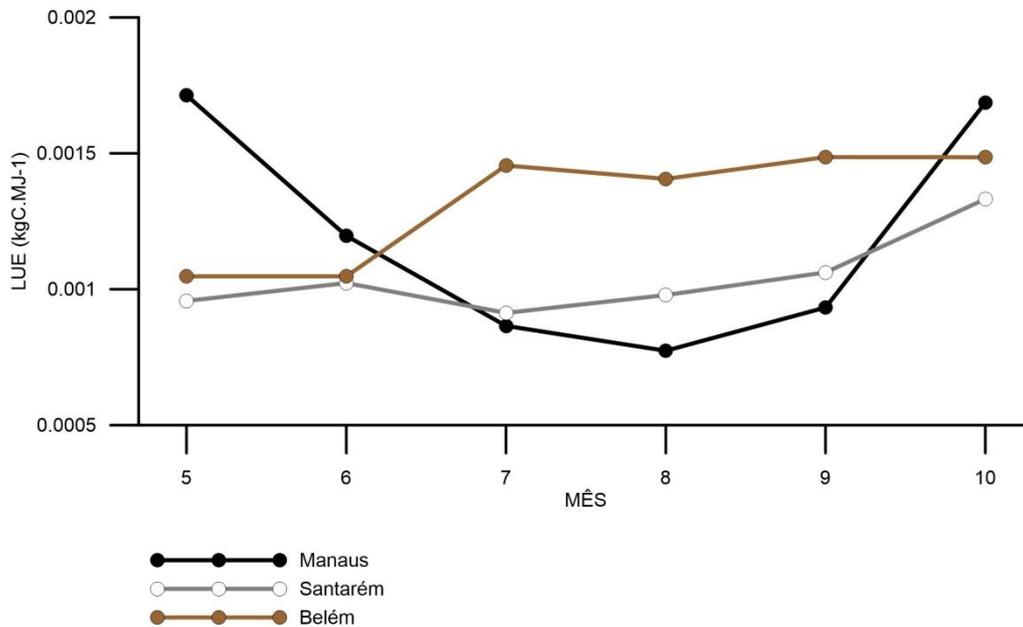
Figura 4.18: GPP para as torres de fluxo de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém).



Fonte: Produção do autor.

A LUE representa a eficiência de uso da luz pelas plantas. Este parâmetro se relaciona intimamente com respostas fotoquímicas e disponibilidade de luz. Para os resultados obtidos, também é possível observar um aumento no valor da LUE no final da estação seca, desta vez de uma forma mais tardia. A curva de LUE para Belém, novamente, é a que mais diferiu das demais localidades. Para Manaus, os valores de LUE diminuíram de maio para agosto, aumentando a partir desta data em direção a outubro. Quando comparado com Manaus, uma menor variação de valores com o tempo foi observada para Santarém e Belém.

Figura 4.19: LUE para as torres de fluxo de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém).

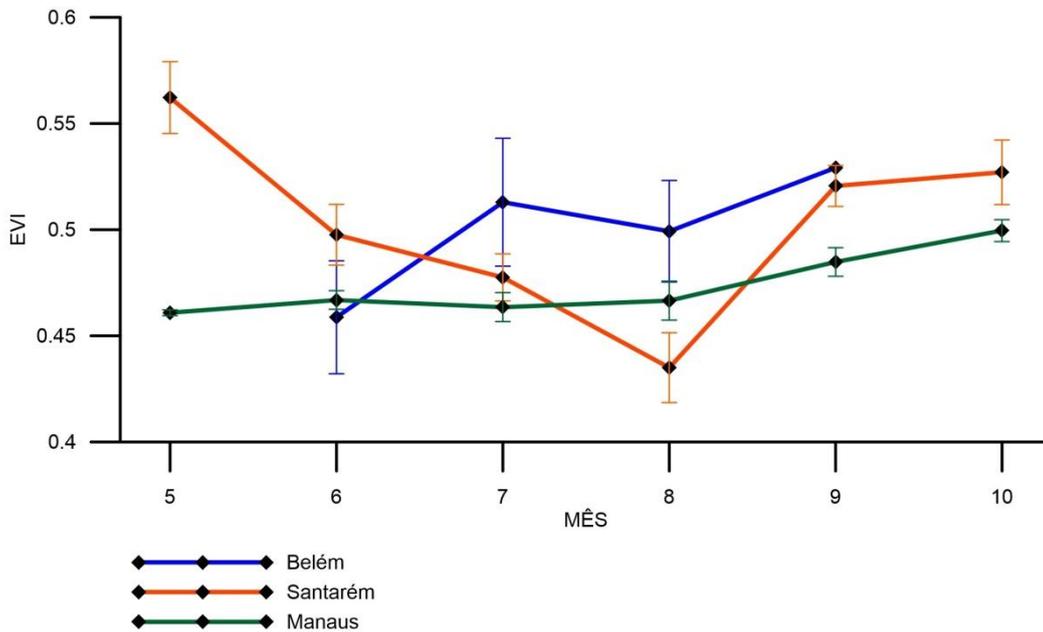


Fonte: Produção do autor.

#### 4.3.2. EVI

O comportamento sazonal do EVI, ao redor das torres (Figura 4.20), não foi completamente consistente com o comportamento das curvas de GPP da Figura 4.18. No entanto, como um todo, é possível afirmar que o EVI, mesmo após a correção BRDF, aumentou do início (junho) para o final da estação seca (setembro), seguindo o padrão geral dos dados de GPP. Os maiores valores de EVI foram também observados ao redor da torre de Belém que apresentou maiores valores de GPP e LUE entre junho e setembro. Quando comparado com os dados não corrigidos para os efeitos BRDF, as diferenças de EVI observadas entre setembro e junho foram fortemente reduzidas com a correção BRDF, conforme apresentado em resultados anteriores.

Figura 4.20: EVI para uma janela de 3x3 pixels ao redor das torres de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém).

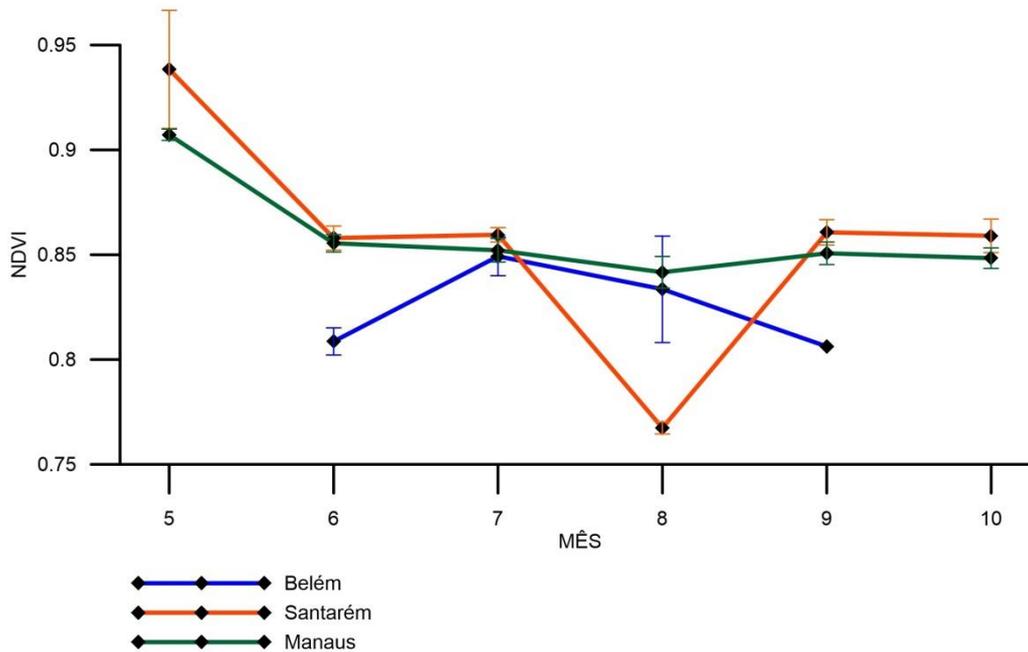


Fonte: Produção do autor.

### 4.3.3. NDVI

De junho a setembro, os valores de NDVI variaram de 0.80 a 0.85 sem uma tendência bem definida, do início para o final da estação seca, ao contrário do observado para o EVI. Portanto, a variação entre os valores de NDVI de junho e setembro provavelmente reflete a saturação do índice com a densidade da cobertura vegetal ou o IAF elevado nas três localidades estudadas. Este resultado confirma a tendência reportada na literatura do EVI ser um melhor preditor da GPP do que o NDVI.

Figura 4.21: NDVI para uma janela de 3x3 pixels ao redor das torres de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém).

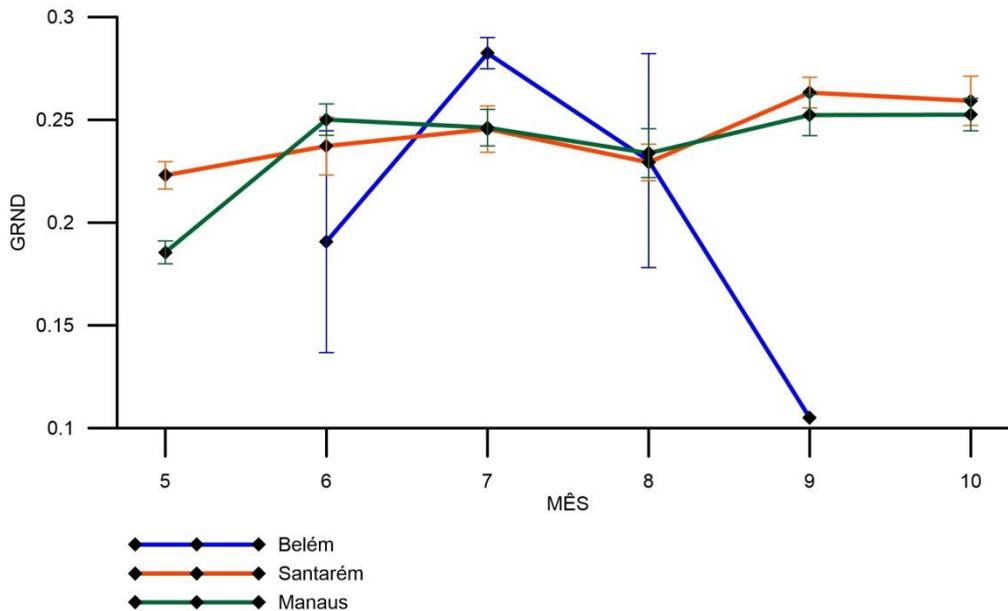


Fonte: Produção do autor.

#### 4.3.4. GRND

O índice GRND apresentou dados concordantes entre Manaus e Santarém, com os dados de Belém apresentando maior variabilidade. O comportamento geral do IV foi de um pequeno incremento do início para o final da estação seca nas torres de Manaus e Santarém, que pode estar associado com produção de folhagem nova nestes locais. Este comportamento segue o padrão do GPP na Figura 4.18. Para a torre de Belém, observou-se um pico de GRND em julho e uma diminuição em setembro. A torre de Belém foi a que apresentou, a partir do mês de julho, maior eficiência de uso da luz pelas plantas do que as demais localidades, apesar dos dados terem sido obtidos em anos distintos (2000 e 2002). Dados de fenologia de vegetação de campo são necessários para confirmar eventuais diferenças no tempo de brotamento de folhas novas entre estas localidades.

Figura 4.22: GRND para uma janela de 3x3 pixels ao redor das torres de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém).

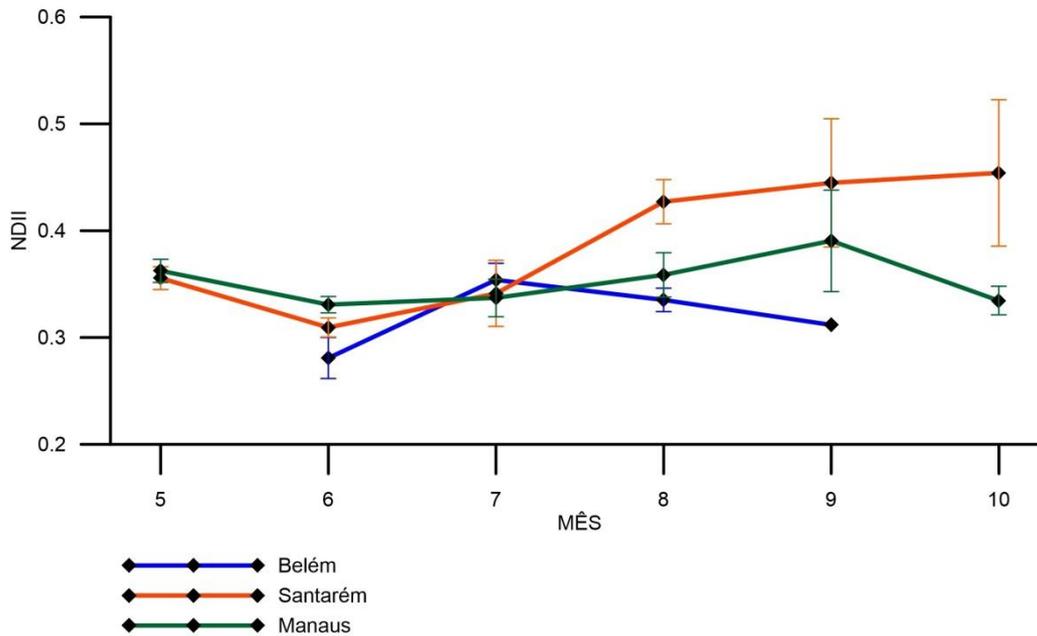


Fonte: Produção do autor.

#### 4.3.5. NDII

Os valores de NDII sugerem dosséis com menor estresse hídrico do início para o final da estação seca principalmente para Santarém, o que é um resultado inesperado. Um comportamento distinto foi observado na torre de Belém. Aparentemente tais variações estão mais associadas com a redução nos valores de reflectância da banda do SWIR do MODIS.

Figura 4.23: NDII para uma janela de 3x3 pixels ao redor das torres de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém).

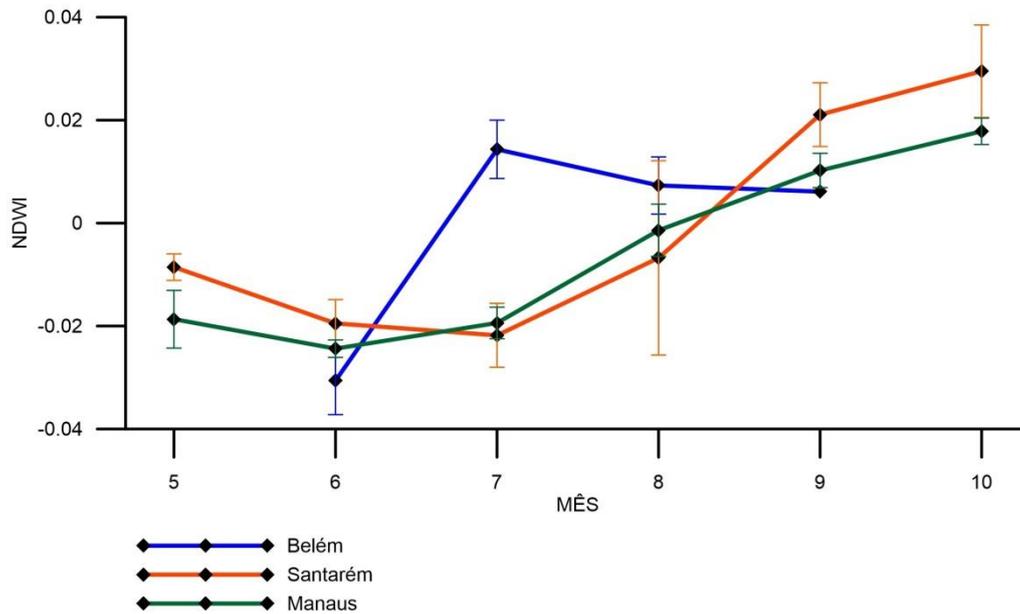


Fonte: Produção do autor.

#### 4.3.6. NDWI

O NDWI seguiu em parte o comportamento do NDII, indicando maiores quantidades de água foliar do início para o final da estação seca nas localidades de Santarém e Manaus (Figura 4.24). Um padrão distinto foi observado em Belém, com um pico de NDWI observado em julho e a redução dos valores nos meses seguintes, o que é aproximadamente concordante com os valores de GRND nesta localidade.

Figura 4.24: NDWI para uma janela de 3x3 pixels ao redor das torres de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém).

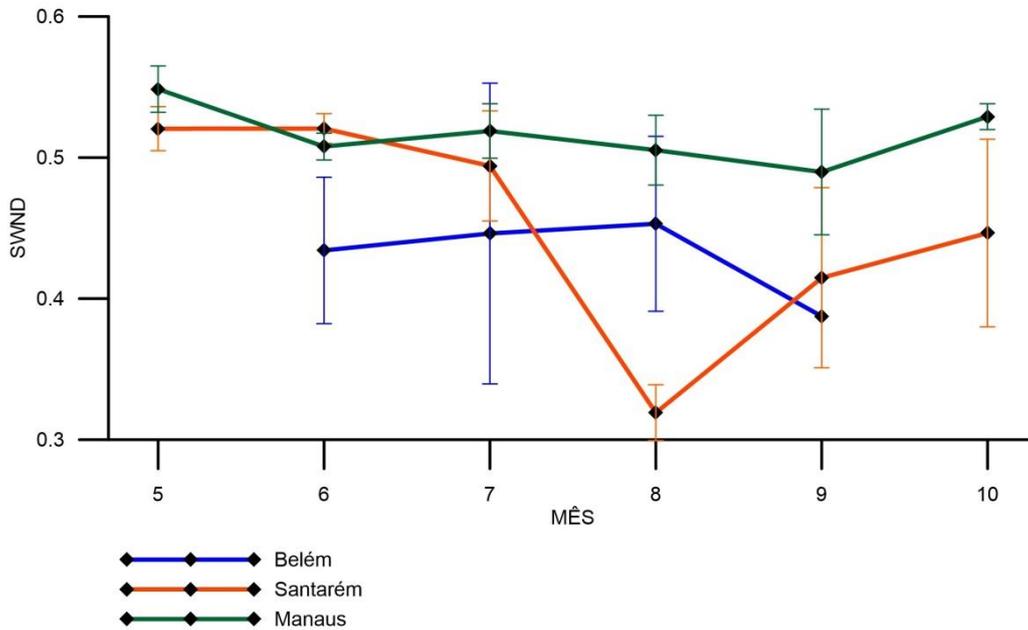


Fonte: Produção do autor.

#### 4.3.7. SWND

O SWND, índice proposto neste trabalho, não apresentou padrões bem definidos entre localidades (Figura 4.25). Uma das possíveis explicações para esta ausência de padrão é que ambas as bandas usadas em sua formulação são sensíveis à umidade do dossel. Portanto, elas tendem a covariar em maior ou menor grau, dependendo de cada tipo de vegetação considerado na análise.

Figura 4.25: SWND para uma janela de 3x3 pixels ao redor das torres de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém).



Fonte: Produção do autor.

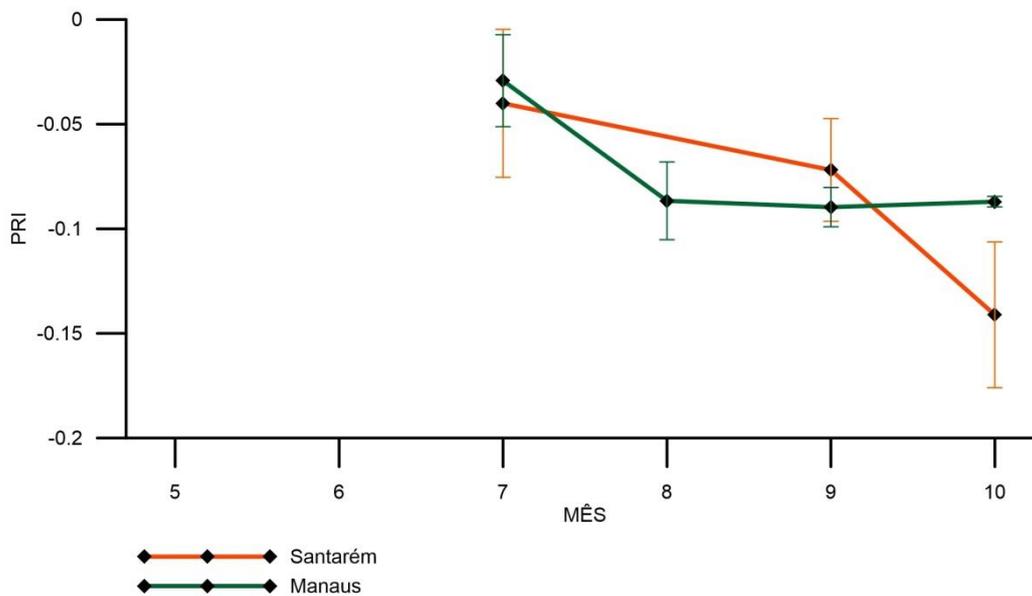
#### 4.3.8. PRI

O PRI é elaborado a partir das bandas 11 e 12 do MODIS, portanto, altamente correlacionadas na faixa do verde. Este IV está muito mais sujeito aos efeitos de espalhamento atmosférico e à contaminação dos pixels do que os demais IVs. A resolução de 1 km no momento da aquisição das imagens pelo MODIS nestas bandas não contribui para a melhoria destes aspectos. As outras bandas (e conseqüentemente os outros IVs) são gerados com resoluções de 250 e 500 m, o que permite uma seleção de pixels mais apurada com base nos fatores de geometria de aquisição e cobertura de nuvens.

Em termos gerais, não foi possível obter dados com boa qualidade radiométrica, com ausência completa dos dados na localidade de Belém no ano de 2000. Ao comparar o PRI (Figura 4.26) com a LUE (Figura 4.19), uma relação inversa foi observada, o que não é consistente com a literatura. Na Figura 4.19, os valores LUE aumentam de julho para outubro para Santarém e Manaus, enquanto que os valores de PRI

diminuem na direção neste período em direção ao final da estação seca. Além da contaminação atmosférica, parte desta inconsistência pode advir de pixels selecionados de direções distintas de imageamento, pois as relações entre PRI e LUE são sabidamente melhores na direção de retroespalhamento (DROLET et al., 2005). Este fator não foi avaliado nesta análise.

Figura 4.26: PRI para uma janela de 3x3 pixels ao redor das torres de Manaus, Santarém e Belém ao longo da estação seca (maio até outubro) de 2002 (2000 para Belém).



Fonte: Produção do autor.

## **5 DISCUSSÃO**

### **5.1. Análise comparativa da influência dos fatores que causam efeitos BRDF na Amazônia e no Cerrado**

Na comparação direta entre Cerrado e Amazônia quanto à presença e intensidade dos efeitos BRDF, assim como na comprovação da necessidade de sua correção em cada ambiente, não há trabalhos sobre este tema. O foco da literatura sobre os efeitos BRDF tem sido florestas tropicais e pouco se conhece sobre tais efeitos em ambientes savânicos como o do Cerrado (SIMS et al., 2011; HILKER et al., 2012). No presente estudo, os resultados obtidos mostraram os fatores causadores de efeitos BRDF, como AZS, AZV e o AAR, nos ambientes do Cerrado e da Amazônia, e sua dependência temporal.

Em experimentos de campo elaborados por Huete e Epiphonio (1995), os autores observaram tendência de diminuição de efeitos BRDF com o aumento do IAF em culturas agrícolas de Alfafa (gramíneas). A dependência dos efeitos BRDF para o IAF também foi confirmada por Walter-Shea et al. (1997), também usando culturas agrícolas. Os resultados de ambos os estudos indicariam que, com o aumento do IAF para uma cobertura de vegetação uniforme, como seria o dossel de florestas tropicais da Amazônia, quando comparado com o de savanas no Cerrado, os efeitos BRDF se tornariam menos intensos.

No contexto do presente trabalho, se as observações feitas por Huete e Epiphonio (1995) e Walter-Shea et al. (1997) fossem diretamente extrapoláveis, a vegetação da Amazônia, em princípio, sofreria menos efeitos BRDF do que a vegetação do Cerrado. Entretanto, as condições atmosféricas mais adversas na Amazônia durante a aquisição de imagens de satélites produzem resultados contrários. O Cerrado, apesar de ser representado por uma cobertura vegetal mais anisotrópica, permanece com efeitos BRDF menos intensos do que a Amazônia. Apesar disso, é importante ressaltar a sazonalidade mais alta em todos os fatores causadores de efeitos BRDF para o Cerrado do que para a Amazônia,

conforme demonstrado neste trabalho. A conclusão aqui obtida sobre o tema é de que o Cerrado, apesar de sofrer com os efeitos BRDF como qualquer superfície imageada por um sensor de campo de visada largo como o MODIS, apresenta efeitos muito menos intensos do que a Amazônia.

Ao analisar os fatores causadores de efeitos BRDF individualmente, é necessário dar maior destaque para o AAR. Por ser composto por componentes angulares de geometria sensor-alvo-sol, o AAR representa a variação sazonal em geometria de observação de forma mais clara. Os resultados aqui obtidos concordam com as observações feitas por Hilker et al. (2009), onde os valores de AAR, apesar de variantes em espalhamento frontal e retroespalhamento de acordo com a observação, aumenta em direção aos ângulos 180 e 0 graus do início para o final da estação seca, indicando observações potencialmente mais próximas do *hotspot* no final de setembro. Mudanças na direção de imageamento podem causar variação significativa na resposta espectral obtida. Por exemplo, Breunig et al. (2011) encontraram diferenças significativas na reflectância espectral da soja nas direções de retroespalhamento e espalhamento frontal, quando a cultura foi imageada em datas consecutivas em um mesmo estágio fenológico. Estes resultados são consistentes com os obtidos neste trabalho durante a ACP.

A qualidade do pixel observada pelo MODIS reflete a maior cobertura de nuvens na Amazônia durante todo o ano, em comparação com a do Cerrado. Os resultados para o Cerrado indicam condições de imageamento mais favoráveis durante todo o ano. Rizzi et al. (2009) observaram condições semelhantes ao estimar o EVI a partir de dados MODIS para soja no Mato Grosso. As condições atmosféricas causaram efeitos significativos nos resultados mesmo após a aplicação de algoritmos de seleção de pixels de maior qualidade radiométrica, com a redução de disponibilidade de informação válida. Na geração de produtos MODIS como o IAF, a frequência de estimativas feitas com o Algoritmo Principal (método físico) diminui substancialmente da estação seca para a

chuvosa, onde estimativas empíricas feitas com o Algoritmo Backup passam a ser feitas.

## **5.2. Magnitude dos efeitos BRDF na Amazônia para IVs e reflectância**

Com a análise focada na Amazônia, a sensibilidade dos IVs e bandas do MODIS aos efeitos bidirecionais foi testada pela mudança percentual promovida pela correção BRDF no início e final da estação seca, pela magnitude dos efeitos sobre o sinal e quanto ao impacto da correção sobre a forma de espectros temporais. Em discussões na literatura, Galvão et al (2011) afirmam que o EVI, índice não normalizado baseado nas bandas do vermelho, NIR e azul, possui alta sensibilidade à geometria de aquisição, sendo um IV altamente estrutural e correlacionado com a banda do NIR. Outros índices normalizados, a exemplo do NDVI, possuem comportamento muito mais linear e, portanto, estão menos suscetíveis aos efeitos BRDF (MOURA et al., 2012; SIMS et al., 2011; BANDHARI et al., 2011). No presente trabalho, foi confirmada a maior sensibilidade do EVI, em relação ao NDVI, para efeitos BRDF. Ao se aplicar a correção BRDF do MAIAC, o EVI mostrou mudanças sazonais menos intensas do que as observadas antes da correção, especialmente durante a estação seca. Este resultado é parcialmente consistente com o estudo feito por Morton et al. (2014), que mostrou importantes mudanças no EVI após a correção BRDF, sem modificações sazonais. Contrariamente às observações feitas por estes autores, os resultados aqui obtidos mostraram um incremento residual do EVI do início para o final da estação seca, mesmo após a correção BRDF. Além disso, o NDVI não foi o IV menos sensível aos efeitos BRDF, se estabelecendo como um índice de alterações medianas, quando comparado aos outros IVs analisados neste trabalho.

Especialmente, a análise do comportamento da reflectância das bandas MODIS mostrou que as bandas do visível foram comparativamente mais sensíveis aos efeitos bidirecionais do que as bandas do infravermelho próximo e SWIR.

### **5.3. Análise comparativa de IVs com dados de GPP e LUE**

Na análise comparativa dos IVs corrigidos para efeitos BRDF com dados provindos de torres de fluxo para a Amazônia, foi identificada uma relação consistente do EVI com o aumento da GPP do início para o final da estação seca. Apesar de não representarem curvas com alta correlação, a tendência de aumento foi observada ao redor das três torres de fluxo analisadas. Na comparação de produtos GPP do MODIS com dados de torres, Nagai et al. (2010) argumentam que a relação entre dados de torres e de imagens é influenciada pelas condições de observação dos satélites e pelas diferenças de escalas. Entretanto, o presente estudo mostra a melhor relação entre EVI e GPP, quando comparada a do NDVI, que satura com o aumento de densidade de vegetação. O desempenho menos satisfatório do NDVI para explicar o GPP também foi observado por Inoue (2007) ao comparar NDVI e PRI a novos índices em diferentes regiões espectrais.

Além do EVI, os índices NDII e NDWI se comportaram de maneira concordante com os dados GPP ao longo da estação seca. Krofcheck et al. (2016) encontraram boa representatividade do NDWI em relação à GPP principalmente em situações de estresse da vegetação, onde o IV se comportou de forma mais satisfatória do que o NDVI. Este resultado é concordante com o NDWI MODIS calculado neste trabalho na estação seca, um período que representa estresse vegetativo maior do que o da estação chuvosa.

É importante destacar também que parte da flutuação observada no NDVI e no SWND indica saturação dos índices. Como IVs normalizados, é comum que seu sinal se encontre saturado em florestas tropicais (WANG et al., 2003). No contexto dos IVs relacionados com os dados de torres de fluxo para o GRND, Moura et al. (2017) relacionaram este IV com o brotamento de folhas novas na Amazônia, indicando que o EVI se relacionou muito mais fortemente com o índice de área foliar de folhas maduras. De forma concordante, o comportamento do GRND observado neste trabalho segue o padrão ascendente no meio da estação seca,

especialmente para os dados de Belém (CAX). Observações de campo são necessárias para confirmar esta tendência, visto que as informações de fenologia da vegetação apresentadas por Moura et al. (2017) se referem a um processo de modelagem na Amazônia feito por Wu et al. (2016).

O PRI, segundo Middleton et al (2016), é altamente correlacionado com a LUE devido a sua capacidade de expressar características fotoquímicas da vegetação. No presente trabalho, a correlação do PRI com a LUE foi prejudicada pela ausência de dados de campo e de observações MODIS válidas pelo MAIAC. Porém, ao considerar os dados válidos, o PRI e a LUE apresentaram uma correlação negativa, o que não é consistente com a literatura. Esta correlação é normalmente positiva (Middleton et al., 2016). A baixa disponibilidade de dados para o PRI e seus resultados inesperados justificam, mais uma vez, o argumento de Nagai et al. (2010) sobre a baixa representatividade de dados de satélite comparados com dados de campo quando as condições atmosféricas exercem significativa interferência. Neste caso, mesmo a seleção de pixels válidos e a correção BRDF pelo MAIAC não foram suficientes para que os dados válidos recuperados representassem as características da superfície. Outro fator potencialmente importante nestas relações é a direção de imageamento, que produz relações positivas entre PRI e LUE mais fortes na direção de retroespalhamento e menos intensas na de espalhamento frontal. Este fator não foi analisado neste trabalho.

## 6 CONCLUSÕES

O presente trabalho foi capaz de atrelar dados sobre fatores que causam os efeitos bidirecionais com as variáveis que sofrem a influência dos mesmos, traduzidas em bandas e IVs. De forma geral, os efeitos bidirecionais são mais intensos na Amazônia do que no Cerrado. Conseqüentemente, estudos de fenologia da vegetação por satélite na Amazônia requerem correção BRDF se sensores com campo de visada largo forem utilizados (p. ex., MODIS) e se IVs sensíveis a tais efeitos forem selecionados (p.ex., EVI e PRI). Este resultado confirma a primeira hipótese do trabalho de que os efeitos bidirecionais são diferentes para a Amazônia e Cerrado em função das condições atmosféricas distintas nestes ecossistemas e do tipo de vegetação ali existente.

A sensibilidade dos índices à correção dos efeitos BRDF foi testada, indicando que IVs como o EVI e o PRI são altamente suscetíveis às variações na geometria de aquisição dos dados pelo MODIS. Ao verificar a consistência dos IVs com dados de torres de fluxo após a correção BRDF, foram encontradas concordâncias e discordâncias com GPP e LUE, dependendo do IV selecionado ou do seu significado biofísico. Este resultado não confirma por completo a hipótese de que o comportamento do EVI reportado na literatura, do início para o final da estação seca na Amazônia, é consistente com o comportamento dos demais IVs estudados, observando-se uma concordância em apenas três dos sete IVs avaliados.

Durante a análise da influência dos fatores que causam efeitos BRDF na Amazônia e no Cerrado, pôde-se concluir que:

(1) Da Amazônia para o Cerrado, a sazonalidade dos fatores causadores de efeitos BRDF se torna maior, com AZS e AZV tendo maior variabilidade no Cerrado. A qualidade do pixel também varia mais no Cerrado proporcionalmente;

(2) Apesar da maior sazonalidade, os efeitos BRDF para a Amazônia são muito mais significativos por causa das condições atmosféricas mais

adversas ao longo de todo o ano, traduzidas pela baixa qualidade de pixels encontrada. Neste sentido, a necessidade de correção BRDF para a Amazônia é relevante e fundamental para índices como o EVI e PRI;

(3) O AAR foi a variável que melhor representou as diferenças na direção de imageamento para a Amazônia, indicando diferenças entre aquisições em espalhamento frontal e retroespalhamento, bem como a sua variabilidade sazonal ao longo do ano. O AAR atinge as direções mais extremas (0 e 180 graus) em outubro, onde prevalecem maiores quantidades de observações MODIS na direção de retroespalhamento.

Quando se avaliou a magnitude dos efeitos BRDF na Amazônia para diferentes IVs e bandas, concluiu-se que:

(1) Com a correção dos efeitos BRDF, a reflectância das bandas apresentou uma queda de sinal, com bandas apresentando maiores efeitos BRDF no início ou no final da estação seca. A banda 1 (vermelho) foi a que apresentou a maior variação entre o início e o final da estação seca. A banda 2 (infravermelho próximo) apresentou taxas altas de mudança nos dois períodos, porém com redução do impacto da correção BRDF no sul da Amazônia ao final da estação seca;

(2) Da avaliação conjunta das mudanças percentuais em IVs, da magnitude dos efeitos BRDF determinada de testes não-paramétricos (Mann-Whitney) e métricas de Cohen, e do cálculo de distâncias angulares, observou-se que os IVs mais sensíveis aos efeitos BRDF foram o EVI e o PRI, com o NDVI apresentando sensibilidade moderada entre os IVs selecionados;

(3) Em geral, efeitos diferenciados entre a parte norte e sul da Amazônia foram observados para as bandas e IVs, indicando diferenciação de condições de observação e dos outros fatores causadores de efeitos BRDF. Além disso, uma pequena influência do tipo de cobertura da terra presente exerceu influência na magnitude dos efeitos BRDF, porém sem efeitos observáveis de sazonalidade.

Finalmente, após a análise da consistência do comportamento dos sete IVs estudados, corrigidos para efeitos BRDF, com dados de GPP e LUE de três torres de fluxo, observou-se que:

(1) Índices como o EVI, NDII e NDWI seguiram o padrão de incremento de GPP do início do final da estação seca em três torres de fluxo estudadas (Belém, Manaus e Santarém), sugerindo modificações na estrutura e na quantidade de água do dossel vista pelo sensor durante o período de estresse hídrico e de maior disponibilidade de radiação;

(2) A relação inversa observada entre PRI e LUE não foi consistente com a literatura, provavelmente refletindo as incertezas na análise dos dados produzidas pela alta correlação da reflectância das bandas 11 e 12 (faixa do verde) do MODIS, pela contaminação atmosférica residual de pixels (espalhamento atmosférico) e pela direção de imageamento dos pixels;

(3) O GRND mostrou padrões distintos entre as localidades, indicando possíveis padrões fenológicos diferenciados de acordo com a região, o que requer observações de campo para fins de confirmação de informação;

(4) O NDVI e SWND não mostraram padrões bem definidos durante a estação seca nas três torres analisadas, indicando possível saturação de dados com a alta densidade de cobertura vegetal das florestas estudadas.

Finalmente, é possível afirmar, em linhas gerais, que o estudo desenvolvido constitui uma base importante para compreender os efeitos BRDF sobre a reflectância de bandas e IVs do MODIS. Futuros estudos podem se beneficiar do uso de sensores de amplo campo de visada com melhor resolução espacial do que a do MODIS ou de sensores multiangulares com tempo de revisita adequado para estudos de fenologia vegetação. Embora os efeitos BRDF possam ser considerados "ruídos" em séries temporais de alguns IVs, eles também podem ser vistos como "fontes de informação" para obter informação sobre a composição e estrutura da vegetação na Amazônia, conforme demonstrado em trabalhos recentes (HILKER et al., 2017).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADELIN, K.R.M.; BRIOTTET, X.; CEAMANOS, X.; DARTIGALONGUE, T.; GASTELLU-ETCHEGORRY, J.P. ICARE-VEG: A 3D physics-based atmospheric correction method for tree shadows in urban areas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 142, p.311-327, 2018.
- ALHO, C. J. R.; MARTINS, E. S. **De grão em grão o Cerrado perde espaço**: impactos do processo de ocupação. Brasília: WWF, 1995. 65p.
- ALMEIDA, C. T.; DELGADO, R. C.; GALVÃO, L. S.; ARAGÃO, L. E. O. C.; RAMOS, M. C. Improvements of the MODIS Gross Primary Productivity model based on a comprehensive uncertainty assessment over the Brazilian Amazonia. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 145, p. 268-283, 2018.
- ANDERSON, L. O. Biome-scale forest properties in Amazonia based on field and satellite observations. **Remote Sensing**, v. 4, n. 12, p. 1245–1271, 2012.
- 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, n. 3, p. 733-750, 2010.
- 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, n. 2, p. 155–165, 1998.
- BARNES, W. L.; PAGANO, T. S.; SALOMONSON, V. V. Prelaunch characteristics of the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1088-1100, 1998.
- BARRAGAN, J. F. M.; DE OLIVEIRA FONTES, C. H.; PEREIRA, O. J.; BARRETO, S. T. S.; PACHECO, L. A. Análises de métricas de similaridades em séries temporais para reconhecimento de padrões. **Cadernos do IME: Série Estatística**, v. 33, n. 2, p. 35-47, 2012.
- BHANDARI, S.; PHINN, S.; GILL, G. 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, n. 22, p. 7513-7538, 2011.
- BORENSTEIN, M.; HEDGES, L. V.; HIGGINS, J. P. T.; ROTHSTEIN, H. R. Converting among effect sizes. In: \_\_\_\_\_. **Introduction to meta analysis**. Chichester, West Sussex, UK: Wiley, 2009. p.45-49.

BORGES, E. F. **Discriminação e caracterização fenológica de classes de cobertura vegetal natural e antrópica do oeste da Bahia a partir de séries temporais do sensor MODIS**. 138p. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) – Universidade de Brasília, Brasília, , 2014.

BRAGA, P. I. S. Subdivisão fitogeográfica, tipos de vegetação, conservação e inventário florístico da floresta amazônica. **Acta Amazonica**, v. 9, n. 4, p-53-80, 1979.

BRASIL. **Lei complementar no 124, de 3 de janeiro de 2007**. Institui a SUDAM, atualizando os limites da Amazônia Legal. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/lcp/Lcp124.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/Lcp124.htm)>. Acesso em: jan. 2018.

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**, v. 107, n. 33, 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, n. 1, p. 34-42, 2011.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTA DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). **Mapa interativo**. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/mapainterativo/>>. Acesso em: nov. 2018.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. 2.ed. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1988.

CONTI, J. C. **Eficácia de medidas de similaridade para a classificação de séries temporais associadas ao comportamento fenológico de plantas**. 50p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Campinas, 2013.

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

DROLET, G. G.; HUENNRICH, K. F.; HALL, G. G.; MIDDLETON, E. M.; BLACK, T. A.; BARR, A. G.; MARGOLIS, H. A. A MODIS-derived photochemical reflectance index to detect inter-annual variations in the photosynthetic light-use efficiency of a boreal deciduous forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, n. 2/3 p. 212-224, 2005.

EKLUNDH, L. R. Noise estimation in NOAA AVHRR Maximum-Value composite NDVI images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, n. 15, p. 2955-2962, 1995.

ELIS, P. **The essential guide to effect sizes**: statistical power, meta-analysis, and the interpretation of research results. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

EPIPHANIO, J. C. N.; HUETE, E. R. Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in Alfafa.

**Remote Sensing of Environment**, v. 51, p. 351-369, 1995.

FERREIRA, L. V.; VENTICINQUE, E.; ALMEIDA, S. O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 53, p. 157-166, 2005.

FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, M. E. Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado-da-arte. **Acta Scientiarum: Biological Sciences**, v. 30, n. 4, p. 379-390, 2008.

FRITZ, C. O.; MORRIS, P. E.; RICHLER, J. J. Effect size estimates: current use, calculations, and interpretation. **Journal of Experimental Psychology: General**, v. 141, n. 1, p. 2-18, 2012.

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, n. 3, p. 897–907, 2011.

FURUKAWA, T. A.; LEUCHT, S. How to obtain NNT from Cohen's d: comparison of two methods. **PloS one**, v. 6, e19070, 2011.

GALVÃO, L. S.; BREUNIG, F. M.; SANTOS, J. R.; MOURA, Y. M. View-illumination effects on hyperspectral vegetation indices in the Amazonian tropical forest. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, n. 1, p. 291-300, 2013.

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

GAMON, J. A.; SERRANO, L.; SURFUS, J.S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation-use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. **Oecologia**, v. 112, n. 4, p. 492–501, 1997.

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

GAO, B. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996.

HEIMANN, M.; ESSER, G.; HAXELTINE, A.; KADUK, J.; KICKLIGHTER, D. W.; KNORR, W.; OTTO, R. D.; PRENTICE, I. C.; SAUF, W.; SCHLOSS, A.; SITCH, S.; WITTENBERG, U.; WURTH, G. Evaluation of terrestrial carbon cycle models through simulations of the seasonal cycle of atmospheric CO<sub>2</sub>: first results of a model intercomparison study. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 12, n. 1, p. 1-24, 1998.

HILKER, T.; GALVÃO, L. S.; ARAGÃO, L. E. O. C.; MOURA, Y. M.; AMARAL, C. H.; LYAPUSTIN, A. I.; WU, J.; ALBERT, L. P.; FERREIRA, M. J.; ANDERSON, L. O.; SANTOS, V. A. H. F.; PROHASKA, N.; TRIBUZY, E.; CERON, J. V. B.; SALESKA, S. R.; WANG, Y.; GONÇALVES, J. F. C.; OLIVEIRA-JUNIOR, R. C.; RODRIGUES, J. V. F. C.; GARCIA, M. N. Vegetation chlorophyll estimates in the Amazon from multi-angle MODIS observations and canopy reflectance model. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 58, p. 278-287, 2017.

HILKER, T.; LYAPUSTIN, A.; HALL, F. G.; WANG, Y.; COOPS, N. C.; DROLET, G.; BLACK, T. A. An assessment of photosynthetic light use efficiency from space: modeling the atmospheric and directional impacts on PRI reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 11, p. 2463-2475, 2009.

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

HODGSON, M. E.; KAR, B. Modeling the potential swath coverage of nadir and off-nadir pointable remote sensing satellite-sensor systems. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 35, n. 3, p. 147-156, 2008.

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

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, n. 6, 2006.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A. comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 440–451, 1997.

HUNT, E. R.; ROCK, B. N. Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances. **Remote Sensing of Environment**, v. 30, n. 1, p. 43-54, 1989.

INOUE, Y. Spectral indices for accessing photosynthetic efficiency and capacity at a canopy scale derived from hyperspectral and CO2 flux measurements in rice fields. In: 2007 ASA-CSSA-SSSA INTERNATIONAL ANNUAL MEETINGS, New Orleans, EUA. **Proceedings...** New Orleans, Louisiana, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de biomas e de vegetação**. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>>. Acesso em: jan. 2018.

JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, v. 11, n. 1, p. 185-200, 1991.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2.ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598p.

JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R.; DEFRIES, R.; ROY, D. P.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V. V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R. B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; WAN, Z.; HUETE, A. R.; VAN LEEUWEN, W.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J. P.; LEWIS, P.; BARNESLEY, M. J. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228-1249, 1998.

KEMPENEERS, P.; ZARCO-TEJADA, P. J.; NORTH, P. R. J.; DE BACKER, S.; DELALIEUX, S.; SEPULCRE-CANTÓ, G.; MORALES, F.; VAN AARDT, J. A. N.; SAGARDOY, R.; COPPIN, P.; SCHEUNDERS, P. Model inversion for chlorophyll estimation in open canopies from hyperspectral imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 17/18, p. 5093–5111, 2008.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 147-155, 2005.

KROFCHECK, D. J.; EITEL, J. U. H.; LIPPITT, C. D.; VIERLING, L. A.; SCHULTHESS, U.; LITVAK, M. E. Remote sensing based simple models of GPP in both disturbed and undisturbed Piñon-Juniper woodlands in the southwestern U.S. **Remote Sensing**, v. 8, n. 20, 2016.

KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; BOARDMAN, J.W.; HEIDEBRECHT, K.B.; SHAPIRO, A.T.; BARLOON, P.J.; GOETZ, A.F.H. The Spectral Image Processing System (SIPS): interactive visualization and analysis of Imaging Spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, p. 145–163, 1993.

LIANG, L.; SCHWARTZ, M. D.; FEI, S. Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 1, p. 143-157, 2011.

LIESENBERG, V.; PONZONI, F. J.; GALVÃO, L. S. Análise da dinâmica sazonal e separabilidade espectral de algumas fitofisionomias do Cerrado com índices de vegetação dos sensores MODIS/Terra e Aqua. **Revista Árvore**, v. 31, n. 2, p. 295-305, 2007.

LIMA, G. C.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, A. H.; AVANZI, J. C.; UMMUS, M. E. Avaliação da cobertura vegetal pelo índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN). **Ambiente e Água**, v. 8, n. 2, p. 204-214, 2014.

LIMA, J. E. F. W. Situação e perspectivas sobre as águas do cerrado. **Ciência e Cultura**, v. 63, n. 3, p. 27-29, 2011.

LINHARES, M. M. A.; ROCHA, N. C. C.; AMARAL, B. A. S. Análise do índice MPRI como indicador vegetativo através da correlação do mesmo com o índice NDVI. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013.

LUAPUSTIN, A. I. Atmospheric and geometrical effects on land surface albedo. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. D4, p. 4127-4143, 1999.

LYAPUSTIN, A. I.; MARTONCHIK, J.; WANG, Y.; LASZLO, I.; KORKIN, S. Multiangle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC): 1. radiative transfer basis and look-up tables. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 116, n. D3, 2011a.

LYAPUSTIN, A. I.; WANG, Y.; FREY, R. An automatic cloud mask algorithm based on time series of MODIS measurements. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 113, n. D16, 2008.

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

LYAPUSTIN, A. I.; WANG, Y.; LASZLO, I.; KAHN, R.; KORKIN, S.; REMER, L.; LEVY, R.; REID, J. S. Multiangle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC): 2. aerosol algorithm. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 116, n. D3, 2011b.

MACHADO, C. B. **Análise fenológica do dossel da floresta nacional do tapajós utilizando dados orbitais do sensor MODIS e hiperespectrais locais**. 143p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

MALHI, Y.; ROBERTS, J. T.; BETTS, R. A.; KILLEEN, T. J.; LI, W.; NOBRE, C. A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, v. 319, n. 5860, p. 169-172, 2008.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

MEYER, D.; VERSTRAETE, M.; PINTY, B. The effect of surface anisotropy and viewing geometry on the estimation of NDVI from AVHRR. **Remote Sensing Reviews**, n. 12, v. 1-2, p. 3-27, 1995.

MIDDLETON, E. M.; HUENNRICH, K. F.; LANDIS, D. R.; BLACK, T. A.; BARR, A. G.; MCAUGHEY, J. H. Photosynthetic efficiency of northern forest ecosystems using a MODIS-derived Photochemical Reflectance Index (PRI). **Remote Sensing of Environment**, v. 187, p. 345 – 366, 2016.

MIURA, T.; JORDAN, M.; VARGAS, M. Assessment of cross-sensor vegetation index compatibility between VIIRS and MODIS using near-coincident observations. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 12, n. 4, 045004, 2018.

MONTIBELLER, B.; SILVEIRA, H. L. F.; SANCHES, I. D.; KORTING, T. S.; FONSECA, L. M. G.; ARAGÃO, L. E. O. C.; PICOLI, M. C. A.; DUFT, D. G. Identification of gaps in sugarcane plantations using UAV images. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18., 2017, Santos, SP. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2017.

MORI, U.; MENDIBURU, A.; LOZANO, J. A. Distance measures for time series in R: the TSdist package. **The R Journal**, v. 8, p. 451-459, 2016.

MOTOHKA, T.; NASHAHARA, K. N.; OGUMA, H.; TSUCHIDA, S. Applicability of green-red vegetation index for remote sensing of vegetation phenology. **Remote Sensing**, v. 2, n. 10, p. 2369-2387, 2010.

MOURA, Y. M.; GALVÃO, L. S.; HILKER, T.; WU, J.; SALESKA, S.; AMARAL, C. H.; NELSON, B. W.; LOPES, A. P.; WIEDEMAN, K. K.; PROHASKA, N.; OLIVEIRA, R. C.; MACHADO, C. B.; ARAGÃO, L. E. O. C. Spectral analysis of amazon canopy phenology during the dry season using a tower hyperspectral camera and modis observations. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 131, p. 52-64, 2017.

MOURA, Y. M.; GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. R.; ROBERTS, D. A.; BREUNIG, F. M. Use of MISR/Terra data to study intra- and inter-annual EVI variations in the dry season of tropical forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 127, n. 11, p. 260-270, 2012.

MOURA, Y. M. **Using multi-angle MODIS data to observe vegetation dynamics in the amazon forest**. 85p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

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, n. 12, p. 4820–4823, 2007.

NAGAI, S.; SAIGUSSA, N.; MURAOKA, H.; NASHAHARA, K. N. What makes the satellite-based EVI-GPP relationship nuclear in a deciduous broad-leaved forest? **Ecological Research**, v. 25, p. 359-365, 2010.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **MODIS web**. Disponível em: <<https://modis.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: jan. 2018.

PETRI, C. A.; SOARES, J. A. H.; PESTANA, L. F. A. Utilização de imagens aéreas obtidas por VANT para aplicação de índices de vegetação em uma área de Cerrado. In: CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE DE POÇOS DE CALDAS, 14., 2017, Poços de Caldas, MG. **Anais...** Poços de Caldas: IF Sul de Minas, 2017.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 176p.

PRANCE, G. T. The origin and evolution of Amazon flora. **Interciencia**, v. 3, n. 4, p. 207-222, 1978.

RANSON, K. J.; DAUGHTRY, C. S. T.; BIEHL, L. L.; BAUER, M. E. Sun-view angle effects on reflectance factors of corn canopies. **Remote Sensing of Environment**, v. 18, n. 2, p. 147–161, 1985.

RATHCKE, B.; LACEY, E. P. Phenological patterns of terrestrial plants. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 16, n. 1, p. 179-214, 1985.

RIZZI, R.; RISSO, J.; EPIPHANIO, R. D. V.; RUDORFF, B. R. T.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; FERNANDES, S. L. Estimativa da área de soja no Mato Grosso por meio de imagens MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal, RN. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009.

ROBERTS, D. A.; DENNISON, P. E.; PETERSON, S.; SWEENEY, S.; RECHEL, J. Evaluation of AVIRIS and MODIS measures of live fuel moisture and fuel condition in a shrubland ecosystem in southern California. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n. G4, 2006.

RODRÍGUEZ-MORENO, V. M.; BULLOCK, S. H. Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el Desierto Sonorense. **Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas**, v. 4, n. 4, p. 611-623, 2013.

ROSENDO, J. S.; ROSA, R. A utilização de sensores de resolução moderada (MODIS) no estudo da vegetação na bacia do Rio Araguari - MG. **Sociedade e Natureza**, v. 17, n. 33, p. 91-104, 2005.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: ERTS SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington DC. **Proceedings...** Washington: NASA, 1973. p. 309–317.

SALESKA, S. R.; DA ROCHA, H. R.; HUETE, A. R.; NOBRE, A. D.; ARTAXO, P.; SHIMABUKURO, Y. E. **LBA-ECO CD-32 Flux tower network data compilation, Brazilian Amazon: 1999-2006**. Base de dados. Disponível em: <<http://daac.ornl.gov>>. Acesso em: out. 2018.

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

SAWYER, D. Fluxos de carbono na Amazônia e no Cerrado: um olhar socioecossistêmico. **Sociedade e Estado**, v. 24, n. 1, p. 149-171, 2009.

SCHAAF, C. B.; GAO, F.; STRAHLER, A. H.; LUCHT, W.; LI, X.; TSANG, T.; STRUGNELL, N. C.; ZHANG, X.; JIN, Y.; MULLER, J. P.; LEWIS, P.; BARNESLEY, M.; HOBSON, P.; DISNEY, M.; ROBERTS, G.; DUNDERDALE, M.; DOLL, C.; D'ENTREMONT, R. P.; HUG, B.; LIANG, S.; PRIVETTE, J. L.; ROY, D. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1, p. 135-148, 2002.

SCHWER, L. E. Validation metrics for response histories: perspectives and case studies. **Engineering with Computers**, v. 23, n. 4, p. 295–309, 2007.

SHIBAYAMA, M.; WIEGAND, C. L. View azimuth and zenith, and solar angle effects on wheat canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 18, p. 91-103, 1085.

SILVA, G. B. S.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; ADAMI, M.; SANO, E. E. Discriminação da cobertura vegetal do Cerrado matogrossense por meio de imagens MODIS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 2, p. 186-194, 2011.

SIMS, D. A.; RAHMAN, A. F.; VERMONTE, E. F.; JIANG, Z. Seasonal and inter-annual variation in view angle effects on MODIS vegetation indices at three forest sites. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 1, p. 3112–3120, 2011.

SOUSA, C. H. R.; HILKER, T.; WARING, R.; MOURA, Y. M.; LYAPUSTIN, A. I. Progress in remote sensing of photosynthetic activity over the amazon basin. **Remote Sensing**, v. 9, n. 48, 2017.

THENKABAIL, P. S.; LYON, J. G. HUETE, A. **Hyperspectral remote sensing of vegetation**. Boca Raton: CRC Press, 2016. 782p.

VERMONTE, E. F.; KOTCHENOVA, S. Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, D23S90, 2008.

WALTER, H. **Vegetação e zonas climáticas**. São Paulo: E.P.U., 1986. 325p.

WANG, Z.; CHUANG, L.; HUETE, A. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: advances in vegetation index research. **Acta Ecologica Sinica**, v. 23, n. 5, p. 979-987, 2003.

WOLD, S.; Esbensen, K.; Geladi, P. Principal component analysis, **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 2, n. 1-3, p. 37-52, 1987

WU, J.; ALBERT, L. P.; LOPES, A. P.; RESTREPO-COUBE, N.; HAYEK, M.; WIEDEMANN, K. T.; GUAN, K.; STARK, S. C.; CHRISTOFFERSEN, B.; PROHASKA, N.; TAVARES, J. V.; MAROSTICA, S.; KOBAYASHI, H.; FERREIRA, M. L.; CAMPOS, K. S.; SILVA, R.; BRANDO, P. M.; DYE, D. G.; HUXMAN, T. E.; HUETE, A. R.; NELSON, B. W.; SALESKA, S. R. Leaf development and demography explain photosynthetic seasonality in Amazon evergreen forests. **Science**, v. 351, n. 6276, 2016.

XU, L.; SAMANTA, A.; COSTA, M. H.; GANGULY, S.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 7, 2011.

YANG, Z.; WILLIS, P.; MUELLER, R. Impact of band-ratio enhanced AWIFS image to crop classification accuracy. In: PECORA THE FUTURE OF LAND IMAGING, 2008, Denver. **Proceedings...** Maryland: ASPRS, 2008.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B. Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 111, n. G4, 2006.