



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/04.06.14.35-TDI

SAZONALIDADE DA FOTOSSÍNTESE ESTIMADA A PARTIR DE DADOS DE FLUORESCÊNCIA DE CLOROFILA NA AMAZÔNIA

Gabriel Bertani

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Liana Oighenstein Anderson, e Fabien Hubert Wagner, aprovada em 20 de abril de 2018.

URL do documento original:

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

INPE
São José dos Campos
2018

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

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

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

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

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

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

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

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

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

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 Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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

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



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/04.06.14.35-TDI

SAZONALIDADE DA FOTOSSÍNTESE ESTIMADA A PARTIR DE DADOS DE FLUORESCÊNCIA DE CLOROFILA NA AMAZÔNIA

Gabriel Bertani

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Liana Oighenstein Anderson, e Fabien Hubert Wagner, aprovada em 20 de abril de 2018.

URL do documento original:

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

INPE
São José dos Campos
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Bertani, Gabriel.

B461s Sazonalidade da fotossíntese estimada a partir de dados de fluorescência de clorofila na Amazônia / Gabriel Bertani. – São José dos Campos : INPE, 2018.

xviii + 95 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/04.06.14.35-TDI)

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

Orientadores : Drs. Liana Oighenstein Anderson, e Fabien Hubert Wagner.

1. Fluorescência de clorofila. 2. Sensoriamento Remoto.
3. Fotossíntese. 4. GOME-2. I.Título.

CDU 528.8:577.355(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/).

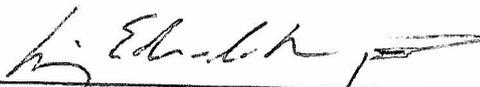
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Gabriel Bertani**
Título: "SAZONALIDADE DA FOTOSSÍNTESE ESTIMADA A PARTIR DE DADOS DE FLUORESCÊNCIA DE CLOROFILA NA AMAZONIA".

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

Sensoriamento Remoto

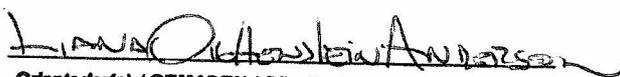
Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de
Aragão



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Dra. Liana Oigheinstein Anderson



Orientador(a) / CEMADEN / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Dr. Fabien Hubert Wagner



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

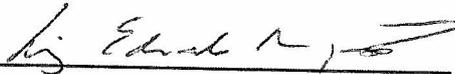
Dr. Edgard Alves Bontempo e Silva



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Dr. Fábio Marcelo Breunig



Convidado(a) / UFSM / Sta Maria - RS

Participação por Vídeo - Conferência

Dr. Fabrício Brito Silva



Convidado(a) / UNICEUMA / São Luís - MA

() Participação por Vídeo - Conferência

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 20 de abril de 2018

AGRADECIMENTOS

A toda minha família.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela oportunidade recebida em cursar o Mestrado e o Doutorado em Sensoriamento Remoto.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), campus Frederico Westphalen, pela oportunidade de realizar o curso de Graduação em Engenharia Florestal.

Aos meu Orientadores Dra. Liana Oighenstein Anderson, Dr. Fabien Hubert Wagner, Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão, pelo apoio, incentivo e por todas as orientações.

Aos meus Ex-Orientadores Dr. Antônio Roberto Formaggio, Dr. Roosevelt de Lara Santos Junior e Dr. Renato Beppler Spohr, por tudo que me ensinaram.

Aos amigos do INPE, Bruno Schultz, Bruno Oliveira, Fabio Marcelo Breunig, Gabriel de Oliveira, Guilherme A. V. Mataveli, Paula Resende, Sulimar M. C. Nogueira e Thiago Frank.

Aos amigos de F. Westphalen, Renato, Daniel, Matheus, Lucas, Sandra, Paulinho, Victório e Victório Jr.

A todos os funcionários do Departamento de Sensoriamento Remoto (DSR) do INPE, que colaboraram para a realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

RESUMO

A Amazônia é a maior floresta tropical do mundo, e desempenha um papel fundamental no ciclo global de carbono. Assim, a compreensão da influência do clima sobre a atividade fotossintética nesta região é de extrema importância. O estabelecimento da relação entre a atividade fotossintética e o clima tem sido controverso quando se baseia em índices convencionais derivados de sensoriamento remoto, como o *Enhanced Vegetation Index* (EVI) e o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Nesta pesquisa determinou-se a sazonalidade de uma série temporal (2007-2015) de dados de fluorescência de clorofila (ChlF) - obtida do sensor *Global Ozone Monitoring Experiment* (GOME-2), através do algoritmo *Breaks in Additive Season and Trend* (BFAST) (VERBESSELT et al., 2010). A ChlF foi utilizada como um indicador da fotossíntese, para avaliar a resposta sazonal da atividade fotossintética em relação à radiação solar e à precipitação na Amazônia. Nesse sentido, um Modelo Linear de Regressão Múltipla (MLRM) foi elaborado para estabelecer as relações entre a sazonalidade da fotossíntese e as variáveis climáticas de radiação incidente e precipitação. A modelagem da sazonalidade da fotossíntese indicada pela ChlF utilizou como preditores a) dados de precipitação derivados de sensoriamento remoto, obtidos da *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) (HUFFMAN et al., 2007), e b) dados de radiação de ondas curtas incidentes sobre a superfície derivados de reanálise, obtidos do *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS) (RODELL et al., 2004). A sazonalidade da fotossíntese é controlada pelas variáveis climáticas na maior parte da Amazônia, especialmente pelo aumento da radiação (76% da área total) e da precipitação (23% da área total). O crescimento da fotossíntese tende a ocorrer com pelo menos um mês de atraso em relação ao aumento da radiação incidente (61% da área total). Além disso, a sazonalidade da fotossíntese atinge seu valor máximo predominantemente durante a estação úmida (58% da área total). Identificou-se um limiar de ≈ 2000 mm por ano como um limite para a dependência fenológica das plantas em relação à precipitação. Os resultados obtidos por essa pesquisa revelam que as florestas da Amazônia cuja sazonalidade da fotossíntese é controlada pelo aumento da precipitação podem ser mais ameaçadas pelas mudanças climáticas previstas.

Palavras-chave: Fluorescência de clorofila. Sensoriamento remoto. Fotossíntese. GOME-2.

PHOTOSYNTHESIS SEASONALITY ESTIMATED FROM CHLOROPHYLL FLUORESCENCE DATA FOR THE AMAZON FOREST

ABSTRACT

Amazonia is the world largest tropical forest, playing a key role in the global carbon cycle. Thus, understanding climate controls of photosynthetic activity in this region is critical. The establishment of the relationship between photosynthetic activity and climate has been controversial when based on conventional remote sensing-derived indices, such as the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Here, the seasonality of a temporal series (2007-2015) of solar-induced chlorophyll fluorescence (ChlF) data from the Global Ozone Monitoring Experiment (GOME-2) sensor was obtained by using the Breaks in Additive Season and Trend (BFAST) algorithm (VERBESSELT et al., 2010). ChlF was used as a direct proxy for photosynthesis, to assess the seasonal response of photosynthetic activity to solar radiation and precipitation in Amazonia. The relationship between photosynthesis seasonality and incident radiation and precipitation was obtained by using a Multiple Linear Regression Model (MLRM). Photosynthesis was modelled by using as predictors: a) remote sensing based precipitation data, derived from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (HUFFMAN et al., 2007), and b) surface incident shortwave radiation reanalysis data, derived from the Global Land Data Assimilation System (GLDAS) (RODELL et al., 2004). Photosynthesis seasonality in Amazonia is predominately controlled by insolation increase (76% of the total area) and precipitation increase (13% of the total area). Photosynthesis tends to rise only after radiation increases in 61% of the forests. Furthermore, photosynthesis peaks in the wet season in about 58% of the Amazon forest. We found that a threshold of ≈ 2000 mm per year can be defined as a limit for precipitation phenological dependence. Amazonian forests that have the photosynthetic seasonality controlled by precipitation increases may be more threatened by the projected climatic changes.

Keywords: Chlorophyll fluorescence. Remote sensing. Photosynthesis. GOME-2.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1. Reflectância de uma folha verde e sadia no intervalo entre 400 e 2600 nanômetros (nm).	11
Figura 2.2 – Reflectância real (curva preta) e Reflectância aparente (curva vermelha) de uma folha verde e sadia.	16
Figura 2.3. Radiação incidente sobre a superfície nas bandas de absorção de hidrogênio e oxigênio.	17
Figura 2.4. Obtenção da fluorescência de clorofila (ChlF) a partir do método <i>Fraunhofer Line Depth</i> (FLD).	19
Figura 3.1 - Área de estudo.....	36
Figura 3.2 - Precipitação Média Anual (PMA).	38
Figura 3.3 - Comprimento das estações secas.	39
Figura 3.4 – Períodos onde a Precipitação Média Mensal (PMM) é mínima (a) ou máxima (b).	40
Figura 3.5 Radiação Média Anual de ondas curtas incidente sobre a superfície (RMA) na área de estudo.	41
Figura 3.6 – Períodos onde a Radiação Média Mensal de ondas curtas incidente sobre a superfície (RMM) é mínima (a) ou máxima (b)..	42
Figura 3.7 – Tipos de solos que ocorrem na área de estudo.	43
Figura 4.1. Fluxograma metodológico.	47
Figura 4.2. Componentes geradas pela aplicação do BFAST em um pixel da série temporal de fluorescência de clorofila (ChlF).	49
Figura 4.3 - Tipos de vegetação dominantes que ocorrem na área de estudo.	50
Figura 4.4. Proporção da cobertura florestal (apenas os valores superiores a 70%) na área de estudo.	52
Figura 5.1 – Ordem crescente dos valores de sazonalidade da fluorescência de clorofila - S(ChlF) na área de estudo.....	58
Figura 5.2 – Variação média anual da sazonalidade da fluorescência de clorofila – S(ChlF).....	59

Figura 5.3 - Padrões espaciais dos preditores da sazonalidade da fluorescência de clorofila - S(ChlF).	61
Figura 5.4 – Sazonalidade da fluorescência de clorofila - S(ChlF) (A,B), Precipitação Média Mensal (PMM) (C, D) e Radiação Média Mensal de ondas curtas incidente sobre a superfície (RMM) (E, F) dos pixels que compõem as áreas 1 e 2 indicadas na Figura 5.3.....	62
Figura 5.5 - Melhor desempenho do modelo aplicando um, dois, três ou nenhum mês de atraso na radiação.	64
Figura 5.6 - Frequências acumuladas da Precipitação Média Anual (PMA) nas áreas onde a sazonalidade da ChlF – S(ChlF) é associada à precipitação ou à radiação.	65
Figura 5.7 - (a) Último mês da estação seca extraído da Precipitação Média Mensal de (PMM). (b) Meses onde a sazonalidade da fluorescência da clorofila – S(ChlF) é máxima.	66
Figura 5.8 – Picos máximos de sazonalidade da fluorescência de clorofila S(ChlF) e sua relação com as estações secas e úmidas.	67
Figura 5.9 – Média anual de observações do sensor Global Ozone Monitoring Experiment–2 (GOME-2) na área de estudo.....	68
Figura 5.10 – Média mensal de observações do sensor Global Ozone Monitoring Experiment–2 (GOME-2) na área de estudo.	69

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 2.1 - Principais características dos sensores utilizados na obtenção da fluorescência de clorofila (ChlF).....	24
---	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ChIF	Fluorescência da Clorofila
ChIF _{vd}	Fluorescência da Clorofila na faixa espectral do Vermelho Distante
ChIF _v	Fluorescência da Clorofila na faixa espectral do Vermelho
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
FLD	<i>Fraunhofer Line Depth</i>
FDRB	Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional
IAF	Índice de Área Foliar
PMA	Precipitação Média Anual
PLB	Produtividade Líquida do Bioma
PPL	Produtividade Primária Líquida
PMM	Precipitação Média Mensal
REM	Radiação Eletromagnética
RFA	Radiação Fotossinteticamente Ativa
RFAA	Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida
RMM	Radiação Incidente Média Mensal
S(ChIF)	Sazonalidade da Fluorescência da Clorofila
SIF	<i>Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	6
1.2. Objetivo Geral.....	7
1.3. Objetivos Específicos.....	7
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1. Interação da radiação incidente com a planta.....	9
2.2. Fluorescência de Clorofila (ChlF).....	12
2.2.1. Métodos de obtenção da ChlF	13
2.2.2. Satélites e sensores utilizados para a obtenção da fluorescência da clorofila (ChlF)	21
2.2.2.1. Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2).....	22
2.2.2.2. TANSO-FTS.....	22
2.2.2.3. OCO-2.....	23
2.2.2.4. SCIAMACHY e TROPOMI	23
2.3. Eventos de seca e seus efeitos sobre a produtividade das florestas na região amazônica	25
2.4. Sazonalidade da fotossíntese e da estrutura de dosséis e sub-bosques na Amazônia	30
3 ÁREA DE ESTUDO	36
3.1. Gradientes vegetacionais	36
3.2. Gradientes de Precipitação Média Anual (PMA).....	37
3.3. Gradientes de Radiação Média Anual de ondas curtas incidente sobre a superfície (RMA)	40
3.4. Solos	42
3.5. Padrões de produtividade	43
4 MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1. Dados de Fluorescência de Clorofila	47
4.2. Máscara de floresta	49

4.3.	Dados Climáticos	50
4.4.	Preparação dos dados	51
4.5.	Aplicação do modelo.....	53
5	RESULTADOS.....	57
5.1.	Caracterização espaço-temporal da sazonalidade da fluorescência da clorofila - S(ChIF)	57
5.2.	Taxas de variação da sazonalidade da fluorescência de clorofila S – (ChIF)	58
5.3.	Relação entre as variáveis climáticas (precipitação ou radiação) e a sazonalidade da fluorescência de clorofila – S(ChIF).....	59
5.4.	Caracterização do regime de Precipitação Média Anual (PMA) das áreas cuja sazonalidade da fluorescência de clorofila - S(ChIF) é associada com a radiação ou com a água	64
5.5.	Picos máximos de sazonalidade da fluorescência da fotossíntese - S(ChIF) na Amazônia	66
5.6.	Média anual de observações do sensor Global Ozone Monitoring Experiment–2 (GOME-2).....	68
6	DISCUSSÕES	70
6.1.	Sazonalidade da fotossíntese na Amazônia	70
6.2.	Relação entre a fotossíntese e as variáveis climáticas de precipitação e radiação	70
6.3.	Associação entre os fatores climáticos que influenciam a sazonalidade da fotossíntese e o gradiente espacial da precipitação média anual .	74
6.4.	Período em que ocorre a máxima atividade fotossintética na Amazônia .	75
6.5.	Incertezas relacionadas com a fluorescência de clorofila (ChIF) obtida a partir do sensor GOME-2	78
7	CONCLUSÕES.....	81
8	RECOMENDAÇÕES	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

1 INTRODUÇÃO

Pequenas mudanças induzidas pelo clima no funcionamento do ecossistema amazônico podem promover perturbações significativas no ciclo global do carbono (COX et al., 2000; COX et al., 2004; NOBRE et al., 1991; SITCH et al., 2008). O entendimento da relação entre o clima e a vegetação na Amazônia é importante, pois a vulnerabilidade das florestas amazônicas às mudanças climáticas depende das respostas fisiológicas das plantas a essas variações. Além disso, esse ecossistema tem sido impactado pelas mudanças climáticas globais (MARENGO et al., 2011; JIMENEZ-MUNOZ, 2016). Malhi e Wright (2004) observaram que todas as regiões tropicais apresentaram uma forte tendência de aquecimento a partir de meados da década de 1970, a uma taxa de $0.26 \pm 0.05^{\circ}\text{C}$ por década. Isso ocorreu em sincronia com o aumento global da temperatura, que tem sido atribuído ao efeito estufa potencializado pela ação antrópica (MALHI; WRIGHT, 2004). Na Amazônia, por exemplo, foi observado um aumento recorde de temperaturas durante o *El Niño* de 2015/2016 (JIMENEZ-MUNOZ, 2016).

Espera-se também que a temperatura continue a aumentar na região concomitantemente com a diminuição da precipitação (HARRIS et al., 2008; SOLOMON et al., 2009; SPRACKLEN et al., 2012). Feng et al. (2013) observaram que a variabilidade interanual da precipitação aumentou em muitas partes dos trópicos, o que pode estar associado à *El Niño-Oscilação Sul* (ENOS). Ainda, os modelos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) têm previsto o aumento de eventos climáticos extremos (FIELD et al., 2012; ORLOWSKY e SENEVIRATNE, 2012).

Em 2005 e 2010 foram observadas secas intensas na Amazônia, influenciadas pelas altas temperaturas da superfície (TS) do oceano Atlântico, embora a estação chuvosa de 2010 tenha sido afetada também pelo *El Niño* (MARENGO et al., 2011). Foi observado também um aumento no número consecutivo de meses secos a partir dos anos 90 no sul da Amazônia, que foi ainda maior entre 2005 e 2010 (MARENGO et

al., 2011). Porém, Gloor et al. (2013) observaram uma tendência de crescimento a longo prazo da precipitação na Amazônia entre 1990 e 2010, o que coincidiu com uma tendência de aumento na TS do atlântico no mesmo período. Isso contrasta com as respostas negativas a curto prazo da precipitação na Amazônia em relação às anomalias positivas da TS do atlântico norte (GLOOR et al., 2013; MARENGO et al., 2011). Já a região sul da Amazônia apresentou uma tendência negativa de precipitação entre 1990 e 2010 (GLOOR et al., 2013).

Além desses eventos de seca associados com o aumento da temperatura da superfície do oceano Atlântico, houveram eventos de seca na Amazônia associados com os eventos de *El Niño* de 1982/83, 1997/1998 e 2015/16 (JIMENEZ-MUNOZ, 2016). Observou-se uma maior mortalidade de árvores (ANDERSON et al., 2005; BRIENEN et al., 2015; FELDPAUSCH et al., 2016; PHILLIPS et al., 2009) e diminuição da atividade fotossintética da vegetação durante os eventos de seca na Amazônia (DOUGHTY et al., 2015; GATTI et al., 2000).

A precipitação na Amazônia também pode diminuir devido ao desflorestamento (ARAGÃO, 2012; SPRACKLEN et al., 2012). Isso pode ocorrer porque a evapotranspiração diminui em áreas sem cobertura florestal (SPRACKLEN et al., 2012). Spracklen et al. (2012) preveem uma redução de cerca de 12% da precipitação durante as estações úmidas e 21% de redução da precipitação durante as estações secas na bacia amazônica, caso os índices de desflorestamento registrados entre 1997 e 2002 se mantenham na mesma taxa até 2050. Sampaio et al. (2007) demonstraram ainda que a remoção de cerca de 40% da cobertura florestal na Amazônia pode tornar essa região mais seca, de forma irreversível. As tendências negativas de precipitação observadas no sul da Amazônia, entre 1990 e 2010, também podem estar relacionadas ao desflorestamento (GLOOR et al., 2013).

O principal processo que liga o sistema climático à biosfera é a fotossíntese (DE SOUSA et al., 2017). Dessa forma, quantificar a fotossíntese em toda a Amazônia, a maior floresta tropical do mundo com

uma área de cerca de 5,3 milhões de km² (STEEGE et al., 2013), é de fundamental importância para compreender o ciclo global do carbono. Este bioma contribui com até 14% de todo o carbono fixado pela fotossíntese na biosfera terrestre (ZHAO; RUNNING, 2010) e 17% do estoque de carbono total da vegetação da Terra (CAO e WOODWARD, 1998). No entanto, as formulações atuais de Modelos do Sistema Terrestre - *Earth System Models* (ESM) não conseguem capturar corretamente a direção das mudanças sazonais da fotossíntese na Amazônia, conforme observado por dados de torres de fluxo (RESTREPO-COUBE et al., 2013; WU et al., 2016), que mostram, contrariamente aos modelos, um aumento constante da fotossíntese no início da estação seca.

As informações de sensoriamento remoto derivadas do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e associadas ao Índice de Vegetação Melhorado - *Enhanced Vegetation Index* (EVI), que se correlacionam com o conteúdo de clorofila e a atividade fotossintética da vegetação (HUETE et al., 2002; HUETE et al., 2006), apresentam um padrão coerente com as mudanças sazonais nas medidas de fotossíntese derivadas de torres de fluxo e fenologia de dosséis (BI et al., 2015; BRANDO et al., 2015; HUETE et al., 2006; LOPES et al., 2016; MYNENI et al., 2007; SALESKA et al., 2007; WAGNER et al., 2017)

Análises com o uso do EVI mostraram que a sazonalidade da fotossíntese na Amazônia é fortemente ligada a oscilações temporais de radiação e precipitação (GUAN et al., 2015; HILKER et al., 2014; JONES et al., 2014; WAGNER et al., 2016; WAGNER et al., 2017). Mais especificamente, as observações por satélite demonstram que a atividade fotossintética tende a aumentar com a elevação da radiação durante a estação seca em parte da Amazônia, processo conhecido como verdejamento ou “*green-up*” (BI et al., 2015; BRANDO et al., 2015; GUAN et al., 2015; HUETE et al., 2006; JONES et al., 2014; LOPES et al., 2016; MYNENI et al., 2007; SALESKA et al., 2007; SALESKA et al., 2016; WAGNER et al., 2016; WAGNER et al., 2017). Esse processo pode ser explicado pelo surgimento de folhas novas devido ao aumento da disponibilidade de

radiação durante a estação seca (BI et al., 2015; LOPES et al., 2016; MOURA et al., 2017; WU et al., 2016), já que as folhas novas mostraram-se mais eficientes do que as folhas senescentes para realizar a fotossíntese (BRYANT et al., 2016; WU et al., 2016). Esse processo ocorre onde as florestas não são limitadas pela precipitação, pois a demanda da vegetação por água nessas áreas pode ser suprida durante a estação seca pela redistribuição da água subsuperficial acumulada durante a estação úmida (GUAN et al., 2015). No entanto, a fotossíntese tende a entrar em declínio durante a estação seca no sul da Amazônia, onde a disponibilidade de água pode restringir o desenvolvimento foliar da vegetação (GUAN et al., 2015; JONES et al., 2014).

Embora o EVI seja amplamente utilizado como um indicador da capacidade fotossintética da vegetação na Amazônia (BI et al., 2015; GUAN et al., 2015; SALESKA et al., 2016; WAGNER et al., 2017), a interpretação biofísica deste índice tem sido controversa (MAEDA et al., 2016). Estudos anteriores também questionaram o verdejamento observado na Amazônia, sugerindo que isso possa estar relacionado a artefatos nos dados EVI (GALVÃO et al., 2011; MORTON et al., 2014) ou alterações na estrutura florestal (ANDERSON et al., 2010). Além disso, os dados EVI usualmente são contaminados por nuvens e ruídos radiométricos (LYAPUSTIN et al., 2012). No entanto, o uso recente de produtos MODIS, com correção de artefatos atmosféricos e radiométricos (LYAPUSTIN et al., 2012), fornece evidências consistentes sobre a influência das variáveis climáticas sobre a fenologia e a sazonalidade da fotossíntese (GUAN et al., 2015; HILKER et al., 2014; JONES et al., 2014; WAGNER et al., 2016; WAGNER et al., 2017). Os dados de sensoriamento remoto, portanto, fornecem observações importantes acerca dos padrões da vegetação e podem ser usados para analisar as interações entre floresta e clima na Amazônia.

Recentemente, um conjunto de dados baseados na fluorescência da clorofila (ChlF), observada através de sensores a bordo de satélites, tem sido disponibilizado (JOINER et al., 2013). A ChlF é a porção de radiação nos comprimentos de onda entre 650 nm e 800 nm que é reemitida pelas

plantas após a absorção de energia, e pode ser observada por sensoriamento remoto passivo (AMOROS-LOPEZ et al., 2008; DU et al., 2017; JOINER et al., 2012; JOINER et al., 2013; JOINER et al., 2016; KÖHLER et al., 2015; LIU et al., 2015; MERONI et al., 2009; NI et al., 2016). Ao contrário dos índices de vegetação, que são estimativas indiretas do estado das plantas, a ChIF consiste em uma variável mensurável e dimensional (MAXWELL; JOHNSON, 2000), e fornece uma medida mais direta da atividade fotossintética (FRANKENBERG et al., 2011; JOINER et al., 2011; MERONI et al., 2009). A ChIF observada através de sensores a bordo de satélites tem sido utilizada para a análise da fotossíntese na Amazônia (GUAN et al., 2015; JOINER et al., 2011; JOINER et al., 2014; LEE et al., 2013; MADANI et al., 2017; PARAZOO et al., 2013; PARAZOO et al., 2014).

As taxas de fluorescência da clorofila (ChIF) variam dependendo da hora do dia em que são mensuradas e de efeitos direcionais (AMOROS-LOPEZ et al., 2008). A ChIF obtida a partir do GOME-2, por exemplo, parece ser significativamente menos afetada pelas alterações nas geometrias de iluminação e aquisição, se comparada com a refletância no infravermelho próximo e com o NDVI (KÖHLER et al., 2017). A orientação das folhas, o ângulo de incidência da luz e a absorção em nível de dossel também afetam a mensuração da ChIF (WITTENBERGHE et al., 2015). A dissipação não-fotoquímica é outro processo que afeta diretamente a produção de ChIF - as plantas aumentam a dissipação não-fotoquímica e diminuem a fotossíntese e a emissão de fluorescência quando expostas a estresse hídrico ou temperaturas desfavoráveis (FLEXAS et al., 2002).

A atividade fotossintética na Amazônia tem sido analisada através da ChIF obtida pelos sensores GOME-2 (GUAN et al., 2015; JOINER et al., 2014; MADANI et al., 2017) – a bordo do Meteorological Operational satellite programme (METOP-A) e *Thermal and Near Infrared Sensor for Carbon Observation Fourier-Transform Spectrometer* (TANSO-FTS) - a bordo do *Japanese Greenhouse Gases Observing Satellite* (GOSAT) (LEE et al., 2013; PARAZOO et al., 2013; PARAZOO et al., 2014). No entanto, a relação entre a sazonalidade da ChIF e as variações de

precipitação e radiação nas florestas da Amazônia ainda não foi totalmente elucidada. Além disso, é importante observar se os aumentos na Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) incidente provocam respostas significativas na sazonalidade da ChIF gerada pelo sensor GOME-2, já que a radiação incidente no horário de passagem do sensor é relativamente baixa (ZHANG et al., 2018).

O principal objetivo deste trabalho foi analisar a dependência da sazonalidade da fotossíntese em relação à precipitação e à radiação na Amazônia, usando como indicador da fotossíntese um conjunto recente de dados de sensoriamento remoto - a fluorescência de clorofila (ChIF) obtida a partir do sensor GOME-2, que é independente dos índices de vegetação comumente usados para estudar a atividade fotossintética. A ChIF foi obtida através de uma série temporal de dados do sensor GOME-2 (JOINER et al., 2013). Já a precipitação foi obtida através de uma série temporal de dados de precipitação derivados da *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) (HUFFMAN et al., 2007). Por fim, a radiação incidente foi obtida a partir de uma série temporal de dados de radiação de ondas curtas incidentes sobre a superfície - derivados do *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS) (RODELL et al., 2004). As séries temporais utilizadas correspondem ao período de 2007 a 2015.

1.1. Objetivos

Este estudo visou responder a quatro perguntas: **(1)** Como é a sazonalidade da fotossíntese na floresta amazônica? **(2)** Qual a relação entre a sazonalidade da fotossíntese e as variáveis climáticas de precipitação e radiação? **(3)** Qual a relação entre o gradiente de precipitação média anual e a fotossíntese? **(4)** Quando, no ciclo anual, ocorre a atividade máxima da fotossíntese?

Para responder a pergunta **(1)**, foi determinado se a sazonalidade da fotossíntese é sincrônica em toda a região, ou seja, se a sazonalidade da fotossíntese varia espacialmente na floresta amazônica.

Para a pergunta **(2)**, foi testada a hipótese nula (H_0) de que as variações de precipitação e radiação incidente não possuem relação com a fotossíntese na floresta amazônica. No caso de rejeição da hipótese nula aceita-se a seguinte hipótese alternativa:

H1: as variações de precipitação e radiação exercem influência sobre a sazonalidade da fotossíntese na floresta amazônica.

Para a pergunta **(3)**, foi testada a hipótese nula (H_0) de que a Precipitação Média Anual (PMA) é igual nas áreas associadas com a precipitação e nas áreas associadas com a radiação. No caso de rejeição da hipótese nula aceita-se a seguinte hipótese alternativa:

H2: há uma diferença significativa entre a PMA das áreas associadas com a precipitação e a PMA das áreas associadas com a radiação.

Para elucidar a pergunta **(4)** foi analisado se a atividade máxima da fotossíntese ocorre predominantemente na estação seca ou na estação úmida na Amazônia.

1.2. **Objetivo Geral**

O objetivo geral deste estudo consiste em determinar como a sazonalidade da fotossíntese se relaciona com as variações sazonais de precipitação e radiação na Amazônia, usando de forma inédita para tal análise dados de ChIF obtidos a partir do sensor GOME-2, entre 2007 e 2015.

1.3. **Objetivos Específicos**

Para atingir o objetivo geral e responder às perguntas propostas, os seguintes Objetivos Específicos (OE) foram considerados:

OE 1: Caracterizar espacialmente a sazonalidade da fotossíntese na floresta amazônica.

OE 2: Determinar as taxas de variação da sazonalidade da fotossíntese.

OE 3: Estabelecer a relação entre as variáveis climáticas (precipitação ou radiação) e a sazonalidade da fotossíntese na floresta amazônica.

OE 4: Caracterizar o regime da Precipitação Média Anual (PMA) das áreas cuja sazonalidade da fotossíntese é possivelmente associada com a radiação incidente ou com a precipitação.

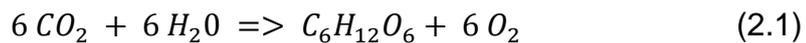
OE 5: Obter um limiar de Precipitação Média Anual (PMA) que possa indicar se a vegetação apresenta limitação por água.

OE 6: Determinar o período em que ocorre a máxima atividade da fotossíntese na Amazônia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Interação da radiação incidente com a planta

Nem toda a radiação incidente, seja ela direta ou difusa, é capaz de provocar uma resposta fotoquímica na planta. A porção do espectro capaz de provocar uma resposta fotoquímica na planta é chamada de Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA). A RFA interage com os diversos fotorreceptores da planta e é responsável por processos como a síntese de clorofila, fotossíntese, fototropismo e germinação de sementes. A fotossíntese tem início a partir da absorção da RFA pelos cloroplastos. Essa energia é utilizada nas reações de carboxilação da fotossíntese, para a produção da glicose e liberação de oxigênio. A equação geral da fotossíntese pode ser descrita pela seguinte fórmula:



Além de ser absorvida pelos pigmentos foliares, e participar de processos como a fotossíntese, a radiação incidente pode ser refletida ou transmitida. A quantidade de radiação que é absorvida, refletida ou transmitida pela folha em um determinado comprimento de onda depende de vários fatores, como as características da planta e fatores ambientais. Porém, as proporções de cada componente seguem o princípio da conservação de energia, de acordo com a segunda lei da termodinâmica, onde:

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \quad (2.2)$$

Onde $\phi_i, \phi_r, \phi_a, \phi_t$ correspondem aos fluxos de energia incidente, refletida, absorvida e transmitida, respectivamente.

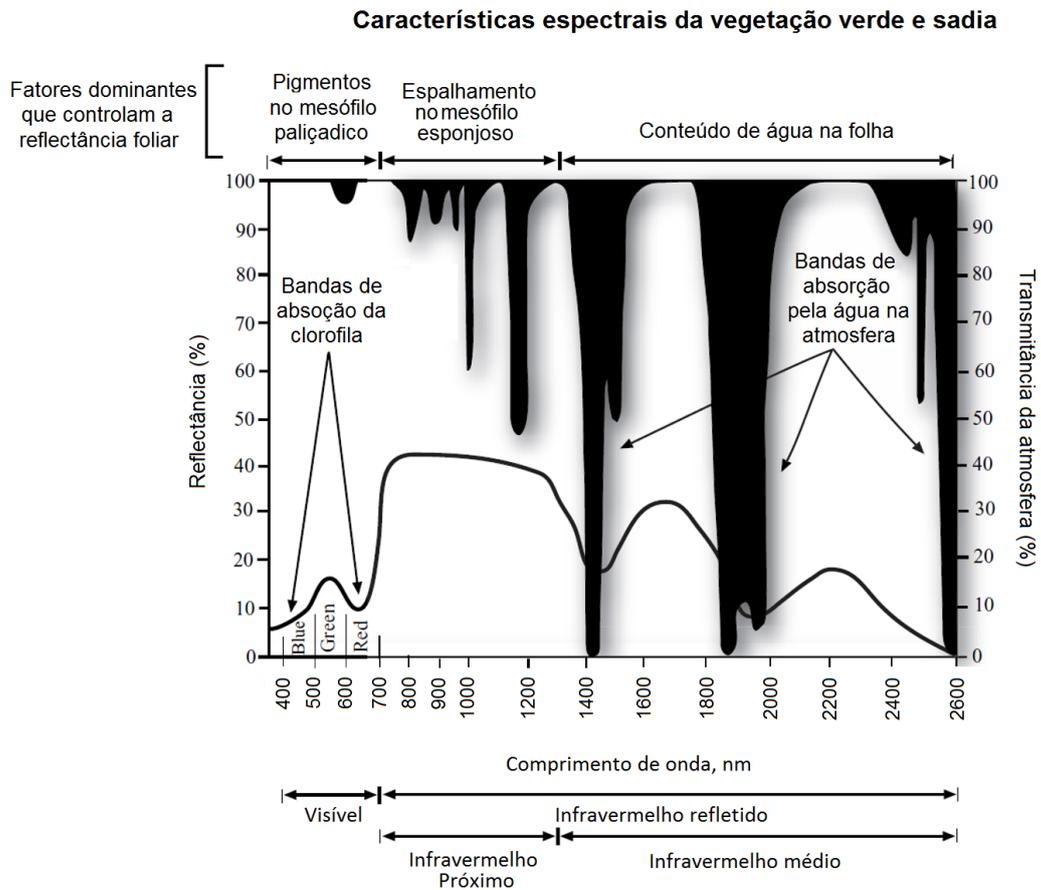
Dividindo-se os termos da equação (2.1) pelo fluxo incidente tem-se:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad (2.3)$$

Onde ρ, α, τ representam a reflectância, absortância e transmitância do alvo, respectivamente. Essas razões adimensionais definem as propriedades radiométricas da vegetação.

Dentre as três componentes resultantes da interação entre a radiação eletromagnética (REM) e a planta, a absorção é a mais importante para explicar a produtividade da vegetação, dos pontos de vista fisiológico e bioquímico (MOREIRA et al., 2007). Porém, os sensores remotos não possuem capacidade para estimar diretamente essa componente, então fazem uso de inferências das quantidades refletidas/emitidas pela vegetação. Gates (1965) citam três principais mecanismos que influenciam a quantidade de REM refletida pelas folhas, que constituem o principal componente da interação entre a radiação e a vegetação: pigmentos, espaços celulares e estrutura celular. Além desses três mecanismos, Gausman (1985) cita outros fatores que afetam a quantidade de energia refletida pelas folhas, como o conteúdo de água, idade da folha, condições de iluminação, entre outros. A curva de reflectância de uma folha sadia, em um intervalo de comprimentos de onda situados entre 400 e 2600 nm, é apresentada na Figura 2.1. Essa figura também mostra a transmitância da atmosfera para cada comprimento de onda nesse intervalo.

Figura 2.1. Reflectância de uma folha verde e sadia no intervalo entre 400 e 2600 nanômetros (nm).



Fonte: Adaptado de Jensen (2005).

A figura 2.1 mostra que os fatores que controlam a reflectância da vegetação variam de acordo com a faixa espectral da radiação incidente:

Visível

Na faixa espectral do visível (comprimentos de onda entre 400 e 700 nm) observa-se uma alta absorção da radiação pela folha. Os comprimentos de onda do azul (entre 400 e 530 nm) e do vermelho (entre 600 e 730 nm) são absorvidos pela planta através dos pigmentos do cloroplasto, principalmente a clorofila *a*. O pico máximo de reflectância ocorre na região do verde (555 nm).

Infravermelho

A região do infravermelho é dividida em três partes: a) infravermelho próximo (comprimentos de onda entre 700 nm a 1300 nm), b) infravermelho médio (comprimentos de onda entre 1300 nm a 2600 nm) e c) infravermelho distante (comprimentos de onda entre 2600 nm a 1 mm) (JENSEN, 2005). A interação da radiação eletromagnética (REM) com a folha na região do infravermelho próximo é influenciada pelas estruturas celulares internas da folha, além da contribuição indireta do conteúdo de água (quanto maior a umidade na folha, menor é a reflectância) (PONZONI et al., 2017). A absorção da radiação no infravermelho próximo pela folha é muito baixa (menos de 15%) e a reflectância pode chegar a 50% (Figura 2.1). Além da alta reflectância, é importante salientar a elevada transmitância que a folha possui nesse comprimento de onda. Assim, em nível de dossel, a radiação na faixa do infravermelho próximo penetra na folha e é refletida novamente pelas camadas de folhas situadas abaixo, o que teoricamente aumenta a reflectância conforme o número de camadas do dossel – processo denominado reflectância aditiva (JENSEN, 2005).

Já na região do infravermelho médio ocorre a queda da energia refletida em razão da quantidade de água líquida presente na folha, pois a radiação nessa faixa do espectro é absorvida consideravelmente pela água. Por fim, no infravermelho distante ou termal ocorre a emissão de radiação eletromagnética (PONZONI et al., 2017). Fatores morfológicos como a densidade de cobertura vegetal, distribuição das folhas e ângulo de inserção foliar também determinam o comportamento espectral da vegetação (JENSEN, 2005).

2.2. Fluorescência de Clorofila (ChIF)

Nem toda a energia absorvida é utilizada pela planta para a fotossíntese (MAXWELL; JOHNSON, 2000). Assim, a energia excedente que não é utilizada para realizar a fotossíntese pode ser dissipada de duas formas: como calor ou reemitida através da fluorescência de clorofila - ChIF) (MAXWELL; JOHNSON, 2000). De forma geral, cerca de 20% da energia

absorvida é dissipada em forma de calor e apenas 1% em forma de ChIF (BAKER et al., 2008).

A fluorescência de clorofila (ChIF) consiste na radiação emitida pela clorofila em comprimentos de onda entre 650nm a 800 nm, logo após a absorção da luz pela folha. Em condições de alta luminosidade a ChIF é correlacionada com a quantidade de Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (RFAA) e a Eficiência no Uso da Luz para a realização da fotossíntese (VAN DER TOL et al., 2009). Quando a RFAA é suficiente para a planta ultrapassar o ponto de compensação (ponto onde a energia produzida pela fotossíntese é maior do que a energia que a planta precisa para a respiração) e quando as reações de fotossíntese se tornam constantes, a ChIF se torna positivamente correlacionada com a fotossíntese (LARCHER et al., 2003).

Como a fluorescência de clorofila (ChIF) é diretamente relacionada com a Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (RFAA) e com a Eficiência de Uso da Luz (PORCAR-CASTELL et al., 2014), e a radiação pode ser um grande modulador da fotossíntese na Amazônia (GUAN et al., 2015), espera-se que haja uma relação positiva entre a ChIF e a radiação nessa região. Além disso, o horário de passagem do sensor GOME-2 (9:30) minimiza a chance de confundir efeitos transientes (diurnos) do clima sobre a ChIF com efeitos persistentes (a longo prazo) (LARCHER et al., 2003). Observações da ChIF ao meio dia, por exemplo, seriam mais difíceis de interpretar devido à queda da ChIF usualmente observada nesse horário, devido ao fato de esse ser o horário mais quente ou um dos horários mais quentes do dia em qualquer estação, o que pode causar stress hídrico na planta (BONTEMPO; SILVA et al., 2014). Assim, espera-se que o aumento sazonal da radiação seja capaz de provocar uma resposta na sazonalidade da ChIF obtida através do sensor GOME-2.

2.2.1. Métodos de obtenção da ChIF

A ChlF tem sido utilizada nas últimas décadas para estudar a atividade fotossintética da vegetação em nível subcelular e foliar (MAXWELL; JOHNSON, 2000; BAKER, 2008). Esses estudos eram restritos a análises realizadas em laboratório, mas passaram a ser aplicados em campo através do desenvolvimento da técnica de Pulsos Modulados por Amplitude - Pulse Amplitude-Modulated (PAM) (SCHREIBER et al., 1986; BOLHÀR-NORDENKAMPF et al., 1989). A aplicação dessa técnica ajudou a elucidar a aclimatização da fotossíntese *in situ* e as relações entre a ChlF e a assimilação de CO₂ através da fotossíntese (PORCAR-CASTELL et al., 2014).

Porém, a técnica de Pulsos Modulados por Amplitude é restrita ao nível foliar da vegetação. Assim, foram desenvolvidas técnicas para mensurar a da fluorescência de clorofila (ChlF) a partir de sensoriamento remoto, para que essa variável pudesse ser analisada nos níveis de dossel e paisagem. A obtenção ChlF a partir do sensoriamento remoto baseia-se na mensuração passiva da ChlF induzida pela radiação solar - *solar-induced chlorophyll fluorescence* (SIF). A SIF consiste apenas na mensuração imediata da ChlF (PORCAR-CASTELL et al., 2014), relacionada com o estado estável da ChlF em ecossistemas não limitados pela radiação, como é o caso da Amazônia. Já as análises em laboratório ou através da técnica de Pulsos Modulados por Amplitude são capazes de mensurar emissões específicas da ChlF além do estado estável, as quais são úteis para estimar parâmetros como a dissipação não fotoquímica e a proporção de centros de reação abertos no Fotossistema II (MAXWELL et al., 2002).

A partir de uma aproximação lambertiana (THOMAS; STAMNES, 2002), a reflectância medida no topo da atmosfera, mais a contribuição da ChlF, podem ser expressas da seguinte forma:

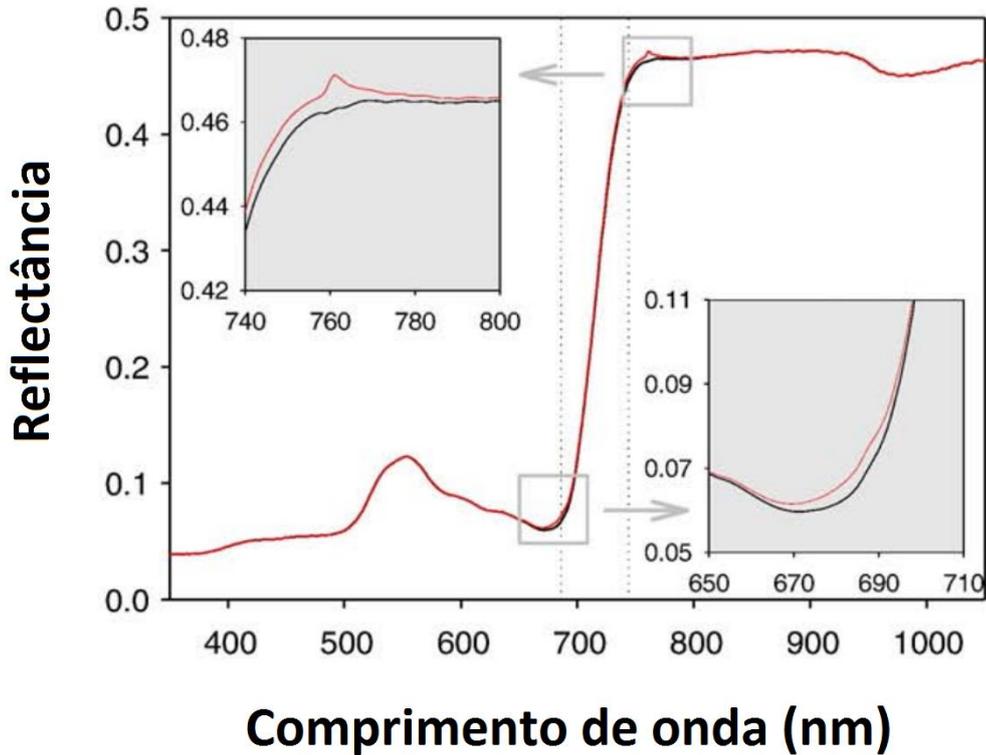
$$\rho_m(\lambda, \theta_v, \theta_s) \approx \rho_o(\lambda) + \frac{\rho_s(\lambda)T(\lambda, \theta_s)\bar{T}(\lambda, \theta_v)}{1 - \rho_s(\lambda)\bar{p}(\lambda)} + \frac{\pi I_F(\lambda)\bar{T}(\lambda, \theta_v)}{[1 - \rho_s(\lambda)\bar{p}(\lambda)]F_s(\lambda)\mu_0(\theta_s)} \quad (2.4)$$

Onde:

$\rho_m(\lambda, \theta_v, \theta_s)$ consiste na reflectância obtida no topo da atmosfera, $\rho_o(\lambda)$ é a reflectância atmosférica – reflectância no caso da superfície ser um corpo negro, $\rho_s(\lambda)$ é a reflectância da superfície, $\bar{\rho}(\lambda)$ é o albedo hemisférico da atmosfera para a iluminação na direção superfície-sensor, $T(\lambda, \theta_s)$ é a transmissão atmosférica ao longo do caminho óptico do topo da atmosfera em direção à superfície no ângulo da radiação solar incidente, $\bar{T}(\lambda, \theta_v)$ é a transmissão atmosférica da superfície em direção sensor. A $F_s(\lambda)$ consiste no espectro de irradiância solar e a $I_F(\lambda)$ é a emissão de fluorescência de clorofila induzida pela radiação. O comprimento de onda é indicado por λ , θ_v consiste no ângulo zenital de visada e θ_s é o ângulo zenital solar.

A reflectância obtida no topo da atmosfera, portanto, também acaba englobando a contribuição da ChIF. A ChIF e o fator de reflectância compõem a reflectância aparente (MERONI et al., 2009), representada na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Reflectância real (curva preta) e Reflectância aparente (curva vermelha) de uma folha verde e sadia.



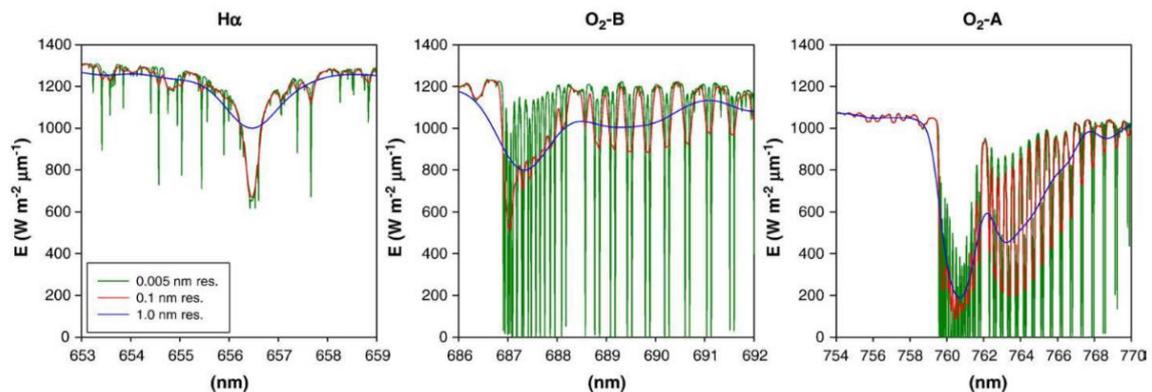
A diferença entre a reflectância real e a reflectância aparente é destacada nas áreas cinza da figura, as quais mostram dois locais onde ocorrem picos na emissão de fluorescência de clorofila (ChlF) (linhas verticais pontilhadas), ou seja, a diferença entre a reflectância real e a reflectância aparente é maior nesses locais.

Fonte: Adaptado de Meroni et al. (2009).

A ChlF contribui apenas com uma pequena parcela do sinal que chega até o sensor - cerca de 1 a 2%, pois esse sinal é composto predominantemente pela radiação refletida pela superfície (MORENO, 2015). Portanto, separar os sinais da ChlF e da radiação refletida tem sido um grande desafio para a comunidade do sensoriamento remoto. As técnicas propostas para estimar a ChlF são baseadas no uso de faixas espectrais da radiação cuja incidência sobre a superfície é diminuída pela absorção telúrica ou por linhas de Fraunhofer (MERONI et al., 2009). Essas faixas espectrais usualmente são chamadas de bandas de absorção. A absorção telúrica ocorre nas bandas O₂ - A (~760 nm) e O₂ - B (~690 nm). Já as linhas de *Fraunhofer* consistem em faixas estreitas de

absorção no espectro solar originadas por elementos presentes na fotosfera, tais como a banda hidrogênio- α (656nm) (FRANKENBERG et al., 2013). A Figura 2.3 mostra a irradiância incidente sobre a superfície nas regiões espectrais das três bandas de absorção citadas.

Figura 2.3. Radiação incidente sobre a superfície nas bandas de absorção de hidrogênio e oxigênio.



A Radiação incidente sobre a superfície foi simulada pelo Matrix-Operator Model (MOMO), em três resoluções espectrais distintas: 0.005 nm, 0.1 nm e 1.0 nm, que correspondem às linhas verde, vermelha e azul, respectivamente. As três bandas de absorção são situadas próximas a 656.4 nm (H α), 687.0 nm (O $_2$ -B) e 760.4 nm (O $_2$ -A).

Fonte: Meroni et al., 2009.

A maioria dos métodos de estimação da fluorescência de clorofila (ChIF) encontrados na literatura derivam do princípio de profundidade de linhas de Fraunhofer - *Fraunhofer Line Depth* (FLD), proposto por Plascyk e Gabriel (1975). Essa abordagem estima a ChIF através da análise do preenchimento das linhas de *Fraunhofer* ou de absorção telúrica pela ChIF.

O *Fraunhofer Line Depth* (FDL) pode ser explicado da seguinte forma:

Como a energia incidente sobre a superfície é atenuada pelas bandas de absorção, a reflectância também sofre atenuação. Já a fluorescência de clorofila (ChIF) emitida pela vegetação, quando estimada na superfície, não é afetada por essas bandas de absorção. Em estimativas realizadas através de sensores espaciais, a partir das bandas de absorção telúricas,

o sinal da ChlF também é sujeito à absorção atmosférica, já que este atravessa atmosfera em direção ao sensor, e isso demanda a modelagem da absorção da ChlF por parte dos componentes atmosféricos (PORCAR-CASTELL et al., 2014). Em resumo, a radiância total que chega até o sensor no espectro das bandas de absorção é “preenchida” pelo sinal emitido da ChlF. O quanto essas bandas de absorção são preenchidas acaba determinando a contribuição da ChlF para a radiância medida pelo sensor.

Assim, o *Fraunhofer Line Depth* (FLD) baseia-se na medição da radiação solar incidente e da radiância do alvo. Para a obtenção da fluorescência de clorofila (ChlF) através dessa abordagem são necessárias quatro medidas: em uma faixa espectral no interior de uma banda de absorção são realizadas uma medida da radiação solar incidente - $E(\lambda_{in})$ e outra da radiância espectral - $L(\lambda_{in})$, e em uma faixa espectral adjacente à banda de absorção são realizadas uma medida da radiação solar incidente - $E(\lambda_{out})$ e outra da radiância espectral - $L(\lambda_{out})$ (Figura 2.4). O FLD assume que as medições no interior e na adjacência das bandas de absorção são suficientemente próximas para que a fluorescência da clorofila (ChlF) e a refletância sejam constantes entre as medidas. As seguintes equações mostram as radiâncias medidas no interior e na adjacência das bandas de absorção:

$$L(\lambda_{in}) = r \times E(\lambda_{in}) + F \quad (2.5)$$

$$L(\lambda_{out}) = r \times E(\lambda_{out}) + F \quad (2.6)$$

Onde:

$L(\lambda_{in})$ = Radiância medida no interior da banda de absorção;

$L(\lambda_{out})$ = Radiância medida na adjacência da banda de absorção;

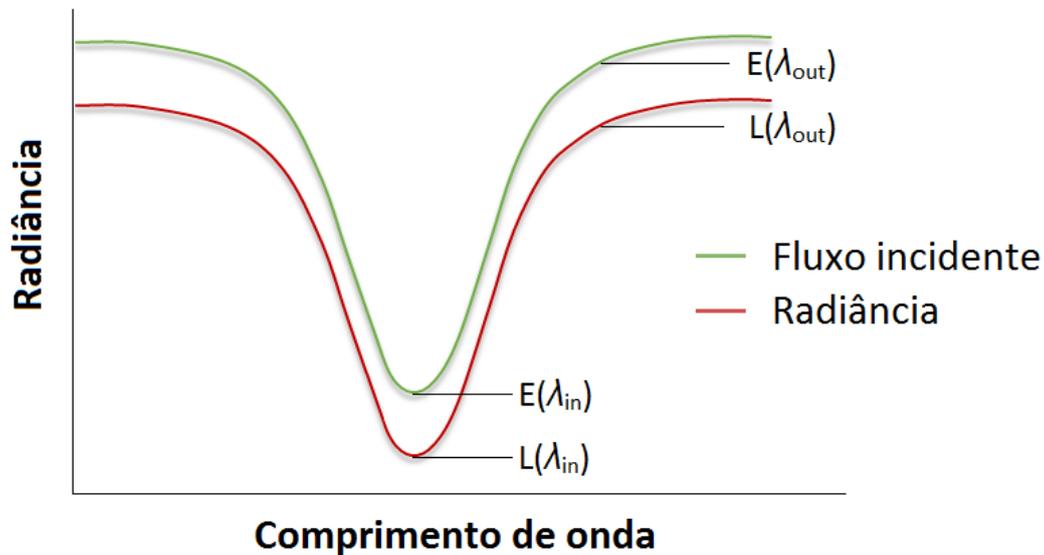
$E(\lambda_{in})$ = Radiância incidente medida no interior da banda de absorção;

$E(\lambda_{out})$ = Radiância incidente medida na adjacência da banda de absorção;

r = refletância do alvo, que é assumida como independente do comprimento de onda;

F = contribuição da fluorescência da clorofila na radiância, também assumida como independente do comprimento de onda;

Figura 2.4. Obtenção da fluorescência de clorofila (ChIF) a partir do método *Fraunhofer Line Depth* (FLD).



Medidas do fluxo de radiação incidente no interior - $E(\lambda_{in})$ - e na adjacência - $E(\lambda_{out})$, e medidas da radiância no interior - $L(\lambda_{in})$ - e na adjacência - $L(\lambda_{out})$ de uma banda de absorção.

Resolvendo-se o sistema das equações 2.5 e 2.6, a reflectância (r) e a ChIF (F) podem ser obtidas. Porém, o pressuposto de que a reflectância e a fluorescência da clorofila (ChIF) são constantes nessa faixa espectral geralmente não é verdadeiro, e isso constitui a grande desvantagem desse método (MERONI et al., 2009). Devido às limitações do *Fraunhofer Line Depth* (FLD), outros métodos derivados do FLD foram propostos para a obtenção da ChIF, como por exemplo o *Spectral Fitting Method* (SFM), que estima a ChIF em uma banda de absorção através de uma abordagem de Mínimos Quadrados (MERONI et al., 2009). O SFM foi elaborado para reduzir os ruídos e a contaminação por efeitos atmosféricos nas estimativas de ChIF, e demonstrou ser capaz de aumentar a precisão nas estimativas de ChIF em comparação com o método FLD simples (MERONI et al., 2009).

As bandas de absorção por O_2 são mais utilizadas para a obtenção da fluorescência da clorofila (ChIF), pois são mais largas e mais profundas em resoluções típicas de um décimo de nanômetro até alguns nanômetros, quando comparadas com a banda $H\alpha$ (solar) (Figura 2.3) (MERONI et al., 2009). Além disso, as bandas de absorção por O_2 são

mais próximas dos picos de emissão da ChlF, posicionados próximos de 690 e 740 nm. As principais desvantagens associadas com as bandas de absorção por O₂ consistem nas mudanças em sua forma e extensão, devido a variações no estado da atmosfera, iluminação e geometria de observação (MERONI et al., 2009). Nas bandas de absorção por O₂ a absorção da ChlF no sentido vegetação-sensor é mais forte conforme a massa de ar que a luz atravessa, sendo inversamente proporcional ao cosseno do ângulo zenital solar (PORCAR-CASTELL et al., 2014).

A fluorescência da clorofila (ChlF) medida através da banda O₂-A, na faixa do vermelho distante (ChlF_{vd}), é mais utilizada do que a ChlF medida através da banda O₂-B, no vermelho (ChlF_v). Isso ocorre porque a intensidade do sinal da ChlF_{vd} é maior, e a faixa espectral de emissão da ChlF_v é próxima ao pico de absorção da radiação pela clorofila, o que faz com que a ChlF_v seja bastante reabsorvida pela vegetação (VAN WITTENBERGHE et al., 2014).

A estimativa da fluorescência da clorofila (ChlF) a partir das bandas de absorção por O₂ ainda pode ser afetada pela Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional (FDRB). Isso ocorre porque as radiações difusa e direta possuem caminhos ópticos diferentes, o que afeta a profundidade dessas bandas de absorção por O₂. A radiação direta percorre um caminho menor do que a radiação difusa e é menos absorvida por O₂, em condições de iluminação próximas ao nadir. Assim, um preenchimento aparente das bandas de absorção por O₂ pode ser causado quando os fatores de reflectância da vegetação para a radiação incidente difusa e direta são diferentes, e isso pode induzir a erros nas estimativas de ChlF (LIU; LIU, 2018).

As interações entre a radiação e a atmosfera fazem com que métodos mais complexos sejam aplicados para separar o sinal da fluorescência da clorofila (ChlF) da radiância total que chega até os sensores satelitais. Joiner et al. (2013), por exemplo, separaram as características espectrais da vegetação em três componentes: absorção atmosférica, reflectância da superfície e ChlF emitida no vermelho distante (ChlF_{vd}). Esses autores

assumiram que os efeitos de espalhamento atmosférico foram desprezíveis, devido ao comprimento de onda da ChIF_{vd} estar na faixa de 736.8 nm. Assim, apenas a absorção molecular atmosférica foi analisada. Esses autores representaram a ChIF_{vd} como uma função gaussiana centrada em 736.8 nm e com 21.2 nm de comprimento. A reflectância foi modelada a partir de uma função polinomial de baixa ordem e a absorção atmosférica foi estimada partir de uma Análise de Componentes Principais.

2.2.2. Satélites e sensores utilizados para a obtenção da fluorescência da clorofila (ChIF)

A obtenção da fluorescência da clorofila (ChIF) por sensoriamento remoto requer a combinação de alta resolução espectral e uma alta razão sinal-ruído, já que as bandas de absorção são estreitas e a ChIF contribui apenas com uma pequena parcela do sinal que chega até o sensor (MORENO, 2015). A principal limitação relacionada com a ChIF obtida por satélite diz respeito à baixa resolução espacial dos sensores utilizados para gerar esses dados. Isso faz com que nuvens e aerossóis estejam presentes em quase todas as observações. Porém, a obtenção da ChIF é pouco influenciada pela presença de aerossóis, e cerca de 80% do sinal as ChIF é mantido no topo da atmosfera, até mesmo em nuvens com profundidade óptica entre 2 e 5 (FRANKENBERG et al., 2012). Além disso, uma das etapas da elaboração do produto Gome2_F (JOINER et al., 2013), utilizado nesta pesquisa, consiste em uma filtragem aplicada sobre os dados de ChIF do GOME-2 para minimizar os efeitos das nuvens (JOINER et al., 2012). Os dados de ChIF do produto Gome2_F (JOINER et al., 2013) com frações de nuvens efetivas maiores de 30% são excluídos (JOINER et al., 2013).

Nos últimos anos, algumas missões satelitais destinadas ao estudo dos componentes químicos da atmosfera foram lançadas, as quais possuem sensores com alta resolução espectral e cujas bandas abrangem parte do espectro da fluorescência de clorofila. As características dessas missões possibilitam a obtenção da fluorescência da clorofila (ChIF), embora não

tenham sido planejadas para esse fim. É o caso das missões GOSAT e METOP-A e B, além da *Orbiting Carbon Observatory-2* (OCO-2), lançada em 2015. As subsecções a seguir apresentam as características dos principais sensores satelitais utilizados para a obtenção da ChIF.

2.2.2.1. Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2)

O sensor GOME-2 foi originalmente desenvolvido para medir o ozônio atmosférico, gases traços e radiação ultravioleta. O primeiro sensor GOME-2 foi lançado em 2006, a bordo do satélite MetOp-A, que possui órbita sol-síncrona. O segundo foi lançado em 2012, a bordo do MetOp-B, com uma diferença de fase de 180 graus em relação ao primeiro (JOINER et al., 2013). Os satélites MetOp-A e MetOp-B foram desenvolvidos pela *European Space Agency* (ESA) e são operados pela *European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT). O GOME-2 é um espectrômetro óptico imageador que opera em quatro bandas espectrais, que cobrem todo o intervalo entre 240 a 790 nm (MUNRO et al., 2015). A ChIF é obtida a partir do canal quatro, que cobre os comprimentos de onda entre 590 e 790 nm. A largura de varredura desse sensor (*swath*) é de 1920 km. A resolução espacial atual do GOME-2 é igual 40 x 80 km no METOP-B e igual a 40 x 40 km no METOP-A, enquanto a resolução espacial típica das composições globais de fluorescência da clorofila (ChIF) derivadas desse sensor é de 0.5°. Possui amostragem espacial contínua e largura de banda de 0.5 nm.

2.2.2.2. TANSO-FTS

O *Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation-Fourier Transform Spectrometer* (TANSO-FTS) foi desenvolvido com o objetivo de monitorar a distribuição global dos seguintes gases de efeito estufa: CO₂ e CH₄ (KUZE et al., 2009). Foi lançado a bordo do GOSAT, em 2009, e possui uma órbita sol-síncrona. O GOSAT foi desenvolvido e é operado pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA). A cobertura espectral nas regiões do visível e infravermelho próximo desse sensor situa-se

entre 757 e 775 nm, com uma largura de banda igual a 0.025nm. A resolução espacial do TANSO-FTS é igual 10 km de diâmetro, embora a resolução espacial típica das composições globais de fluorescência da clorofila (ChlF) derivadas desse sensor sejam de 2°. A amostragem espacial desse sensor não é contínua.

2.2.2.3. OCO-2

O OCO-2 foi lançado em 2014, com o objetivo de estudar as fontes e os sumidouros de carbono em escala global, e assim analisar como o carbono está contribuindo para as mudanças climáticas. Foi desenvolvido e é operado *pela National Aeronautics and Space Administration (NASA)*. O OCO-2 possui uma órbita sol-síncrona. A cobertura espectral nas regiões do visível e infravermelho próximo desse sensor situa-se entre 650nm e 790 nm, com uma largura de banda igual a 0.05 nm. A resolução espacial do OCO-2 é igual 1.3 km × 2.25 km, embora a resolução espacial típica das composições globais de fluorescência da clorofila (ChlF) derivadas desse sensor sejam de 1°. Assim como o TANSO-FTS, amostragem espacial desse sensor não é contínua.

2.2.2.4. SCIAMACHY e TROPOMI

Além dos sensores em atividade citados anteriormente (Gome-2, TANSO-FTS e OCO-2), o SCIAMACHY, sensor inativo desde 2012, também foi utilizado em alguns estudos para a obtenção da fluorescência da clorofila (ChlF) (JOINER et al., 2012; KÖHLER et al., 2014). O SCIAMACHY foi um espectrômetro imageador que operava na faixa do ultravioleta até o infravermelho próximo, em oito canais. Foi lançado em 2002 a bordo do satélite ENVISAT – desenvolvido e operado pela *European Space Agency (ESA)*, e encerrou suas atividades em 2012.

Já o *TROPospheric Monitoring Instrument* – TROPOMI, a bordo do Sentinel-5 Precursor, foi desenvolvido pela *European Space Agency (ESA)* e lançado em 2017. Esse sensor irá coletar dados com largura de banda e resolução temporal respectivas de 0,5 nm e 7 × 7 km. Além da melhoria na resolução espacial em relação aos sensores GOME-2 e

TANSO-FTS esse sensor irá reduzir as incertezas no mapeamento da fluorescência da clorofila (ChlF) (GUANTER et al., 2015). As principais características dos sensores supramencionados são mostradas na Tabela 1.

Tabela 2.1 - Principais características dos sensores utilizados na obtenção da fluorescência de clorofila (ChlF).

	TANSO-FTS	GOME-2	SCIAMACHY	OCO-2	TROPOMI
Início do Período em atividade	2009	2007	2002–2012	2014	2017
Hora local (Equador)	Meio-dia	Manhã	Manhã	Meio-dia	Meio-dia
Cobertura espectral (V/IV) (nm)	757–775	650–790	650–790	650–790	675–775
Largura de banda em 750 nm (nm)	~ 0.025	~ 0.5	~ 0.5	~ 0.05	~ 0.5
Amostragem espacial	Não-Contínua	Contínua	Contínua	Não-Contínua	Contínua
Resolução espacial	10 km (diâmetro).	40 x 80 km	30 x 240 km	1.3 x 2.25 km	7 x 7 km
Resolução espacial (composições globais)	2°	0.5°	1.5°	1°	0.1°
Número de Obs. diárias (no IVP)	600	2800	900	~ 129 900	~ 544 300

Fonte: Adaptado de Guanter et al., 2015.

A amostragem espacial contínua é uma das vantagens do GOME-2 em relação ao OCO-2 e ao TANSO-FTS. Além disso, o tempo de revisita do GOME-2 é de 1,5 dias, enquanto o do OCO-2 é de 16 dias. O baixo período de revisita do OCO-2 torna-se um grande problema para o monitoramento contínuo de um ecossistema como a Amazônia, em que as nuvens usualmente constituem um grande obstáculo para a obtenção de dados de sensoriamento remoto. A formação de séries temporais a partir dos dados do OCO-2 também é dificultada, pois esse sensor possui dados disponíveis apenas a partir de 2014. Dessa forma, os dados mais apropriados para serem utilizados neste estudo foram os do sensor GOME-2.

O TROPOMI será o primeiro espectrômetro imageador a fornecer dados globais com uma resolução espacial moderada e com uma amostragem espectral contínua das regiões do vermelho e infravermelho próximo - o que já é realizado pelo GOME-2, porém com uma resolução espacial mais grosseira (GUANTER et al., 2015). Além disso, as medidas de reflectância desse sensor na borda do vermelho podem ser utilizadas para estimar parâmetros da vegetação que são complementares à fluorescência da clorofila (ChlF), tais como o teor de clorofila e o índice de Área Foliar (IAF) (GUANTER et al., 2015).

2.3. Eventos de seca e seus efeitos sobre a produtividade das florestas na região amazônica

De acordo com Marengo et al. (2011), as anomalias nas temperaturas da superfície (TS) do Atlântico Norte Tropical têm aumentado gradualmente desde a década de 70. Nos anos de 1980, 1998, 2005 e 2010 foram observados valores elevados dessa variável que coincidiram com a ocorrência de secas na Amazônia (MARENGO et al., 2011). Segundo esses autores, as estações secas dos eventos de 2005 e 2010 foram muito influenciadas pelas altas TS do Atlântico Norte Tropical, embora a estação chuvosa de 2010 tenha sido afetada também pelo *El Niño*. A seca de 2010 começou no início do verão austral durante o *El Niño* de 2010 e se tornou mais intensa durante a *La niña* na estação seca do inverno austral (MARENGO et al., 2011).

No estudo de Marengo et al. (2011) foi demonstrada uma relação inversa entre as anomalias de precipitação que ocorreram durante a estação seca (de julho a outubro) no sul da Amazônia e as anomalias das temperaturas de superfície (TS) do Atlântico Norte Tropical. O aquecimento no Atlântico Norte Tropical foi maior no período de março a maio, quando a posição climatológica média da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) situou-se sobre o centro e o leste da Amazônia. Durante esse período (2010) foi alcançada a maior anomalia de TS do Atlântico Norte Tropical (1,5°C) desde 1923, superando o maior registro anterior, que foi igual a 0,9°C em 2005.

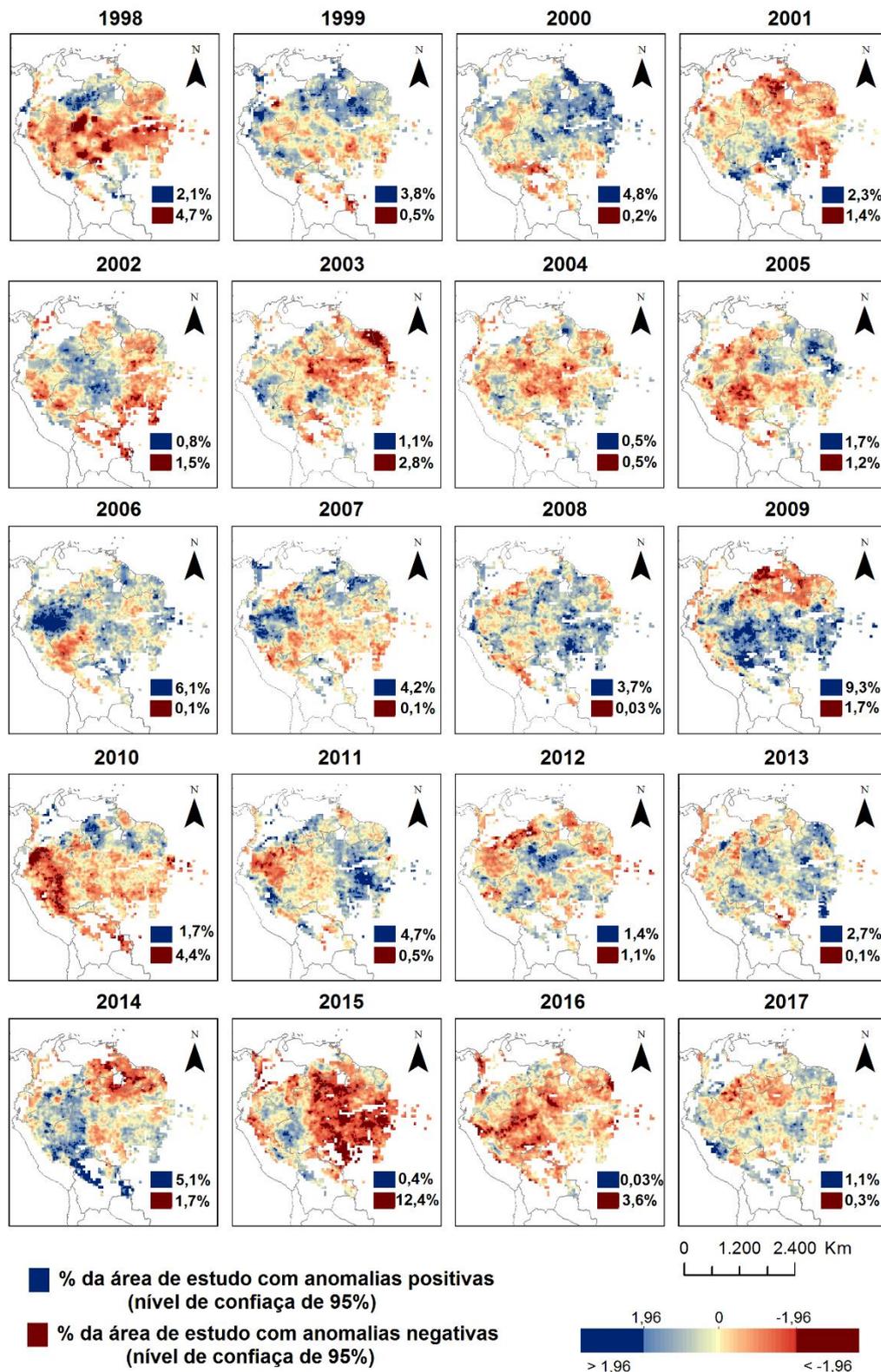
Marengo et al. (2011) também observaram um aumento no número consecutivo de meses secos a partir dos anos 90 no sul da Amazônia, ou seja, meses cujos valores de precipitação mensal foram menores do que 100 mm. Além disso, Marengo et al. (2011) observaram que as estações secas foram ainda mais prolongadas entre 2005 e 2010, as quais começaram mais cedo e terminaram mais tarde nessa região.

Além dos eventos de seca associados com as altas temperaturas da superfície do Oceano Atlântico, houveram eventos de seca associados com os eventos de *El Niño* de 1982/83 e 1997/1998, nas regiões norte, leste e oeste da Amazônia (ESPINOSA et al., 2011; MARENGO et al., 2016; MALHI et al., 2008). O *El Niño* de 1997/98 foi considerado o maior do século até então, devido à sua grande magnitude e impactos causados em nível global (SANTOSO et al., 2015). Porém, o *El Niño* de 2015/16, combinado com uma tendência de aquecimento regional, foi associado com um maior aquecimento e extensão de secas na Amazônia, quando comparado com os eventos de 1982/83 e 1997/98 (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016). Jiménez-Muñoz et al. (2016) observaram que o recorde de anomalias positivas de temperatura na Amazônia ocorreu em 2015, cuja maior temperatura foi 1.5 °C e 2 °C maior do que os picos observados nos eventos de *El Niño* de 1997 e 1983, respectivamente.

Os eventos de secas descritos ficam mais evidentes através da Figura 2.5. Essa figura mostra uma distribuição normal padrão (média = 0 e desvio-padrão =1) da precipitação anual na área de estudo, entre 1998 e 2017. A precipitação anual foi obtida a partir do produto TRMM-3B43 Versão 7. As anomalias negativas e significativas, com nível de confiança de 95% (valores menores do que -1,96), evidenciam as secas associadas aos eventos de *El Niño* que ocorreram em 1997/1998 e 2015/2016, e as secas associadas ao aumento da temperatura da superfície (TS) do atlântico, em 2005 e 2010. As secas associadas ao aumento das TS do atlântico (2005 e 2010) ocorreram principalmente na região oeste da Amazônia. As secas de 2010 e 2005 apresentaram anomalias negativas em 4,4% e 1,2% da área de estudo, respectivamente. Em 2010 foram observadas algumas anomalias negativas também nas regiões sul e leste.

Já a seca de 98, associada ao evento de *El Niño* de 1997/1998, ocorreu predominantemente na região central e no leste. As anomalias negativas para esse ano abrangeram 4,7% da área de estudo. Na seca de 2015, associada ao evento de *El Niño* de 2015/2016, foi observada a maior quantidade de anomalias negativas dentro do período analisado, as quais abrangeram 12,4% da área de estudo. As anomalias negativas nesse ano ocorreram praticamente em toda parte oriental da Amazônia. Já a seca de 2016, também associada ao evento de *El Niño* de 2015/2016, ocorreu predominantemente no oeste da Amazônia e mostrou ser menos intensa que a de 2015. As anomalias negativas ocorridas em 2016 abrangeram 3,6% da área de estudo.

Figura 2.5. Distribuição normal da precipitação anual no período 1998-2017.



As secas tendem a reduzir a produtividade das florestas e a aumentar a mortalidade e a perda de folhas das árvores (NEPSTAD et al., 2004; PHILLIPS et al., 2009). A mortalidade e a perda de folhas das árvores acarretam em maior acúmulo de matéria orgânica no solo, e também em um maior espaçamento entre as copas, processos que podem levar a um aumento na incidência de queimas (RAY, NEPSTAD; MOUTINHO, 2005). O aumento na incidência de queimas ocasionado pelo acúmulo de matéria orgânica no solo e pelo maior espaçamento entre as copas é explicado no artigo de Aragão et al. (2014): o maior espaçamento entre as copas aumenta a radiação incidente no solo, o que aumenta a temperatura no interior dos dosséis e faz com que a matéria orgânica acumulada no solo sofra uma rápida desidratação. Essas condições podem tornar as florestas mais suscetíveis à ocorrência de queimas. As análises realizadas por Aragão et al. (2014) demonstram que a Amazônia brasileira pode se tornar uma fonte de emissão ao invés de um sumidouro de carbono durante eventos de seca.

Phillips et al. (2009) estimaram que a floresta amazônica apresentou perda de biomassa acima do solo devido à seca de 2005. Já o estudo de Brienen et al. (2015) mostra que no período 2000-2010 a produtividade na Amazônia se manteve constante, embora tenha sido maior do que nos períodos anteriores, entre 1983 a 1999. Já a mortalidade aumentou entre 2000-2010 em comparação com o período de 1983 a 1999, o que fez com que as taxas de incremento líquido de biomassa acima do solo decaíssem nesse período.

Gatti et al. (2014) observaram que a retenção de carbono na bacia amazônica foi menor no ano de 2010 em relação a 2011, que foi um ano úmido. Segundo esses autores, em 2010 o fluxo de carbono entre a floresta não-queimada e a atmosfera na Amazônia foi neutro, ou seja, a vegetação não se comportou como uma fonte nem como um sumidouro de carbono. Gatti et al. (2014) sugerem que isso tenha sido causado por uma diminuição da fotossíntese durante a seca de 2010.

Doughty et al. (2015) observaram que a Produtividade Primária Líquida (PPL) durante a seca de 2010 se manteve constante em relação a PPL do ano anterior, porém a alocação de carbono foi maior nos troncos e raízes em comparação com os dosséis. Em 2011, um ano úmido, a PPL se manteve constante, porém a alocação de carbono passou a ser direcionada para os dosséis. Esses autores afirmam que esse processo pode ser decorrente do fato de as árvores priorizarem o crescimento ao invés da manutenção e defesa dos tecidos durante a seca, em consonância com as teorias eco-evolutivas de que as árvores são menos competitivas na ausência de crescimento (FRANKLIN et al., 2012).

Feldpausch et al. (2016) observaram que as florestas da Amazônia não ganharam biomassa durante a seca de 2010, o que esses autores atribuem a um aumento na mortalidade e diminuição da produtividade. Esses autores também estimaram que o balanço de carbono foi neutro em 2010, nas florestas intactas da Amazônia.

2.4. Sazonalidade da fotossíntese e da estrutura de dosséis e sub-bosques na Amazônia

Wu et al. (2016) demonstraram que o crescimento foliar apresenta um papel fundamental na sazonalidade da fotossíntese na floresta amazônica. Wu et al. (2016) compararam estimativas de Produtividade Primária do Ecossistema (usada como um indicador da fotossíntese), obtidas através de medidas de fluxo de CO₂ pela técnica de Covariância de Vórtices Turbulentos (*Eddy covariance*), com observações de fenologia foliar. Esses autores demonstraram que a fotossíntese aumentou durante a estação seca em áreas não limitadas por água e diminuiu durante a estação seca em um local limitado por água. Os resultados obtidos por Wu et al. (2016) mostraram que o aumento da fotossíntese durante a estação seca em locais não limitados por água foi relacionado com a emissão de folhas novas e com a queda de folhas mais velhas. Isso pode ter feito com que os dosséis dessas áreas fossem compostos por folhas mais jovens, que tendem a possuir maior capacidade fotossintética (BRYANT et al., 2014). Assim, Wu et al. (2016) concluíram que a

fenologia foliar pode ser o principal fator de influência da sazonalidade da fotossíntese na floresta amazônica. As análises realizadas por Wu et al. (2016) são congruentes com os resultados obtidos por Restrepo-Coupe et al. (2013), que também observaram um aumento da atividade fotossintética durante a estação seca em locais sem limitação por água na Amazônia, e que coincidiu com a emissão de folhas novas nesses locais.

Guan et al. (2015) observaram que a disponibilidade de água exerce um papel importante na definição da sazonalidade da vegetação na floresta amazônica. Esses autores utilizaram a fluorescência de clorofila (ChlF) e também o EVI, obtidos a partir dos sensores GOME-2 e MODIS, respectivamente, como indicadores da atividade fotossintética da vegetação. A partir desses dados eles investigaram a relação entre a precipitação e a atividade fotossintética das florestas tropicais sempre verdes, entre 2002 e 2012. Guan et al. (2015) concluíram que valores de precipitação anual abaixo de um limiar de 2.000 mm ao ano fazem com que a atividade fotossintética seja limitada durante a estação seca. De acordo com esses autores, o limiar de 2.000 mm ao ano pode indicar se a água oriunda do armazenamento subsuperficial, ocorrido na estação úmida, é suficiente para atender as necessidades hídricas das plantas durante a estação seca.

Huete et al. (2006) analisaram a fenologia da vegetação da floresta amazônica utilizando dados satelitais - mais especificamente o EVI obtido pelo sensor MODIS, entre 2000 e 2005. Esses autores observaram que o EVI aumentou durante a estação seca na Amazônia equatorial – efeito denominado verdejamento ou *green-up*. Essas observações contrariaram previsões de modelos de ecossistemas, os quais indicavam um declínio na fotossíntese durante a estação seca devido à limitação por água (BOTTA et al., 2002; TIAN et al., 1998). O verdejamento durante a estação seca foi mais intenso na parte leste da Amazônia equatorial, que possui uma sazonalidade de precipitação mais proeminente do que na parte oeste. Na parte leste da Amazônia equatorial o EVI apresentou um aumento de até 25% durante a estação seca. O verdejamento durante a estação seca mostrou-se menos intenso na Amazônia central, quando

comparado com o verdejamento observado na parte leste . Por outro lado, Huete et al. (2006) observaram uma perda de verdor (*'brown-down'*) em áreas desmatadas no extremo leste da Amazônia, ou seja, o EVI decaiu durante a estação seca. Assim, é possível que tenha havido perda da atividade fotossintética na estação seca por causa da remoção das árvores. Como as árvores possuem raízes mais profundas, pode ter havido redução no aproveitamento das águas subterrâneas por parte da vegetação (NEPSTAD et al., 1994).

Assim como Huete et al. (2006), outros estudos que utilizaram dados de satélite mostraram que há maior atividade fotossintética na floresta amazônica equatorial durante a estação seca, quando comparada com a atividade fotossintética durante a estação úmida: Xiao et al. (2005), Myneni et al. (2007), Samanta et al. (2012), Hilker et al. (2014), Jones et al. (2014) e Maeda et al. (2014). Porém, a sazonalidade da vegetação observada nesses estudos foi questionada por Galvão et al. (2011) e Morton et al. (2014).

Segundo Galvão et al (2011) e Morton et al (2014), o verdejamento durante a estação seca - observado a partir de dados de sensoriamento remoto passivo - foi resultado de um aumento artificial no infravermelho próximo, causado pela geometria de aquisição do sensor. Morton et al. (2014) fizeram uso de dados *Light Detection And Ranging* (LIDAR) também, os quais não mostraram variações sazonais na estrutura do dossel nem na área foliar nas florestas da Amazônia. Assim, esses estudos concluíram que a floresta amazônica possui estrutura e verdor constantes durante a estação seca. No entanto, uma nova versão do EVI, derivada do algoritmo *Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction* (MAIAC), mostra evidências da ocorrência do verdejamento durante a estação seca na Amazônia (BI et al., 2015; LYAPUSTIN et al., 2012). O MAIAC é capaz de melhorar a acurácia na detecção de nuvens, nas estimativas de aerossóis e na correção atmosférica em dados MODIS (LYAPUSTIN et al., 2012).

Uma análise recente realizada por Tang et al. (2017) corrobora a existência do verdejamento durante a estação seca e também ajuda a explicar a sazonalidade que ocorre nos sub-bosques da Amazônia. Tang et al. (2017) analisaram os padrões sazonais de dosséis e sub-bosques na floresta amazônica a partir de dados LIDAR obtidos através de sensores satelitais, nos períodos de Março, Junho e Outubro. Esse tipo de análise é importante porque os dados LIDAR não estão sujeitos aos supramencionados artefatos que podem estar associados ao EVI, relacionados com a geometria de aquisição dos dados (GALVÃO et al., 2011; MORTON et al., 2014). Tang et al. (2017) observaram que o surgimento de folhas novas nos dosséis ocorre principalmente no início da estação seca, seguido por uma queda das folhas nos dosséis, que prossegue até o final da estação seca. Esses autores observaram um aumento do Índice de Área Foliar (IAF) nos sub-bosques durante a queda das folhas do dossel, principalmente no meio ou no fim da estação seca. Esse processo não mostrou relação com variações sazonais de precipitação e radiação observadas no estudo. Porém, o desenvolvimento dos sub-bosques apresentou forte relação com a sazonalidade da dinâmica estrutural dos dosséis. Tang et al. (2017) afirmam que o crescimento do IAF dos sub-bosques é causado pelo aumento radiação disponível, devido ao aumento do espaçamento causado pelas variações sazonais nos dosséis. Esses autores também afirmam que o estudo de Morton et al. (2014) não mostrou variações sazonais na estrutura do dossel nem na área foliar nas florestas da Amazônia porque fez uso de dados LIDAR em um período de tempo menor, entre junho e outubro, e assim não foi capaz de captar as variações espaciais de IAF nos dosséis e sub-bosques.

Em uma análise restrita à região de Tapajós – PA (2.897°S, 54.952°W) (km-67), Brando et al. (2010) observaram que o EVI mensal (obtido em um período entre 2000 – 2008) apresentou acentuada sazonalidade e uma correlação altamente positiva ($R^2 = 44\%$; $P < 0.01$) com medidas de proporção de árvores com folhas novas. Porém, o EVI apresentou uma correlação inversa com a disponibilidade de água para as plantas - *Plant-*

Available Water (PAW) a 0–2 m de profundidade ($R^2 = 40\%$; $P < 0.01$). Assim, é provável que a umidade do solo tenha restringido a realização da fotossíntese nesse local. Além disso, o Índice de Área Foliar (IAF) medido nesse local quase não mostrou variação sazonal e foi pouco correlacionado com o EVI. Isso sugere que a produção de folhas novas é capaz de explicar a variabilidade interanual do EVI, mesmo que a variabilidade interanual do EVI não esteja acompanhada de um aumento no IAF, e que seja antecedida por um pico máximo de abscisão foliar, indicado pela produção de serapilheira.

Wagner et al. (2013) também observaram uma intensa e significativa sazonalidade no EVI, que foi similar em cinco tipos de florestas localizadas na Guiana Francesa. Nesses locais o EVI aumentou durante a estação seca (agosto e setembro) e atingiu seu valor máximo no início da estação úmida (dezembro a janeiro), seguido por um decréscimo ao longo da estação úmida. Além disso, os resultados de Wagner et al. (2013) mostraram que há um sincronismo entre a abscisão de folhas velhas, produção de novas folhas (indicada pelo EVI) e redução na produção de matéria lenhosa nos locais analisados. Wagner et al. (2017) demonstraram que a produção de folhas novas é influenciada pelo aumento da radiação incidente (em 70,4% das florestas da Amazônia) e pelo aumento da precipitação (em 29,6% das florestas da Amazônia).

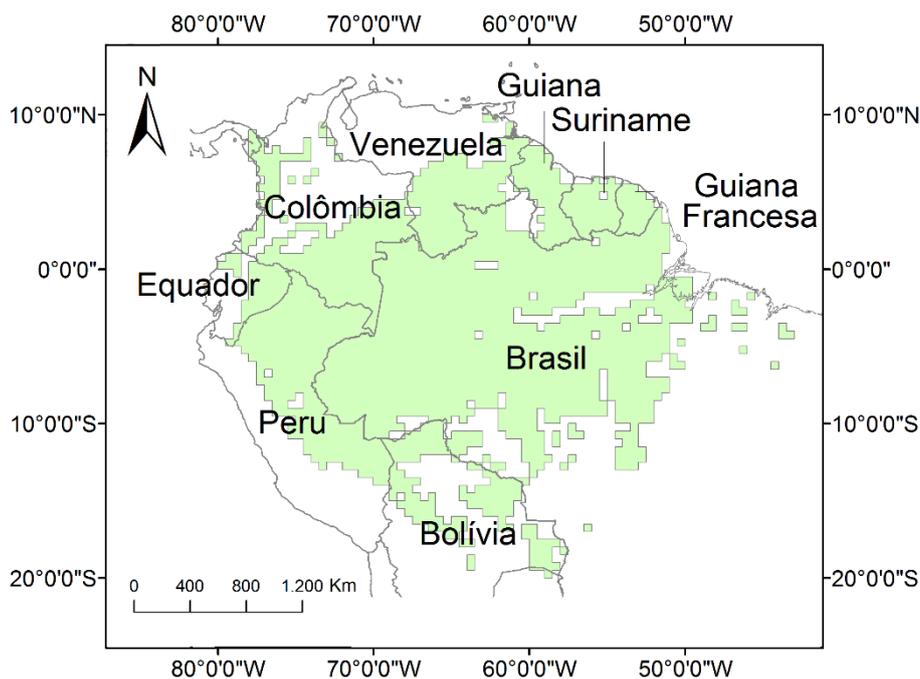
A relação entre fenologia foliar e capacidade fotossintética dos dosséis também foi observada no estudo de Bryant et al. (2016). Esses autores obtiveram uma correlação positiva entre o EVI e a produção de folhas novas através de medidas de reflectância espectral de folhas individuais, localizadas no topo de dosséis. Os resultados do cálculo do EVI para as folhas de diferentes idades revelou uma dependência deste índice em relação à fenologia foliar. O EVI inicialmente aumentou com o desenvolvimento foliar, dos estágios iniciais de crescimento até a maturidade, onde atingiu seu valor máximo, e então decresceu quando as folhas entraram no estágio senescência. A partir dos resultados obtidos por Bryant et al. (2016), é possível chegar à conclusão de que a fenologia das folhas localizadas no topo dos dosséis pode influenciar

significativamente o EVI. Bryant et al. (2016) também observaram um aumento do EVI durante a estação seca, junto com o decréscimo da quantidade de folhas senescentes. Durante a estação seca a reflectância foliar representou a mistura de folhas senescentes (folhas cujo EVI foi menor), jovens (EVI em rápido crescimento) e folhas maduras (folhas recém-amadurecidas, com maior EVI atingido durante a estação seca). Conforme as folhas maduras envelheceram e atingiram a senescência, suas propriedades espectrais se modificaram convergindo para a diminuição do EVI antes da estação seca. Assim, os resultados de Bryant et al. (2016) são coerentes com os de Huete et al. (2006) e Brando et al. (2010), os quais propõem que a sazonalidade do EVI-MODIS pode ser atribuída à emissão de folhas novas na estação seca.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à área de floresta da bacia amazônica, que inclui partes do território do Brasil, Bolívia, Peru, Equador, Colômbia, Venezuela, Guiana, Suriname e Guiana Francesa. Os dados utilizados nesse estudo estendem-se entre as latitudes 10°N a 15°S e longitudes 80°W a 40°W, e abrangem apenas as áreas cobertura florestal acima de 70% (secção 3.2.2). A cobertura florestal foi definida a partir de dados do *Global Forest Change Project* (GFCP) (HANSEN et al., 2013). A Figura 3.1 mostra as áreas com cobertura florestal superior a 70% em uma resolução de 0,5°, junto com o nome dos países em que tais áreas estão situadas.

Figura 3.1 - Área de estudo.



3.1. Gradientes vegetacionais

É importante a análise dos gradientes vegetacionais e do regime de precipitação que ocorre na Amazônia, pois nesta pesquisa busca-se entender a sazonalidade da fotossíntese e a relação dessa variável com os fatores climáticos. O comprimento das estações secas durante o ano é um fator determinante para a distribuição das espécies de árvores na

região amazônica (STEEGE et al., 2003). Steege et al. (2013) observaram um gradiente relacionado com o comprimento das estações secas, no sentido noroeste-sudeste, caracterizado pelo aumento da abundância das famílias Burseraceae (*Protium* and *Tetragastris*), Bignoniaceae (*Jacaranda* e *Tabebuia*) e Rutaceae (*Fagara*) nas florestas secas do extremo sudeste da bacia amazônica. O comprimento da estação seca mostrou-se diretamente relacionado com a perda de diversidade de espécies nas regiões tropicais do hemisfério sul (STEEGE et al., 2013). Steege et al. (2013) observaram também outro gradiente de distribuição de espécies de árvores, associado com a fertilidade do solo, que se estende do escudo das guianas (solos mais pobres) até o sudoeste da Amazônia (solos mais férteis).

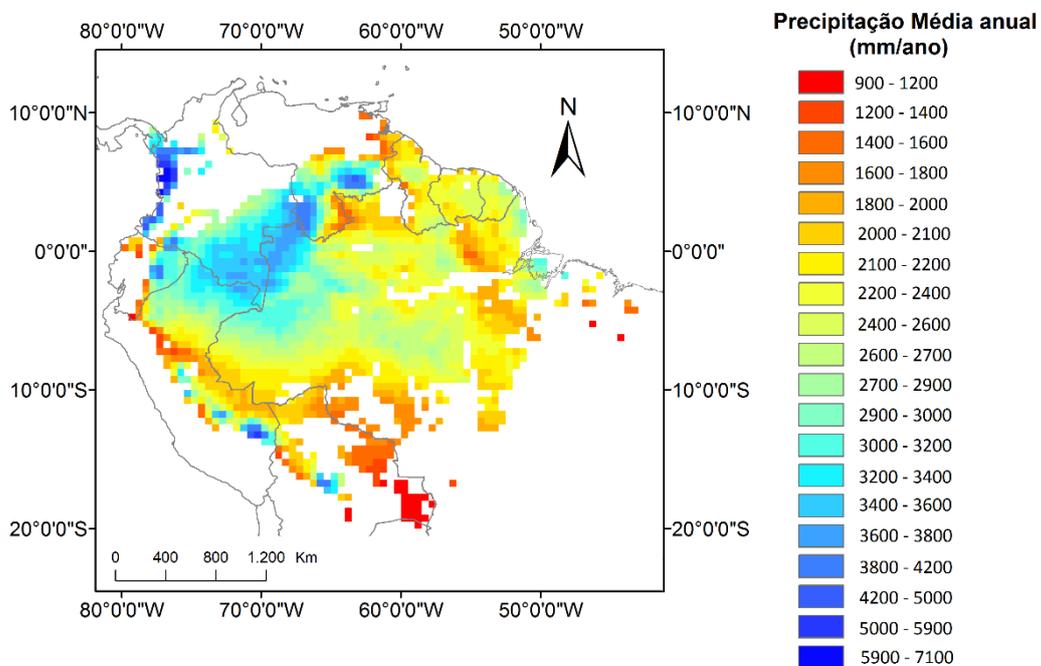
Baker et al. (2004) determinaram a variação da biomassa acima do solo em locais de floresta primária distribuídos na bacia amazônica. Esses autores consideraram a influência relativa da composição de espécies (densidade da madeira) e da estrutura florestal (área basal) para determinar as variações da biomassa acima do solo. Segundo Baker et al. (2004), os valores de densidade da madeira foram maiores no centro e no extremo leste da Amazônia, e menores no noroeste da Amazônia. As variações na densidade da madeira determinaram os padrões de biomassa acima do solo na Amazônia (BAKER et al., 2004). Assim, as observações de Baker et al. (2004) indicam que há um gradiente de biomassa acima do solo que aumenta no sentido sudoeste-leste, determinado pelos padrões de composição de espécies na bacia amazônica.

3.2. Gradientes de Precipitação Média Anual (PMA)

O padrão espacial da precipitação na Amazônia é complexo, não apenas em áreas com orografia mas também em locais com altitude homogênea (SOMBROEK, 2001). A Precipitação Média Anual (PMA) na área de estudo apresenta seus maiores valores na porção noroeste (Figura 3.2). Essa região também não possui estações secas (Figura 3.3). A PMA na

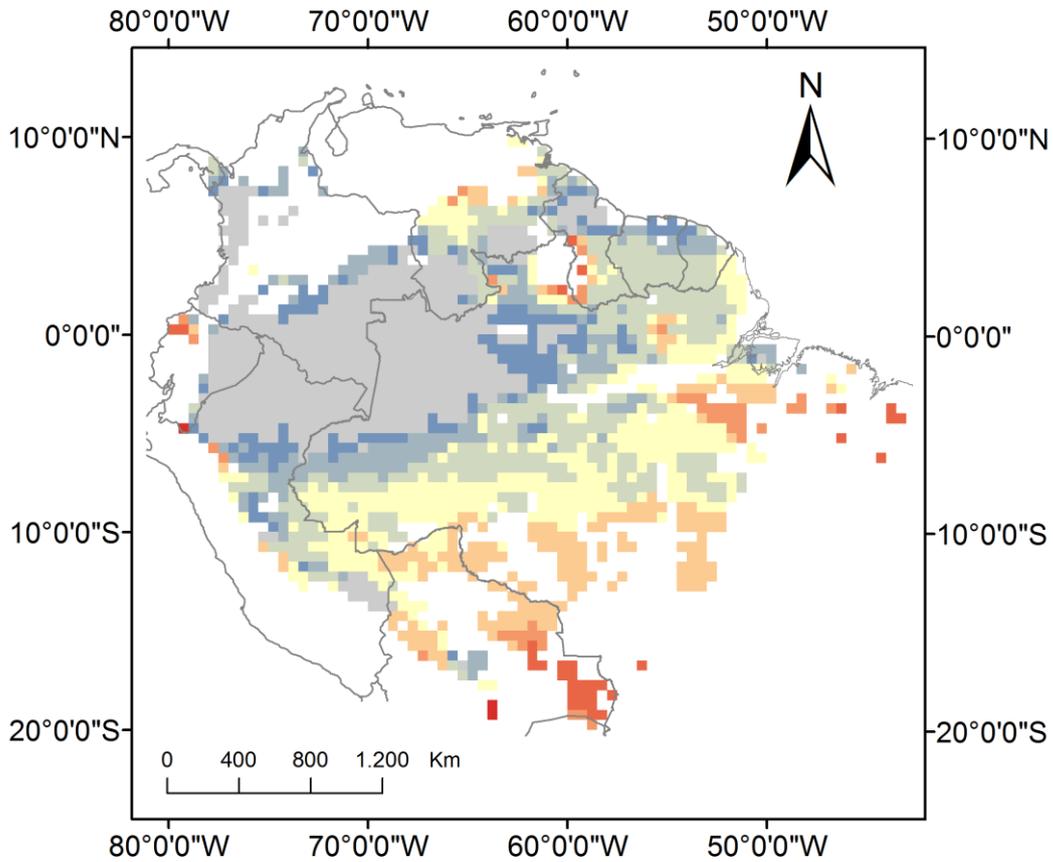
região noroeste chega a ser maior do que 4000 mm, enquanto na região sudeste a precipitação anual possui um volume inferior a 1200 mm em alguns locais. A região norte também apresenta um corredor seco, que se estende do nordeste até o extremo norte da Amazônia. O extremo sul da Amazônia também possui PMA mais baixa – em alguns locais dessa região a PMA é menor do que 1200 mm. O comprimento das estações secas nessas áreas também foi maior, chegando a oito meses em alguns locais (Figura 3.3). No centro da Amazônia foram observados valores intermediários de PMA e também no número de meses de estação seca, que variou de um a quatro meses.

Figura 3.2 - Precipitação Média Anual (PMA).



A Precipitação média anual (PMA) foi obtida através do produto TRMM-3B43 Versão 7 (HUFFMAN et al., 2007), para o período 2007-2015.

Figura 3.3 - Comprimento das estações secas.



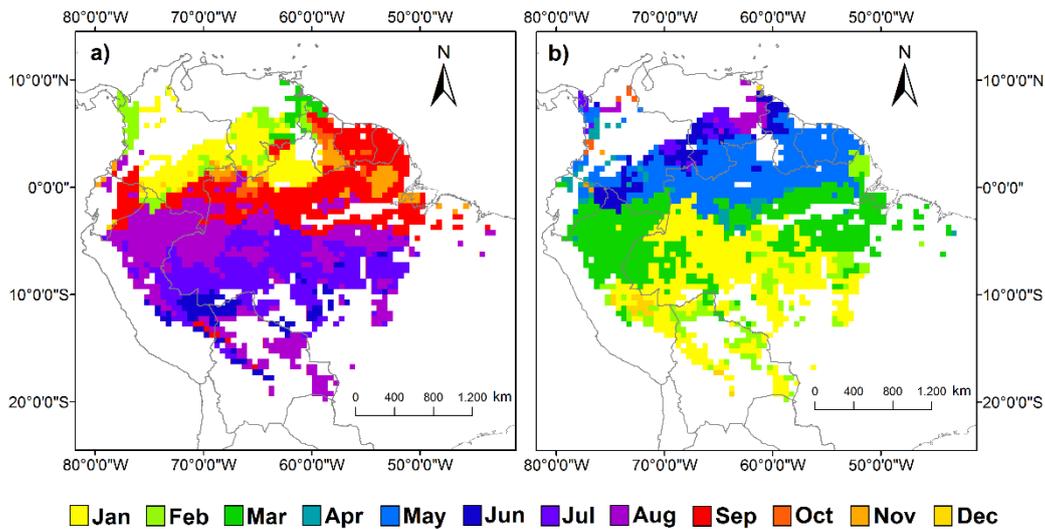
**Comprimento das estações secas
(Meses)**



O comprimento médio das estações secas foi obtido através do produto TRMM-3B43 Versão 7 (HUFFMAN et al., 2007), para o período 2007-2015.

Na Amazônia os valores mínimos de Precipitação Média Mensal (PMM) ocorrem entre julho e agosto no sul (Figura 3.4 A). No norte os menores valores ocorrem entre setembro e março. Já os valores máximos de PMM são maiores entre janeiro e agosto (Figura 3.4 B). No sul, os valores de PMM tendem a ser maiores em janeiro e fevereiro. Já no norte os maiores valores de PMM ocorrem entre maio e agosto. No escudo das guianas os períodos onde a PMM é maior ocorrem entre fevereiro e maio.

Figura 3.4 – Períodos onde a Precipitação Média Mensal (PMM) é mínima (a) ou máxima (b).

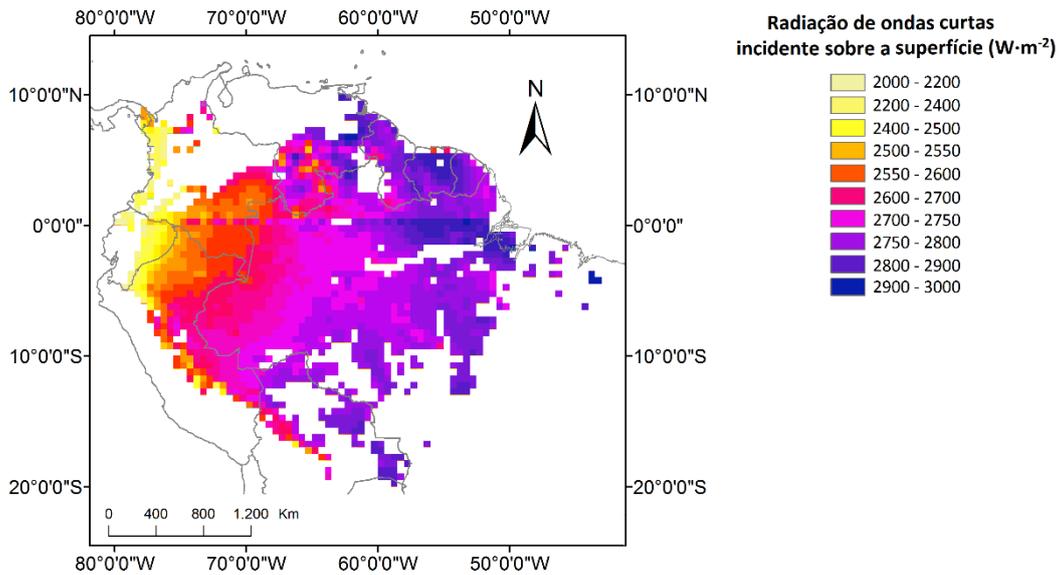


Os períodos onde a precipitação é mínima (a) ou máxima (b) foram obtidos através do produto TRMM-3B43 Versão 7 (HUFFMAN et al., 2007), para o período 2007-2015.

3.3. Gradientes de Radiação Média Anual de ondas curtas incidente sobre a superfície (RMA)

A Radiação Média Anual de ondas curtas incidente sobre a superfície (RMA) na área de estudo apresenta um gradiente bem definido, que aumenta no sentido oeste - leste (Figura 3.5). Os menores valores de RMA ocorrem no noroeste da Amazônia, enquanto os maiores ocorrem no extremo norte e no escudo das guianas.

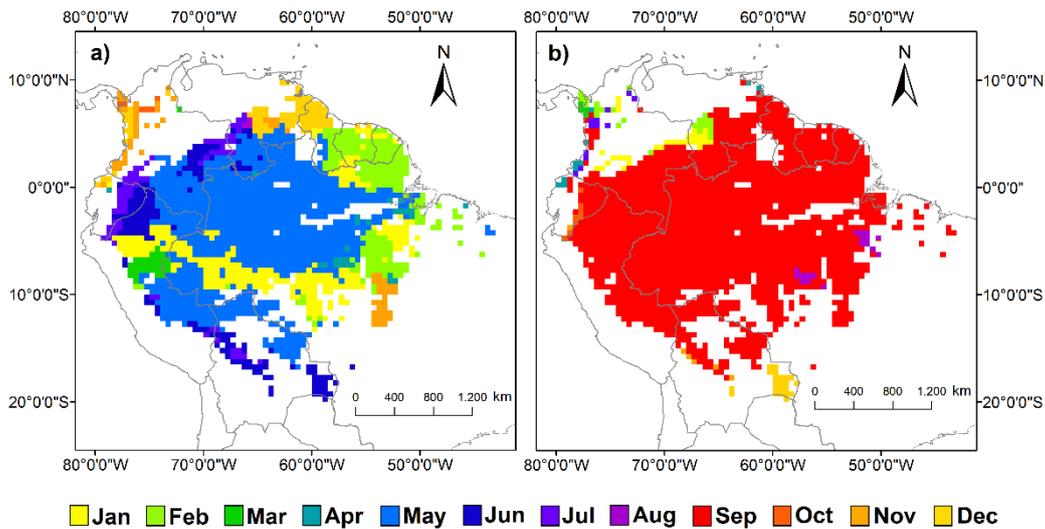
Figura 3.5 Radiação Média Anual de ondas curtas incidente sobre a superfície (RMA) na área de estudo.



A Radiação Média Anual de ondas curtas incidente sobre a superfície (RMA) foi obtida através de dados de reanálise GLDAS (RODELL et al., 2004), para o período 2007-2015.

Na Amazônia os valores de Radiação Média Mensal de ondas curtas incidente sobre a superfície (RMM) são menores entre janeiro e junho (Figura 3.6 A). Porém, em algumas regiões do sudeste e do norte a RMM mínima ocorre entre novembro e dezembro. Por outro lado, os maiores valores de RMM ocorrem em setembro quase em toda a Amazônia (Figura 3.6 B). No extremo sul os valores máximos de RMM ocorrem em dezembro.

Figura 3.6 – Períodos onde a Radiação Média Mensal de ondas curtas incidente sobre a superfície (RMM) é mínima (a) ou máxima (b).



Os períodos onde a Radiação ondas curtas incidente sobre a superfície é mínima (a) ou máxima (b) foram obtidos através de dados de reanálise GLDAS (RODELL et al., 2004), para o período 2007-2015.

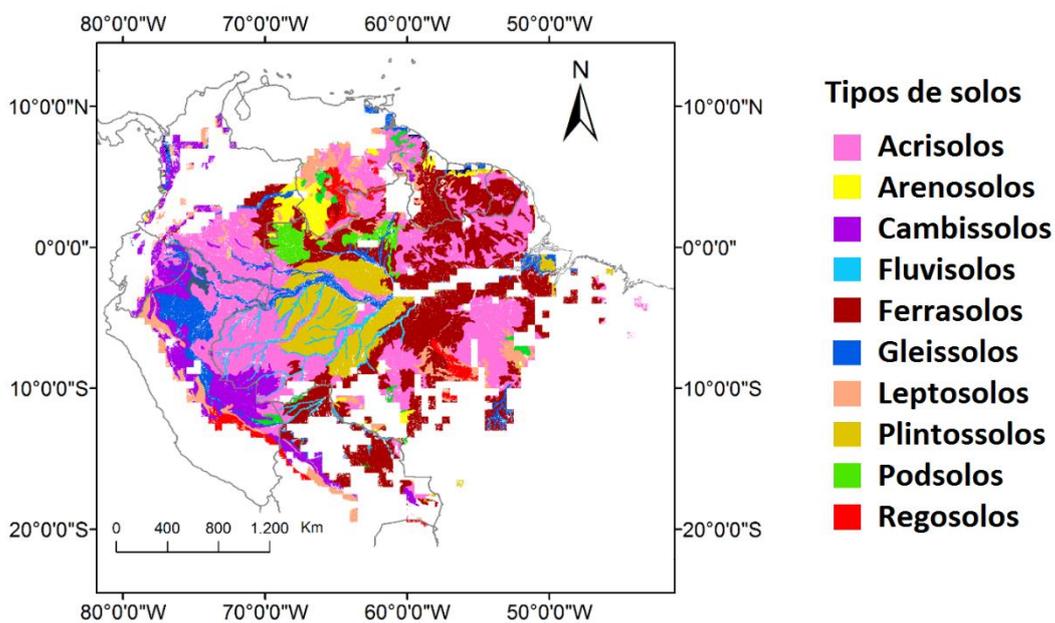
3.4. Solos

As florestas na bacia amazônica estão situadas sobre uma variedade de diferentes tipos de solos, os quais refletem uma grande diversidade de origens geológicas e processos geomórficos que ocorreram na região (SOMBROEK, 1966; IRION, 1978). A máxima idade geológica na Amazônia central varia bastante, por exemplo. As bacias Madeiram Juruá, Purús e Tapajós possuem idade geológica menor do que no leste de Manaus, que representa as formações antigas de Barreiras e Alter do Chão (HOORN et al., 2010). Os escudos pre-cambrianos do Brasil e das Guianas possuem a maior idade geológica da América do Sul, variando de 1500 a 3600 milhões de anos. Por outro lado, as formações que ocorrem no extremo oeste possuem a menor idade geológica na Amazônia, menores do que 1,8 milhões de anos.

A maior parte da área de estudo é composta por Acrisolos e Ferrasolos, que ocorrem principalmente nos escudos das Guianas e do Brasil, e também ao longo das áreas sedimentares nas porções central e leste do rio Amazonas (Figura 3.7). Arenosolos e Podsolos ocorrem próximos aos

escudos das guianas e do Brasil; este último também ocorre em áreas da bacia do Rio Negro. Plintossolos também ocorrem ao longo dos escudos das guianas e do Brasil, mas são mais comuns em áreas sedimentares próximas dos rios Jurua, Purus e Madeira. Regosolos e Leptosolos ocorrem em ambos os escudos e também na proximidade dos Andes. Fluvisolos e Gleissolos ocorrem ao longo dos rios e de planícies inundadas. Os Cambissolos ocorrem exclusivamente próximos aos Andes e a áreas sedimentares.

Figura 3.7 – Tipos de solos que ocorrem na área de estudo.



Fonte: Adaptado de Quesada et al., 2011.

3.5. Padrões de produtividade

Malhi et al. (2004) não observaram relação entre a produtividade de massa lenhosa e variáveis climáticas como precipitação, comprimento das estações secas ou insolação na Amazônia. Porém, esses autores observaram que há uma relação positiva entre a produtividade de massa lenhosa e a fertilidade do solo. Aragão et al. (2009) e Mercado et al. (2011) observaram também que a Produtividade Primária Líquida (PPL) na Amazônia é correlacionada com a fertilidade do solo. A fertilidade dos solos tende a ser maior na direção dos Andes e também conforme o

aumento da elevação média dos terrenos (MALHI et al., 2004). Esse gradiente de fertilidade reflete o contraste entre o lento intemperismo que ocorreu nos escudos pré-cambrianos das Guianas e do leste do Brasil, e o rápido intemperismo e deposição de novos materiais que ocorreu nos Andes (WODZICKI et al., 2000).

Em pesquisa conduzida por Malhi (2012), a Produtividade Primária Bruta (PPB) nas florestas tropicais foi menor em locais mais secos ou com maior sazonalidade. Observou-se também que as florestas tropicais não são mais produtivas que as florestas temperadas folhosas no ápice da estação de crescimento, por unidade de luz (HIRATA et al., 2008). Malhi (2012) afirma que a alta produtividade das florestas tropicais úmidas é devida quase exclusivamente à ausência de período de dormência.

Malhi et al. (2011) conduziram um estudo em que foi analisada a alocação da Produtividade Primária Líquida (PPL) em florestas tropicais. Foi analisada a alocação da PPL em três componentes - dosséis, troncos e raízes finas - de 106 sítios florestais, localizados em diferentes regiões tropicais do globo. Os resultados obtidos desse conjunto de parcelas indicam que a alocação média da PPL é relativamente invariante em três componentes da vegetação: média de $34 \pm 6\%$ nos dosséis, $39 \pm 10\%$ nos troncos e $27 \pm 11\%$ em raízes finas. Apesar de os valores de alocação média da PPL seguirem uma tendência, há certa variação na alocação de PPL entre os locais analisados. As variações observadas ocorreram, em sua maior parte, nos componentes troncos e raízes, enquanto a alocação da PPL no dossel foi relativamente invariante. Como a alocação da PPL em dosséis mostrou-se relativamente invariante (MALHI et al., 2011), a serrapilheira pode ser considerada um indicador mais preciso do total de PPL em uma floresta tropical (MALHI, 2012). Chave et al. (2009) demonstraram que a quantidade média de serrapilheira produzida nas florestas tropicais não possui uma relação significativa com a precipitação total anual, e também não varia conforme os tipos de solo, com exceção de solos menos férteis, como os solos arenosos. Esses autores demonstraram que a sazonalidade da serrapilheira nas florestas tropicais também não depende da precipitação

total anual nem dos tipos de solo. Porém, Chave et al. (2009) observaram uma relação significativamente positiva entre a sazonalidade da serapilheira e a sazonalidade da precipitação nas florestas tropicais.

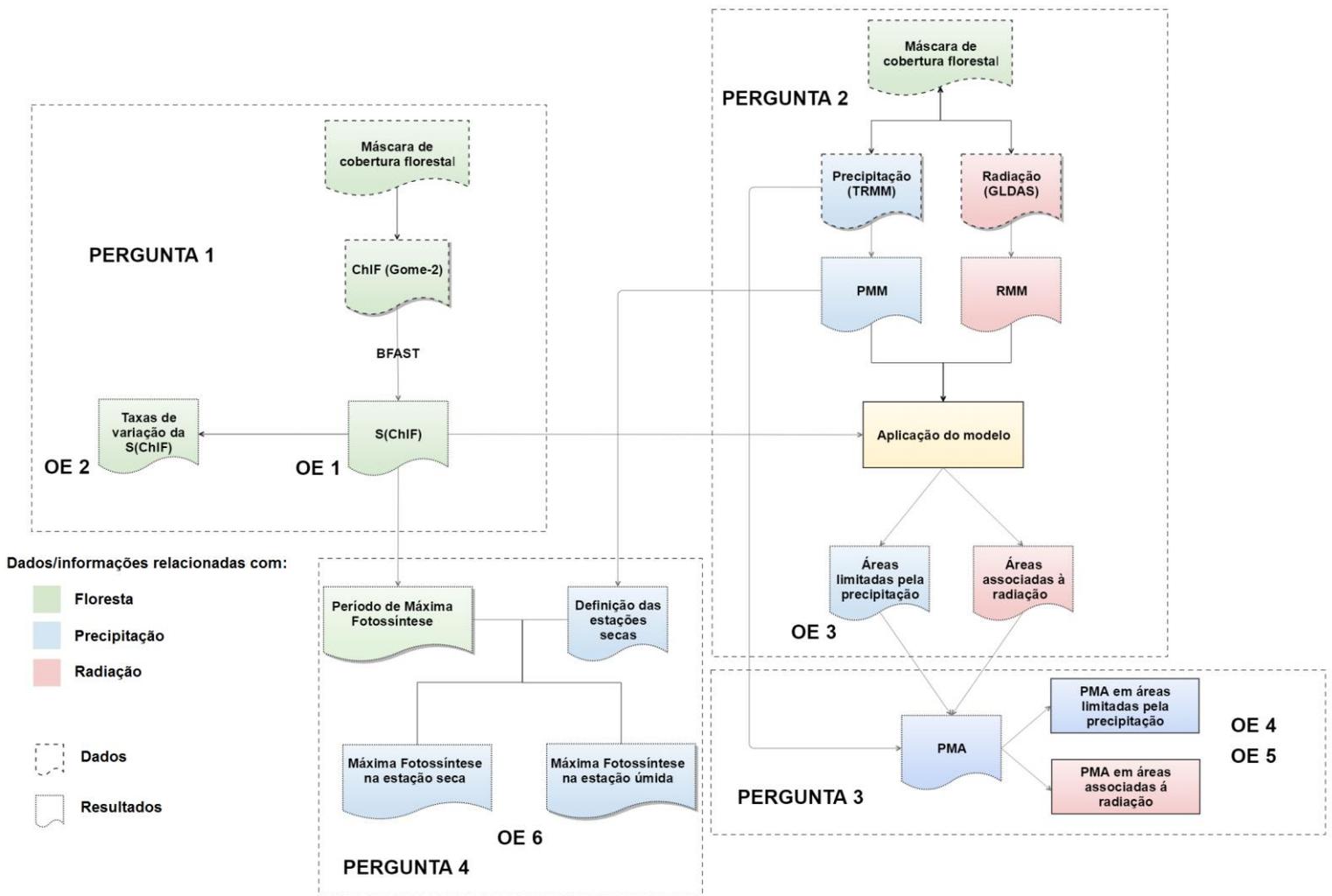
A partir de dados extraídos de parcelas permanentes em florestas primárias da Amazônia, Malhi et al. (2006) observaram que o tempo de residência médio do tecido lenhoso em árvores vivas mostrou uma forte relação inversa com a produtividade de madeira. Isso pode ter acontecido devido às limitações impostas pelo sistema ao incremento de biomassa. Em sistemas em equilíbrio, a altura e a densidade das árvores podem limitar o acesso de outros indivíduos à luminosidade, água e nutrientes. Assim, um aumento na produtividade de madeira é capaz de intensificar a competitividade entre as árvores, resultando em maiores taxas de mortalidade e *turnover* (MALHI et al., 2006).

Os estudos supramencionados nesta secção indicam que a produtividade nas florestas da Amazônia possui relação com a sazonalidade do clima e com a fertilidade do solo. Se por um lado a fertilidade do solo forma um gradiente bem definido de produtividade, por outro a relação entre as variáveis climáticas e a sazonalidade da produtividade da vegetação na Amazônia não está estabelecida, pois diversos estudos têm divergido quanto as respostas da vegetação às variações no clima (GALVÃO et al., 2011; MAEDA et al., 2016; MORTON et al., 2014; WU et al., 2016). Além disso, eventos extremos de seca tem sido observados na Amazônia (JIMENEZ-MUNOZ, 2016), e projeções preveem mudanças no clima para essa região (SOLOMON et al., 2009; HARRIS et al., 2008; SPRACKLEN et al., 2012; FENG et al., 2013). Dessa forma, mais estudos são necessários para entender as respostas da vegetação à sazonalidade do clima e também a possíveis eventos extremos de secas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi realizado seguindo um fluxograma metodológico (Figura 4.1), onde as análises foram divididas em quatro partes, correspondendo às perguntas elencadas na **secção 1.1**. O fluxograma também indica o momento em que cada Objetivo Específico (OE) deste trabalho foi atendido. A sazonalidade da ChIF – S(ChIF) foi determinada e analisada para elucidar a pergunta **(1)**. A pergunta **(2)** foi respondida através dos resultados de um Modelo Linear de Regressão Múltipla (MLRM). Esse modelo procurou determinar os efeitos da Precipitação Média Mensal (PMM) e da Radiação Incidente Média Mensal (RMM) sobre a S(ChIF). A partir desse modelo foram determinadas as áreas cuja vegetação florestal é possivelmente associada com a precipitação ou com radiação incidente. Na pergunta **(3)** a Precipitação Média Anual (PMA) das áreas possivelmente associadas com a precipitação ou com a radiação incidente foi obtida. Já a pergunta **(4)** foi elucidada comparando-se os picos máximos da S(ChIF) com as estações secas e úmidas.

Figura 4.1. Fluxograma metodológico.



4.1. Dados de Fluorescência de Clorofila

Neste estudo foi utilizada uma série temporal mensal de fluorescência de clorofila (ChIF), correspondente ao período 2007-2015, obtida partir do produto GOME2_F nível 3 (unidade: $mW/m^2/sr/nm$) - versão 26 (V26) (JOINER et al., 2013). Os dados de ChIF são produzidos a partir do canal 4 do sensor GOME-2 (590-790 nm), com uma resolução espacial de $0,5^\circ$ (JOINER et al., 2013). O produto GOME2_F nível 3 - versão 26(V26) (JOINER et al., 2013) fornece a ChIF obtida a partir da faixa do vermelho ($ChIF_v$) ou do vermelho distante ($ChIF_{vd}$). Optou-se pela utilização $ChIF_{vd}$, pois a intensidade desse sinal é maior e também não é reabsorvido pela vegetação, ao contrário da $ChIF_v$ (WITTENBERGHE et al., 2014).

A componente sazonal dos dados de fluorescência de clorofila – S(ChlF) foi extraída da série temporal de ChlF através do algoritmo *Breaks in Additive Season and Trend* (BFAST) (VERBESSELT et al., 2010), desenvolvido na linguagem R (<http://bfast.R-Forge.R-project.org/>). Esse algoritmo é baseado na decomposição aditiva de séries temporais (VERBESSELT et al., 2010). O algoritmo BFAST não é específico para um determinado tipo de dados, e pode ser aplicado em séries temporais sem a necessidade de normalizá-las em relação à cobertura da terra, selecionar um período de referência ou uma mudança de trajetória (VERBESSELT et al., 2010).

A série temporal é separada nos componentes tendência, sazonalidade e resíduos. O BFAST foi aplicado com o objetivo de excluir ruídos e *outliers* da série temporal de ChlF. Apenas a componente sazonal foi utilizada neste estudo, assim a aplicação do BFAST também foi útil para excluir as variações relacionadas a possíveis tendências na série temporal. A decomposição de uma série temporal a partir desse algoritmo pode ser representada pela seguinte fórmula:

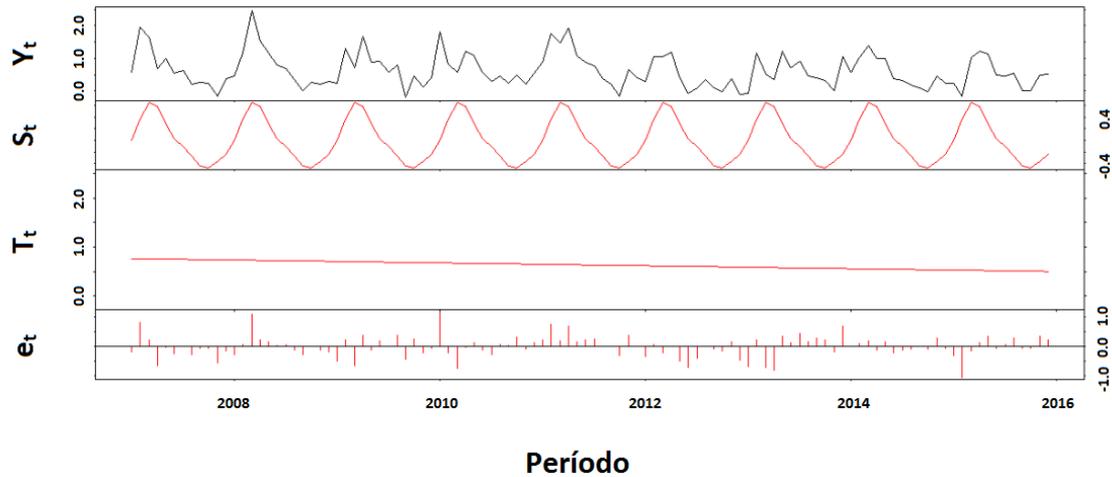
$$Y_t = S_t + T_t + e_t \quad (3.1)$$

Onde:

Y_t são os dados observados em um determinado tempo t , T_t é o componente de tendência, S_t é o componente sazonal e e_{t_n} é o componente residual.

A componente sazonal de fluorescência de clorofila - S(ChlF) foi gerada pelo BFAST com uma frequência igual a 12, devido à resolução mensal dos dados. O valores da S(ChlF) indicam a variação intra-anual da ChlF mensal, o que também foi usado para obter os meses em que ocorrem os picos máximos de S(ChlF). Como exemplo, a Figura 4.2 mostra as componentes de sazonalidade, tendência e resíduos geradas pela aplicação do BFAST em um pixel da série temporal de ChlF, localizado em longitude e latitude de 62,5°W e 4,3°S, respectivamente.

Figura 4.2. Componentes geradas pela aplicação do BFAST em um pixel da série temporal de fluorescência de clorofila (ChlF).



A série temporal original de ChlF para um pixel é mostrada acima (Y_t), seguida das componentes de sazonalidade (S_t) – que corresponde à $S(\text{ChlF})$, tendência (T_t) e resíduos(et_n).

Pixels sem informação ocorrem no produto GOME2_F quando há poucas observações para o respectivo mês, provavelmente devido à presença de nuvens (JOINER et al., 2013). Os pixels sem informação foram representados como *No Data* e foram substituídos pela média gerada a partir dos valores de uma janela 3×3 , centrada no próprio pixel definido como *No Data*. Pixels definidos como *No Data* ocorreram apenas em 2015 no produto GOME2_F e representaram menos do que 0,001% da área de estudo. Foi quantificado o número de observações por mês para cada pixel do produto GOME2_F e calculada a média anual de observações, para avaliar as incertezas relacionadas com a disponibilidade dos dados.

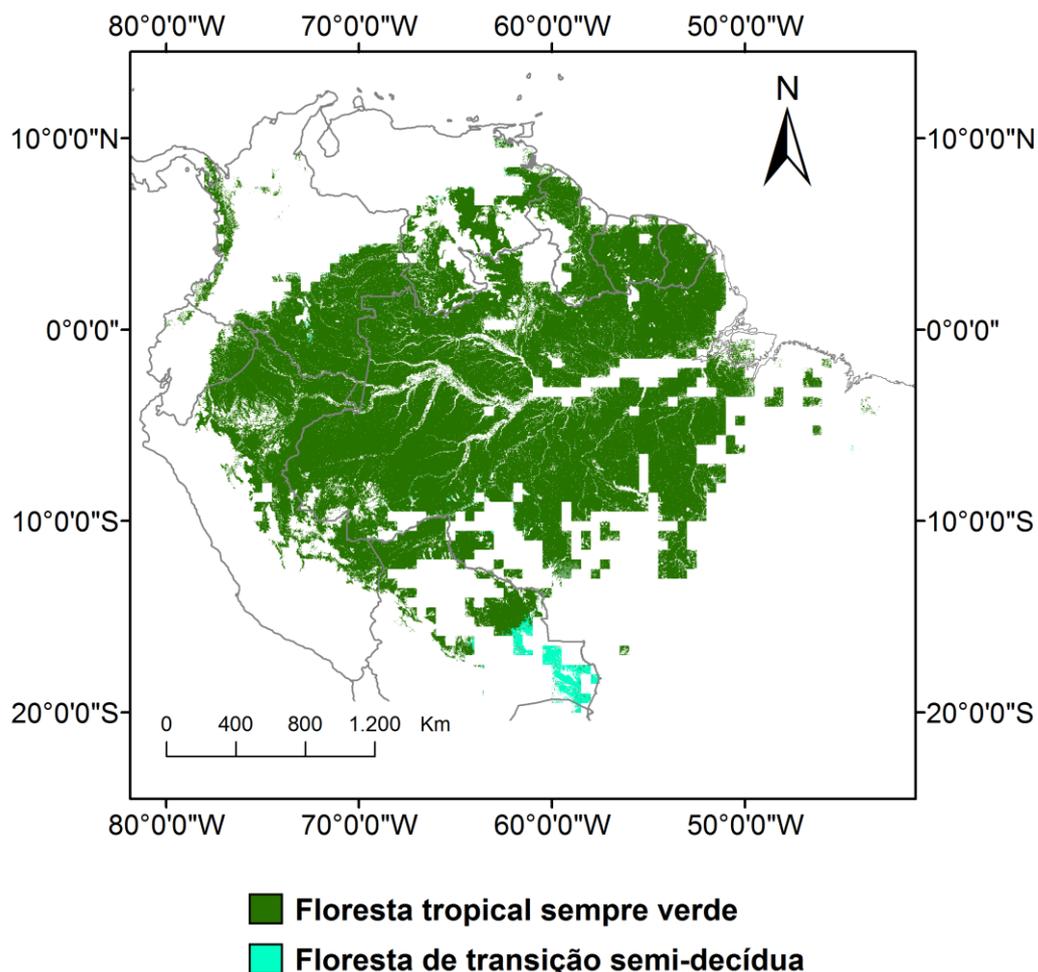
4.2. Máscara de floresta

As regiões florestais na área de estudo foram definidas através dos produtos *treecover2000* e *Global Forest Cover Loss* (2000 a 2014), ambos obtidos do *Global Forest Change Project* (GFCP) (HANSEN et al., 2013). O produto *Treecover2000* representa a porcentagem de cobertura florestal para o ano 2000, e varia de 0 a 100%. Já o produto *Global Forest Cover Loss* (2000 a 2014) representa as áreas desmatadas entre 2000 e

2014. Tanto o *Treecover2000* como o *Global Forest Cover Loss* possuem uma resolução espacial de 30 m.

Um mapa de tipos de vegetação do *Global Land Cover 2000* (<http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/glc2000-.php>) também foi obtido. Dois tipos principais de vegetação foram observados na área de estudo: florestas tropicais sempre verdes e florestas de transição semi-decíduas. Os tipos restantes (áreas agrícolas, urbanização, etc.) foram excluídos. O mapa de tipos de vegetação é apresentado na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Tipos de vegetação dominantes que ocorrem na área de estudo.



4.3. Dados Climáticos

Os dados mensais de precipitação ($\text{mm}\cdot\text{mês}^{-1}$) para o período entre 2007 e 2015 foram obtidos a partir do produto TRMM-3B43V7/TMPA (HUFFMAN et al., 2007), que possui uma resolução espacial de $0,25^\circ$. O

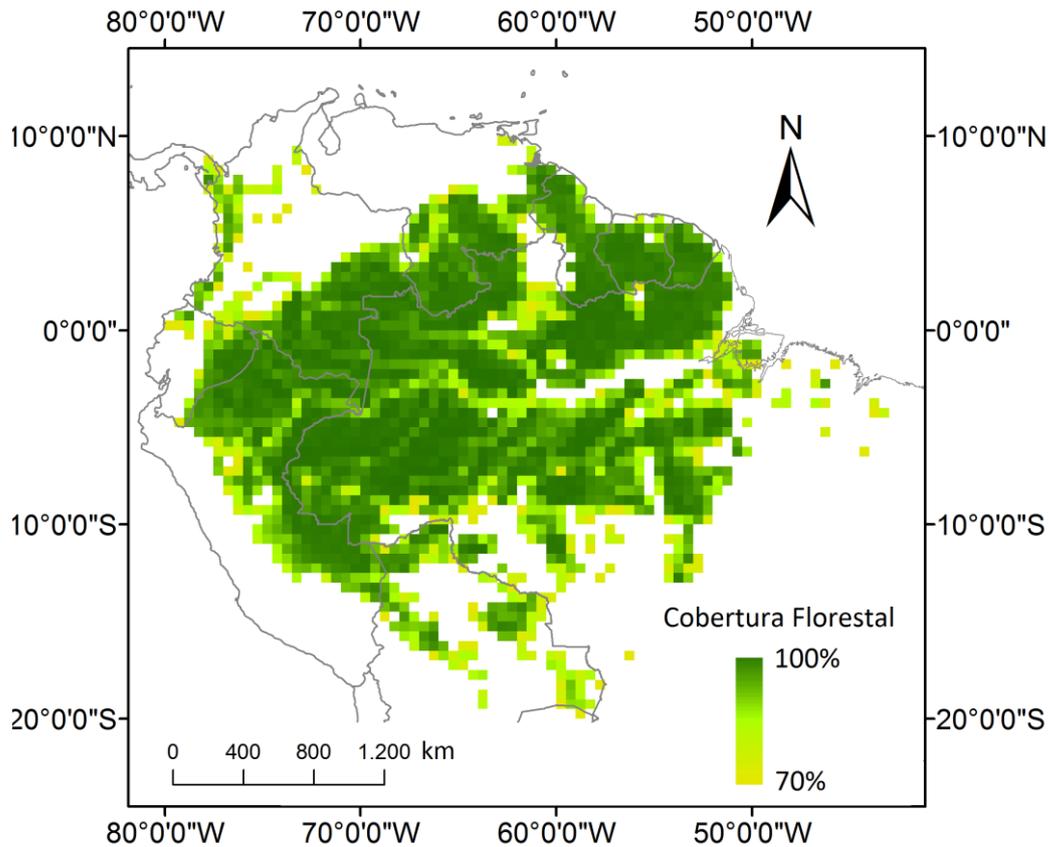
TRMM foi uma missão conjunta entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA). O nome TRMM se refere tanto à missão quanto ao satélite usado para coletar os dados. Foi projetada para monitorar e estudar a precipitação e a liberação de energia associada, nas regiões tropicais e subtropicais. A missão fez uso de cinco instrumentos: radar de precipitação (PR), TRMM *Microwave Imager* (TMI), visor de infravermelho visível (VIRS), *Clouds & Earths Radiant Energy System* (CERES) e *Lightning Imaging Sensor* (LIS). As atividades dessa missão terminaram em 2015, porém o produto TRMM-3B43/TMPA continua a ser produzido com os dados gerados pela *Global Precipitation Mission* (GPM), que também é um projeto conjunto entre a NASA e a JAXA.

Já os dados de radiação foram obtidos a partir de um produto de reanálise GLDAS (RODELL et al., 2004). O produto GLDAS usado neste artigo corresponde à radiação mensal de ondas curtas incidente sobre a superfície ($W \cdot m^{-2}$) - Versão 1, que possui uma resolução espacial de $0,25^\circ$ e é gerado através do modelo de superfície terrestre *Noah* (KOREN et al., 1999). O GLDAS é desenvolvido em conjunto pela *Goddard Space Flight Center* (GSFC) e pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), e consiste em um sistema de modelagem terrestre global que integra dados satelitais com observações realizadas na superfície, cujo objetivo é fornecer informações acerca de fluxos e do estado da superfície terrestre (RODELL et al., 2004; ROMANGUERA et al., 2012).

4.4. Preparação dos dados

O dado *treecover2000* foi integrado com o produto *Global Forest Cover Loss* (HANSEN et al., 2013), para excluir as áreas desmatadas entre 2000-2014, e formar o dado de cobertura florestal. A Figura 4.4 mostra o dado de cobertura florestal (apenas os valores superiores a 70%) na área de estudo, em uma resolução de $0,5^\circ$.

Figura 4.4. Proporção da cobertura florestal (apenas os valores superiores a 70%) na área de estudo.



Em seguida, os conjuntos de dados climáticos - resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ - e de cobertura florestal - resolução espacial de 30m - foram reamostrados a partir do cálculo de suas médias para uma grade de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, que corresponde à resolução espacial original dos dados GOME2_F. A Precipitação Média Anual (PMA) e a Precipitação Média Mensal (PMM) foram obtidas pela média dos valores anuais e mensais do produto TRMM-3B43V7, respectivamente, entre 2007-2015. A Radiação Média Mensal de ondas curtas incidente sobre a superfície (RMM) foi obtida pela média dos valores mensais do produto GLDAS, entre 2007-2015.

O dado de cobertura florestal foi aplicado ao conjunto de dados. Os pixels que correspondem a uma cobertura florestal abaixo de 70% foram excluídos da análise. O limiar de 70% para a cobertura florestal foi

definido devido à baixa resolução espacial do produto GOME2_F, pois geralmente engloba áreas sem floresta dentro dos pixels.

Posteriormente foram calculadas as variações médias anuais da sazonalidade da fluorescência de clorofila – S(ChlF), como mostra a equação 3.2. Cada mês teve somado valor de (+1) porque alguns valores de S(ChlF) são próximos a zero, o que superestimaria as taxas de variação. Assim, esses resultados não são demonstrados em porcentagem, e sim como uma medida aproximada de variabilidade da S(ChlF).

$$Var = \frac{\sum_{n=1}^{12} \left(\frac{M_{n+1+1} - M_{n+1}}{M_{n+1}} \right) \times 100}{12} \quad (3.2)$$

Onde:

Var = Variação média anual da sazonalidade.

M_n = Mês considerado.

As estações secas foram definidas a partir dos meses com Precipitação Média Mensal (PMM) abaixo de 100 mm, com o objetivo de analisar a relação entre a máxima sazonalidade da fluorescência de clorofila – S(ChlF) e os períodos de estação seca na floresta amazônica. Essa aproximação é baseada em valores médios de evapotranspiração, coletados em campo na Amazônia (DA ROCHA et al., 2004; SHUTTLEWORTH et al., 1988; VON RANDOW et al., 2004). Além disso, o comprimento médio anual da estação seca foi obtido para cada pixel.

4.5. Aplicação do modelo

Para um determinado pixel *i*, um número de pixels *n* e um mês *t*, a sazonalidade da fluorescência da clorofila - S(ChlF) - foi modelada a partir de um Modelo Linear de Regressão Múltipla (MLRM) (Equação 3.3). Os coeficientes de precipitação e radiação foram restringidos apenas a valores positivos, porque a precipitação e a radiação não são fatores limitantes para a fotossíntese na Amazônia (GUAN et al., 2015; WAGNER et al., 2017).

$$S(ChlF)_{t=1:12,i} \sim \alpha_{0,i} + \alpha_{1,i} \times Rad_{t=1:12,i} + \alpha_{2,i} \times Pre_{t=1:12,i} + \varepsilon_i \quad (3.3)$$

$$\alpha_{0,i=1:n} \in]-\infty; +\infty[$$

$$\alpha_{1,i=1:n} \in [0; +\infty[$$

$$\alpha_{2,i=1:n} \in [0; +\infty[$$

$$\varepsilon_{i=1:n} \sim N(0, \sigma^2)$$

Onde:

α_0 = Intercepto da regressão.

α_1 = Coeficiente de radiação.

α_2 = Coeficiente de precipitação.

ε_i = Resíduos.

Rad = Radiação Média Mensal de ondas curtas incidente sobre a superfície (RMM) correspondente ao mês *i*.

Pre = Precipitação Média Mensal (PMM) correspondente ao mês *i*.

O coeficiente de determinação (R^2) foi calculado para cada pixel *i* (Equação 3.3). Além disso, analisou-se a correlação linear entre cada preditor (Radiação ou Precipitação) e a sazonalidade da fluorescência da clorofila -S(ChlF). Esta correlação foi obtida através da aplicação de um modelo reduzido, onde um dos preditores foi omitido. As áreas possivelmente associadas com a precipitação ou com a radiação foram obtidas através da análise do R^2 resultante do modelo reduzido. O modelo reduzido utilizado para a obtenção do R^2 que mostra a relação linear entre a radiação e a S(ChlF) foi obtido atribuindo-se um valor igual a zero ao coeficiente de precipitação, como mostra a Equação (3.4):

$$S(\text{ChlF})r_{t=1:12,i} \sim \alpha_{r0,i} + \alpha_{r1,i} \times \text{Rad}_{t=1:12,i} + \varepsilon_i \quad (3.4)$$

Onde:

$S(\text{ChlF})r$ = sazonalidade da ChlF obtida através da radiação.

α_{r0} = Intercepto da relação linear entre radiação e S(ChlF).

α_{r1} = Coeficiente de radiação da relação linear entre radiação e S(ChlF).

Da mesma forma, o modelo reduzido para a obtenção do R^2 que mostra a relação linear entre a precipitação e a S(ChlF) foi obtido atribuindo-se um valor igual a zero ao coeficiente de radiação, como mostra a Equação (3.5):

$$S(\text{ChlF})p_{t=1:12,i} \sim \alpha_{p0,i} + \alpha_{p1,i} \times \text{Pre}_{t=1:12,i} + \varepsilon_i \quad (3.5)$$

Onde:

$S(\text{ChlF})_p$ = sazonalidade da ChlF obtida através da precipitação.

α_{p0} = Intercepto da relação linear entre precipitação e $S(\text{ChlF})$.

α_{p1} = Coeficiente de precipitação da relação linear entre precipitação e $S(\text{ChlF})$.

Os coeficientes do modelo para cada pixel foram estimados pela minimização de uma função de verossimilhança logarítmica (*log-likelihood*) negativa. Uma matriz de covariância aproximada para os parâmetros foi obtida invertendo-se uma matriz de *Hessian*. Um intervalo de confiança de 95% foi definido para testar a significância de um teste bilateral (p -valor < 0,025). Os erros padrão utilizados para determinar o intervalo de confiança foram obtidos pelas raízes quadradas dos elementos diagonais da matriz de covariância. O modelo também foi aplicado com um, dois ou três meses de atraso na radiação (Rad) em relação à $S(\text{ChlF})$, para testar a sincronia entre a $S(\text{ChlF})$ e o aumento da radiação incidente:

$$S(\text{ChlF}_{\text{Rlag}})_{t=1:12,i} \sim \alpha_{r10,i} + \alpha_{r11,i} \times \text{Rad}_{t=(1:12)-\text{lag},i} + \alpha_{r12,i} \times \text{Pre}_{t=1:12,i} + \varepsilon_i \quad (3.6)$$

Onde:

$S(\text{ChlF}_{\text{Rlag}})$ = sazonalidade da ChlF obtida através dos atrasos aplicados sobre a radiação.

$\alpha_{r10,i}$ = Intercepto da regressão aplicada com atraso na radiação.

$\alpha_{r11,i}$ = Coeficiente de radiação da regressão aplicada com atraso na radiação.

$\alpha_{r12,i}$ = Coeficiente de precipitação da regressão aplicada com atraso na radiação.

O modelo também foi aplicado com um, dois ou três meses de atraso na precipitação (Pre) em relação à $S(\text{ChlF})$, para testar a sincronia entre a $S(\text{ChlF})$ e o aumento da precipitação:

$$S(\text{ChlF}_{\text{Plag}})_{t=1:12,i} \sim \alpha_{p10,i} + \alpha_{p11,i} \times \text{Rad}_{t=1:12,i} + \alpha_{p12,i} \times \text{Pre}_{t=(1:12)-\text{lag},i} + \varepsilon_i \quad (3.7)$$

Onde:

$S(\text{ChlF}_{\text{Plag}})$ = sazonalidade da ChlF obtida através dos atrasos aplicados sobre a precipitação.

$\alpha_{p10,i}$ = Intercepto da regressão aplicada com atraso na precipitação.

$\alpha_{pl1,i}$ = Coeficiente de radiação da regressão aplicada com atraso na precipitação.

$\alpha_{pl2,i}$ = Coeficiente de precipitação da regressão aplicada com atraso na precipitação.

Os modelos reduzidos também foram aplicados com um, dois ou três meses de atraso. Os atrasos foram aplicados para melhorar o desempenho do modelo caso o aumento da S(ChIF) seja assíncrono com o aumento da radiação incidente ou com o aumento da precipitação.

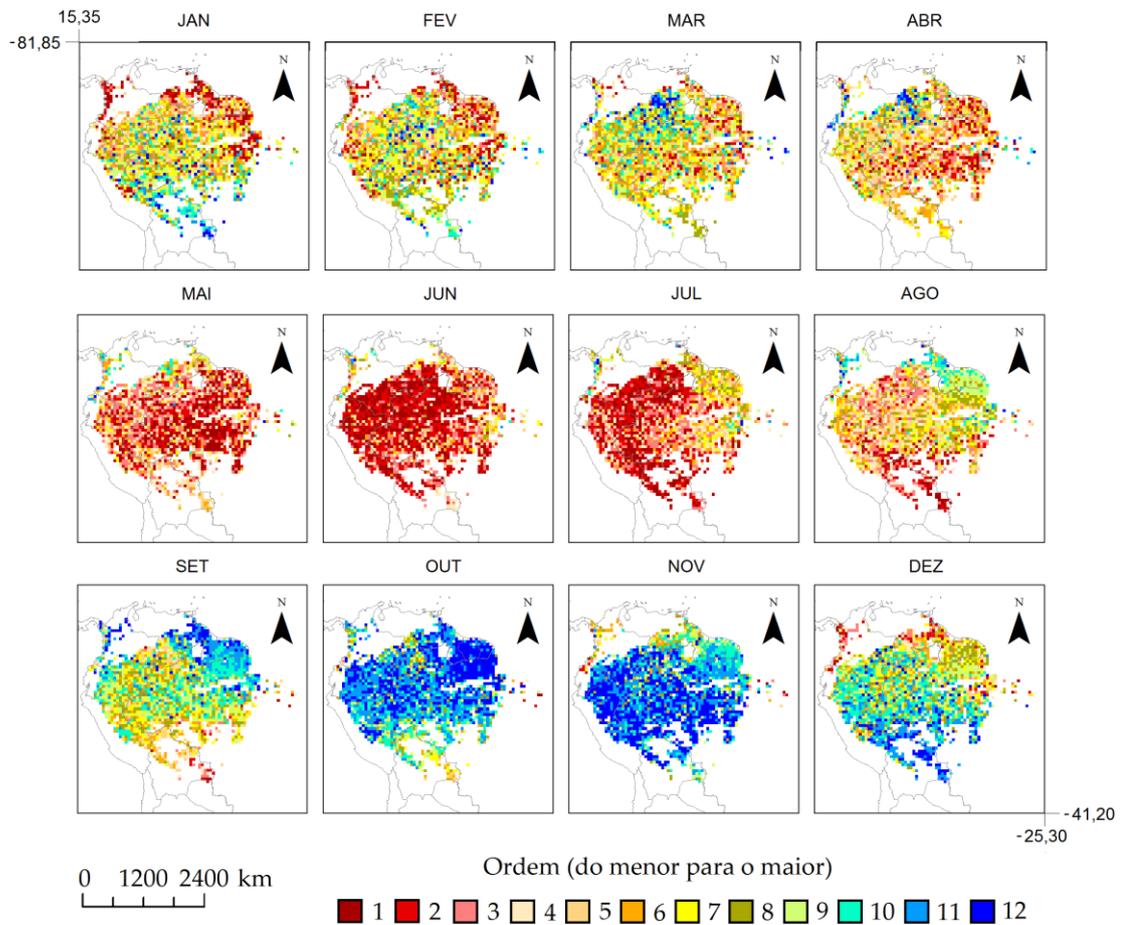
Assim, o melhor modelo de S(ChIF) foi estimado utilizando-se atrasos de 0, 1, 2 ou 3 meses na radiação ou na precipitação, para cada pixel i . Foram descartados os pixels onde a radiação e a precipitação aplicadas com atraso apresentaram correlação acima de um limiar de 0,5. Esse processo teve o objetivo de evitar correlações positivas introduzidas pelos atrasos onde não existem correlações entre radiação e precipitação, ou onde essas correlações são negativas.

5 RESULTADOS

5.1. Caracterização espaço-temporal da sazonalidade da fluorescência da clorofila - S(ChIF)

Os padrões espaço-temporais da sazonalidade da fotossíntese - S(ChIF) na Amazônia são apresentados na Figura 5.1. Essa figura dimensiona o quão alto é o valor de S(ChIF) em um determinado mês, em relação aos valores de S(ChIF) dos demais meses, para cada pixel. O extremo sul, a parte central e o escudo das guianas possuem um padrão espacial bem definido. No extremo sul a S(ChIF) começa a aumentar em setembro e atinge seu valor máximo entre dezembro e janeiro. Já na Amazônia central e no escudo das guianas a S(ChIF) começa a aumentar em julho e atinge seus valores máximos entre setembro e outubro. Enquanto na Amazônia central os valores máximos de S(ChIF) ocorrem em setembro ou outubro, no escudo das guianas os valores máximos de S(ChIF) ocorrem apenas em outubro e formam um padrão espacial contínuo.

Figura 5.1 – Ordem crescente dos valores de sazonalidade da fluorescência de clorofila - S(ChIF) na área de estudo.

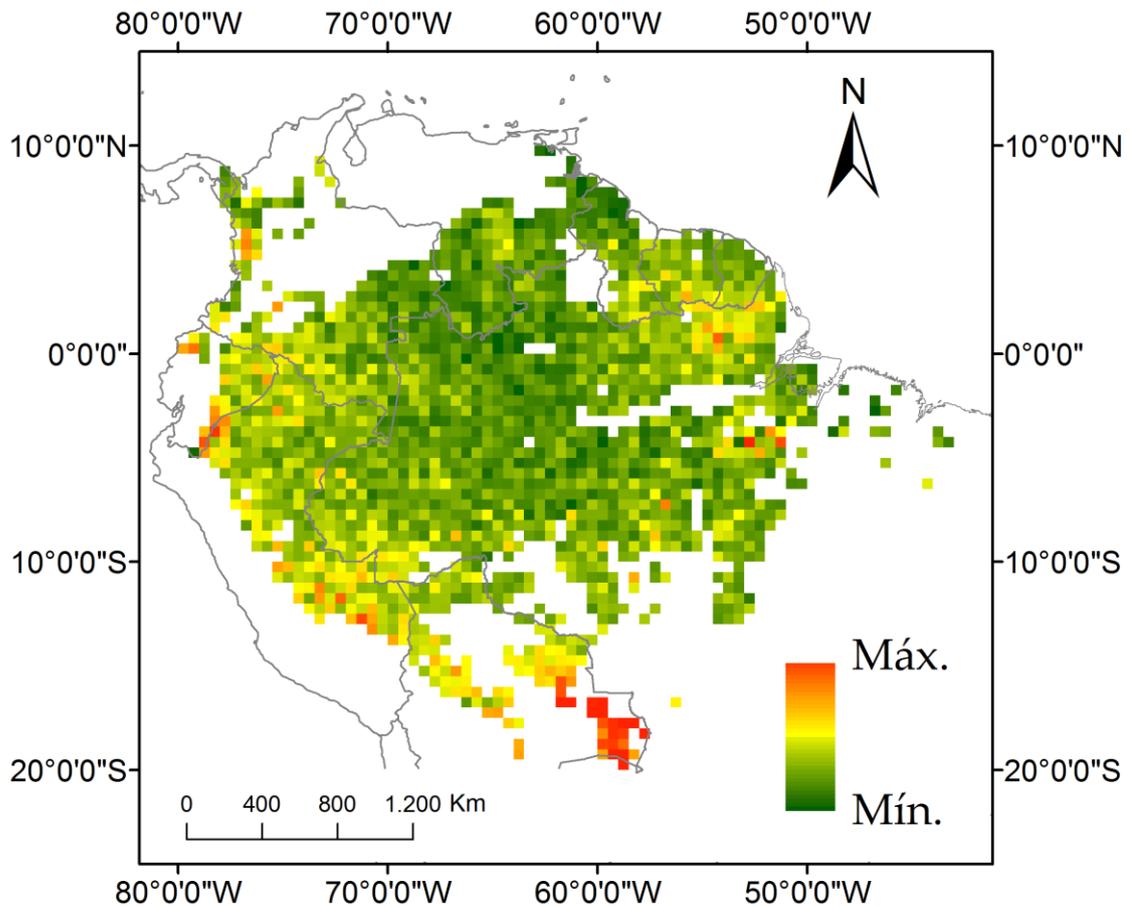


Essa figura consiste no ordenamento crescente dos valores de S(ChIF) em cada mês. Por exemplo, em Janeiro os pixels com valores iguais a 12 indicam que o maior valor da S(ChIF) para esse pixel ocorre nesse mês, o valor igual a 1 indica que o menor valor da S(ChIF) para esse pixel ocorre nesse mês, e assim por diante.

5.2. Taxas de variação da sazonalidade da fluorescência de clorofila S – (ChIF)

As maiores taxas de variação na sazonalidade da fluorescência de clorofila - S(ChIF) (obtida pela Equação 3.2) ocorreram no sul da Amazônia (Figura 5.2). Já na porção central e no norte da Amazônia houve menor variação na S(ChIF). Valores intermediários de variação da S(ChIF) foram encontrados no escudo das guianas e no extremo oeste da Amazônia.

Figura 5.2 – Variação média anual da sazonalidade da fluorescência de clorofila – S(ChIF).



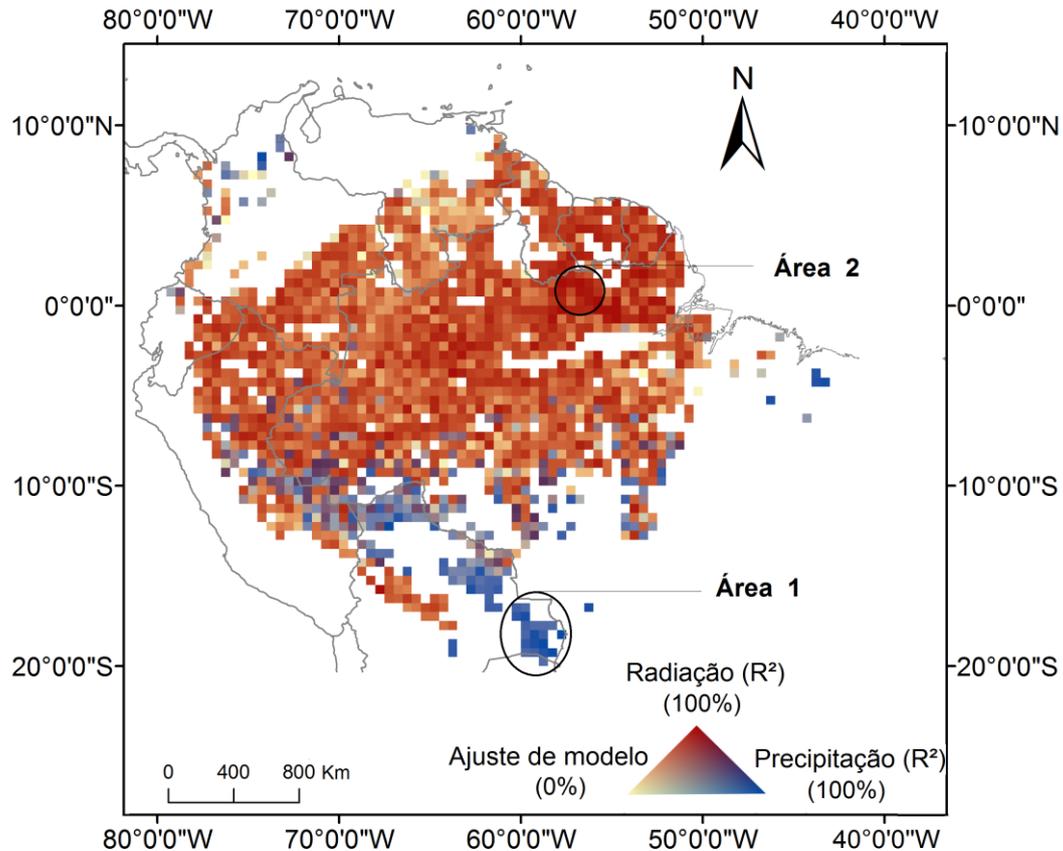
As variações médias anuais são mostradas em uma escala de cores que vão do verde (Variação mínima) ao vermelho (Variação máxima). Essa figura foi gerada a partir da Equação 3.2.

5.3. Relação entre as variáveis climáticas (precipitação ou radiação) e a sazonalidade da fluorescência de clorofila – S(ChIF)

O modelo (Equação 3.3) estimou coeficientes de precipitação ou radiação significativos para 83% dos pixels analisados. Isso equivale a uma área de 4.695.000 km². Entre esses pixels, 76% (3.857.000 km²) mostraram uma relação positiva maior entre a sazonalidade da fluorescência da clorofila -S(ChIF) e a radiação (Figura 5.3) - S(ChIF) associada com a radiação, ou seja, o R² foi maior no modelo reduzido com o coeficiente de precipitação igual a zero (Equação 3.4) do que no modelo reduzido com o

coeficiente de radiação igual a zero (Equação 3.5). Essas áreas estão localizadas predominantemente acima de 7°S de latitude. Apenas 13% dos pixels (462.000 km²) tiveram uma relação positiva maior entre S(ChIF) e precipitação - S(ChIF) associada com a precipitação, ou seja, o R² foi maior no modelo reduzido com o coeficiente de radiação igual a zero (Equação 3.5) do que no modelo reduzido com o coeficiente de precipitação igual a zero (Equação 3.4). Tais áreas estão concentradas predominantemente no sudoeste e extremo sul da Amazônia. Nos pixels restantes (11% ou 376.000 km²) as relações entre S(ChIF) e precipitação e entre S(ChIF) e radiação foram idênticas. Essas áreas estão localizadas principalmente na parte ocidental da Amazônia. As variáveis de precipitação e radiação são altamente correlacionadas nessas áreas, portanto não foi possível identificar qual é a melhor variável para fazer a predição da S(ChIF).

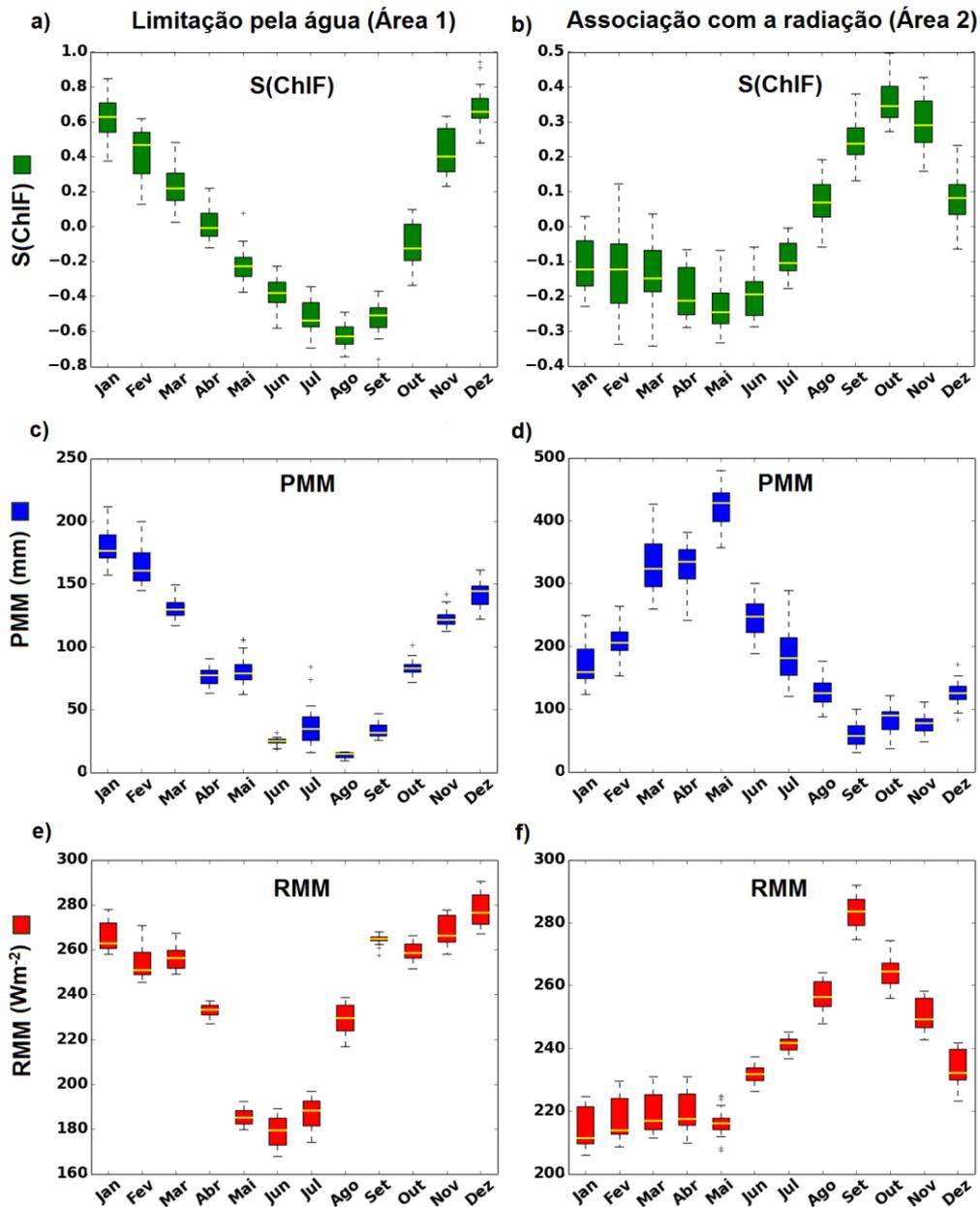
Figura 5.3 - Padrões espaciais dos preditores da sazonalidade da fluorescência de clorofila - S(ChlF).



Os padrões espaciais dos preditores climáticos da S(ChlF) são representados pelo R^2 obtido através da relação da S(ChlF) com cada preditor (Equações 3.4 e 3.5). As áreas 1 e 2 representam regiões associadas à precipitação e à radiação, respectivamente. Os pixels que compõem essas áreas foram utilizados para analisar as relações entre a S(ChlF) e as médias mensais das variáveis climáticas, mostradas na Figura 5.4.

O extremo sul da Amazônia é um exemplo de região onde a sazonalidade da fluorescência da clorofila - S(ChlF) aumenta em consonância com a precipitação (Área 1 da Figura 5.3). O pico máximo da S(ChlF) ocorre em janeiro, quando a precipitação é máxima (Figura 5.4 A, C). Nessa região a precipitação e a radiação incidente são correlacionadas. Por outro lado, na região nordeste da Amazônia (Área 2 da Figura 5.3), a S(ChlF) está associada à radiação. Nessa região o pico máximo da S(ChlF) ocorre em outubro, um mês após o pico de radiação (Figura 5.4 B, F).

Figura 5.4 – Sazonalidade da fluorescência de clorofila - S(ChlF) (A,B), Precipitação Média Mensal (PMM) (C, D) e Radiação Média Mensal de ondas curtas incidente sobre a superfície (RMM) (E, F) dos pixels que compõem as áreas 1 e 2 indicadas na Figura 5.3.

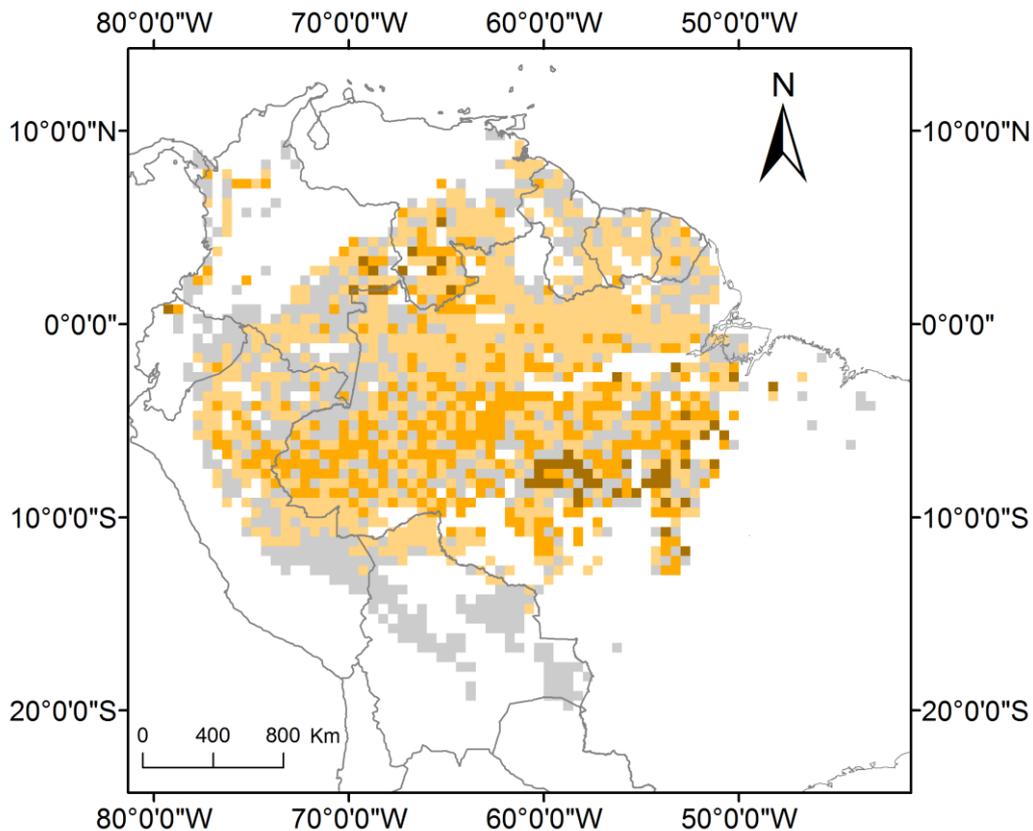


Os valores dos pixels de sazonalidade da fluorescência de clorofila - S(ChlF), Precipitação Média Mensal (PMM) e Radiação Média Mensal de ondas curtas incidente sobre a superfície (RMM) nas áreas 1 e 2 são plotados para cada mês (Eixo X). Os extremos superiores e inferiores dos *boxplots* mostram o 75º e o 25º percentis dos valores dos pixels para cada variável, respectivamente, enquanto as linhas amarelas indicam o 50º percentil. A reta estendida verticalmente (*whisker*) superior (inferior) delimita o valor mais extremo contido no limite definido pela soma (diferença) entre o 75º (25º) percentil e a diferença entre o

75º e o 25º percentil multiplicados por 1.5. Os *outliers* (círculos pretos) representam valores fora dos limites definidos pelas retas estendidas verticalmente (*whiskers*).

Os atrasos aplicados na precipitação pioraram os resultados do modelo. O R^2 médio do modelo foi 30% menor com atraso de um mês na precipitação, em relação ao R^2 médio obtido sem atrasos. Além disso, o R^2 médio do modelo foi próximo de zero com a aplicação de atrasos de dois ou três meses. Já os atrasos aplicados na radiação melhoraram os resultados do modelo (Figura 5.5). O R^2 médio do modelo foi 29% maior com o atraso de um mês na radiação, principalmente na Amazônia central, em relação ao R^2 médio obtido sem atrasos. O R^2 médio do modelo com 2 meses de atraso na radiação foi 8% maior do que em relação ao R^2 médio obtido sem atrasos. Embora o modelo aplicado com 3 meses atrasos na radiação tenha piorado de forma geral os resultados do modelo - o R^2 médio piorou em 22% - algumas áreas no sudeste e no norte apresentaram melhora nos resultados do modelo (Figura 5.5). No sul da Amazônia (13% ou 462.000 km²) a aplicação dos atrasos na radiação não melhorou os resultados do modelo.

Figura 5.5 - Melhor desempenho do modelo aplicando um, dois, três ou nenhum mês de atraso na radiação.



Melhor desempenho do modelo:

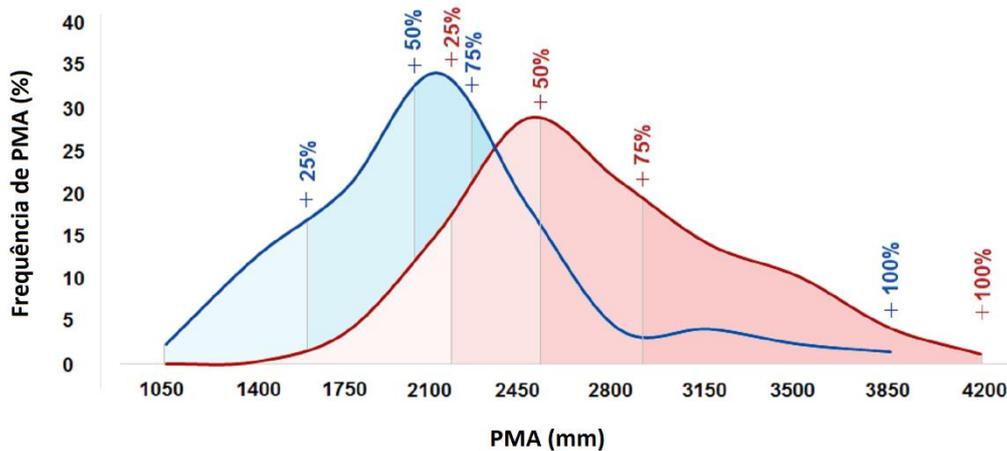
- Sem nenhum mês de atraso aplicado sobre a radiação
- Com um mês de atraso aplicado sobre a radiação
- Com dois meses de atraso aplicados sobre a radiação
- Com três meses de atraso aplicados sobre a radiação

5.4. Caracterização do regime de Precipitação Média Anual (PMA) das áreas cuja sazonalidade da fluorescência de clorofila - S(ChlF) é associada com a radiação ou com a água

A sazonalidade da fluorescência de clorofila - S(ChlF) associada à precipitação foi observada em áreas com Precipitação Média Anual (PMA) média de 2000 mm·ano⁻¹ (Figura 5.6). Aproximadamente 95% das áreas onde a S(ChlF) foi associada à precipitação possuem PMA entre 1100 mm ano⁻¹ e 3300 mm·ano⁻¹. A PMA média é de 2600 mm·ano⁻¹ nas áreas onde a S(ChlF) está associada à radiação, e varia de 1800 mm·ano⁻¹ a 3600 mm·ano⁻¹ em 95% dessas áreas. Portanto, a diferença entre os valores médios de PMA onde a S(ChlF) é associada à radiação e onde a

S(ChIF) é associada à precipitação é de 600 mm·ano⁻¹, significativa a 95% de confiança.

Figura 5.6 - Frequências acumuladas da Precipitação Média Anual (PMA) nas áreas onde a sazonalidade da ChIF – S(ChIF) é associada à precipitação ou à radiação.



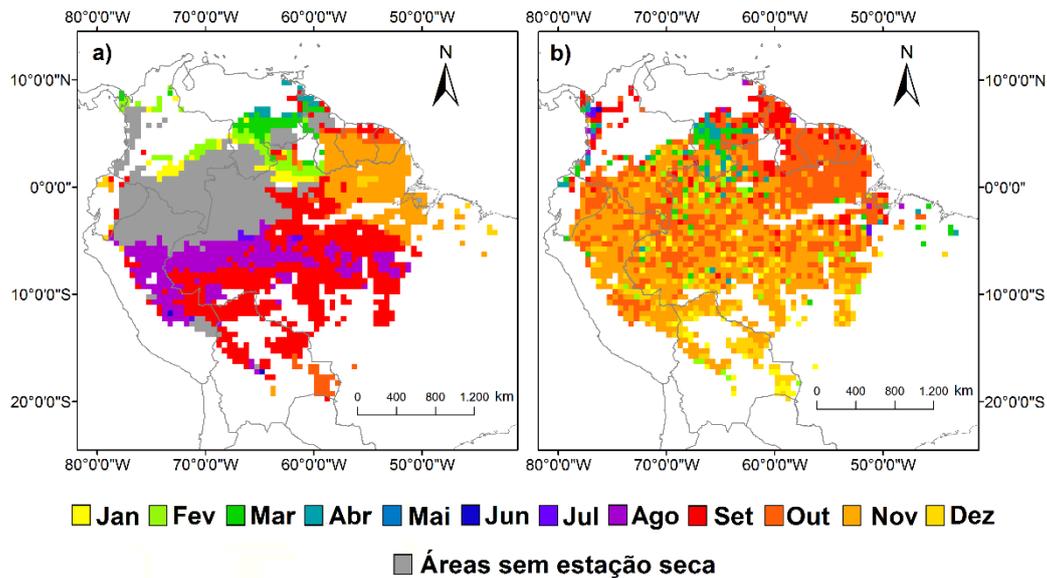
Frequências acumuladas de PMA nas áreas onde a S(ChIF) é associada com:

Precipitação 0-25% 25-50% 50-75% 75-100%
 Radiação 0-25% 25-50% 50-75% 75-100%

— Frequências acumuladas de PMA nas áreas onde a S(ChIF) é associada com precipitação
 — Frequências acumuladas de PMA nas áreas onde a S(ChIF) é associada com radiação

Estima-se que haja pelo menos um mês de estação seca durante o ano em 72% da área de estudo (4.053.000 km²) (Figura 5.7, A). A estação seca termina principalmente entre agosto e setembro em 62,67% (2.543.000 km²) das áreas onde existe estação seca, predominantemente na região central. Na parte norte da bacia a estação seca termina principalmente entre janeiro e abril, e corresponde a 13% (523.000 km²) das áreas com estação seca. Na região nordeste a estação seca termina principalmente em novembro e dezembro, o que representa 19% das áreas com estação seca (786.000 km²). A estação seca termina em outubro no sul da Amazônia e representa 4% (aproximadamente 177.000 km²) das áreas onde existe estação seca. No restante das áreas a estação seca termina principalmente entre junho e julho.

Figura 5.7 - (a) Último mês da estação seca extraído da Precipitação Média Mensal de (PMM). (b) Meses onde a sazonalidade da fluorescência da clorofila – S(ChIF) é máxima.



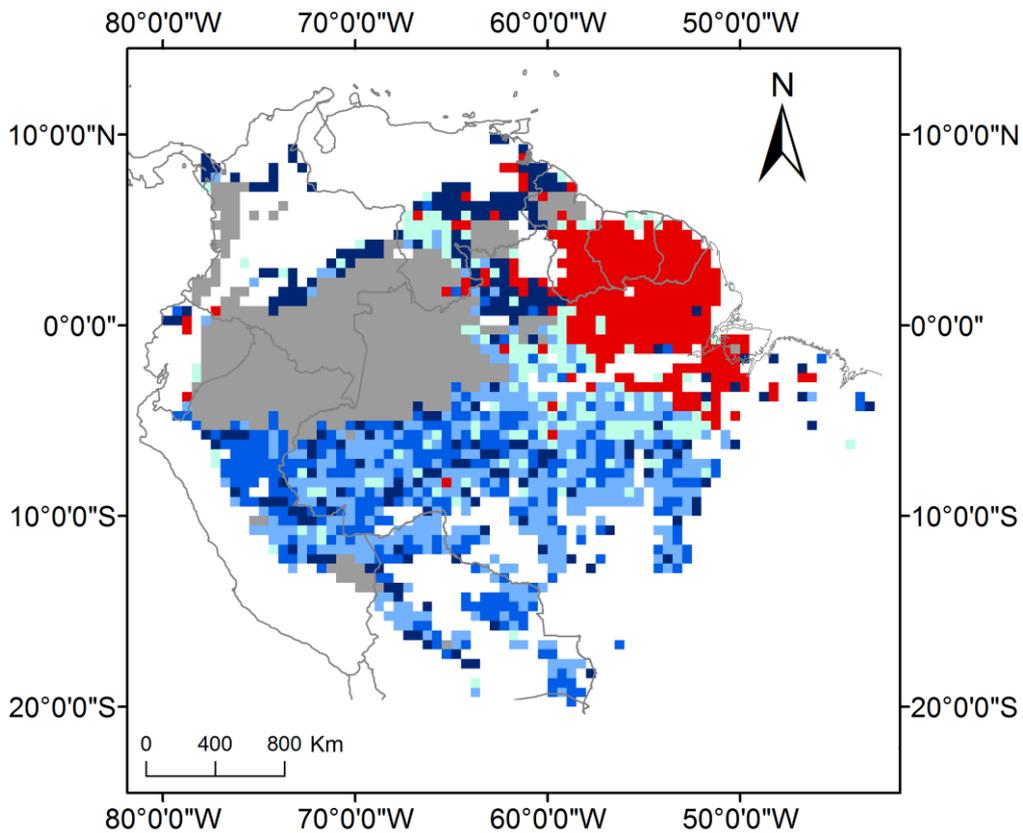
Os valores máximos de S(ChIF) ocorrem entre setembro e dezembro em 88% da floresta amazônica (Figura 5.7, B), o que corresponde a uma área de 4.939.000 km². A S(ChIF) máxima que ocorre neste período tende a ser concentrada em diferentes locais da bacia. As áreas cujos picos máximos de S(ChIF) ocorrem em outubro situam-se predominantemente na região nordeste, enquanto as áreas cujos picos máximos de S(ChIF) ocorrem em dezembro são mais restritas ao sul. Já no norte da Amazônia os picos máximos de S(ChIF) tendem a ocorrer em setembro. As áreas onde os picos máximos de S(ChIF) ocorrem em novembro são mais espalhadas e não formam um padrão espacial definido.

5.5. Picos máximos de sazonalidade da fluorescência da fotossíntese - S(ChIF) na Amazônia

Cerca de 58% (3.270.000 km²) das áreas de floresta com pelo menos um mês de estação seca apresentaram picos máximos de sazonalidade da fluorescência da fotossíntese - S(ChIF) na estação úmida (Figura 5.8). O pico máximo de S(ChIF) ocorreu de um a três meses após o término da estação seca na maior parte dessas áreas (75% ou 2.470.000 km²). Nas demais áreas com estação seca (25% ou 801.000 km²) o pico máximo de

S(ChlF) ocorreu quatro meses ou mais após o término da estação seca. O pico máximo de S(ChlF) ocorreu durante a estação seca em apenas 14% da floresta amazônica (810.000 km²). As áreas sem estação seca (28% da floresta amazônica ou 1.589.000 km²) estão localizadas principalmente no noroeste da área de estudo. O pico máximo de S(ChlF) ocorre principalmente em outubro ou novembro (Figura 5.8 B) nessas áreas.

Figura 5.8 – Picos máximos de sazonalidade da fluorescência de clorofila S(ChlF) e sua relação com as estações secas e úmidas.



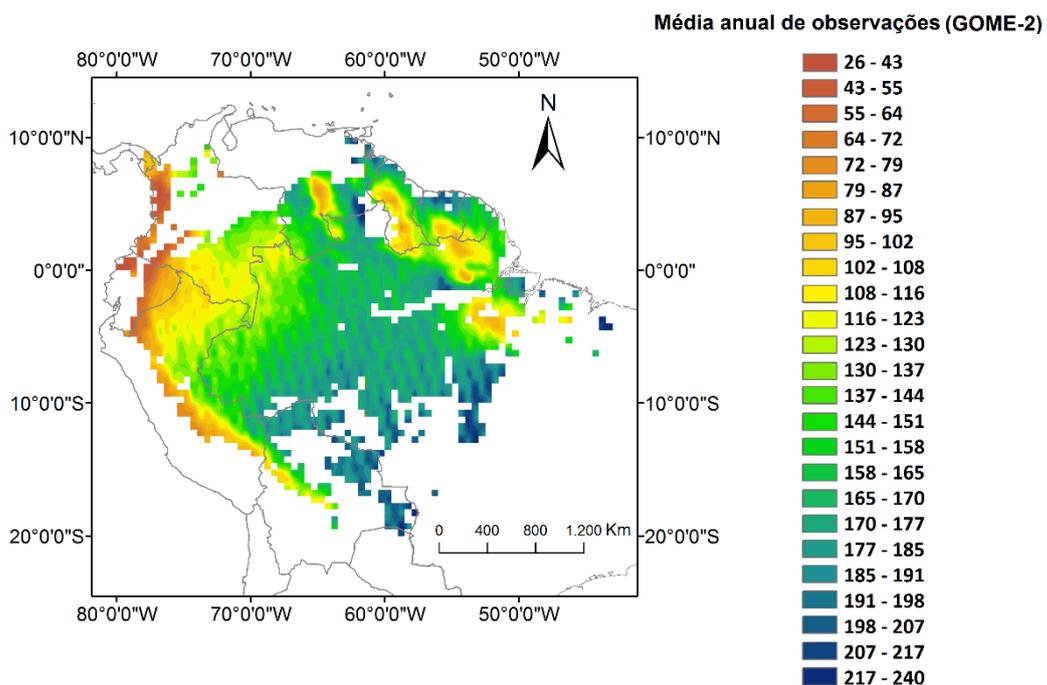
Máxima S(ChlF) ocorre:

- Durante a estação seca
- 1 mês após o final da estação seca
- 2 meses após o final da estação seca
- 3 meses após o final da estação seca
- 4 meses ou mais após o final da estação seca
- Áreas sem estação seca

5.6. Média anual de observações do sensor Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2)

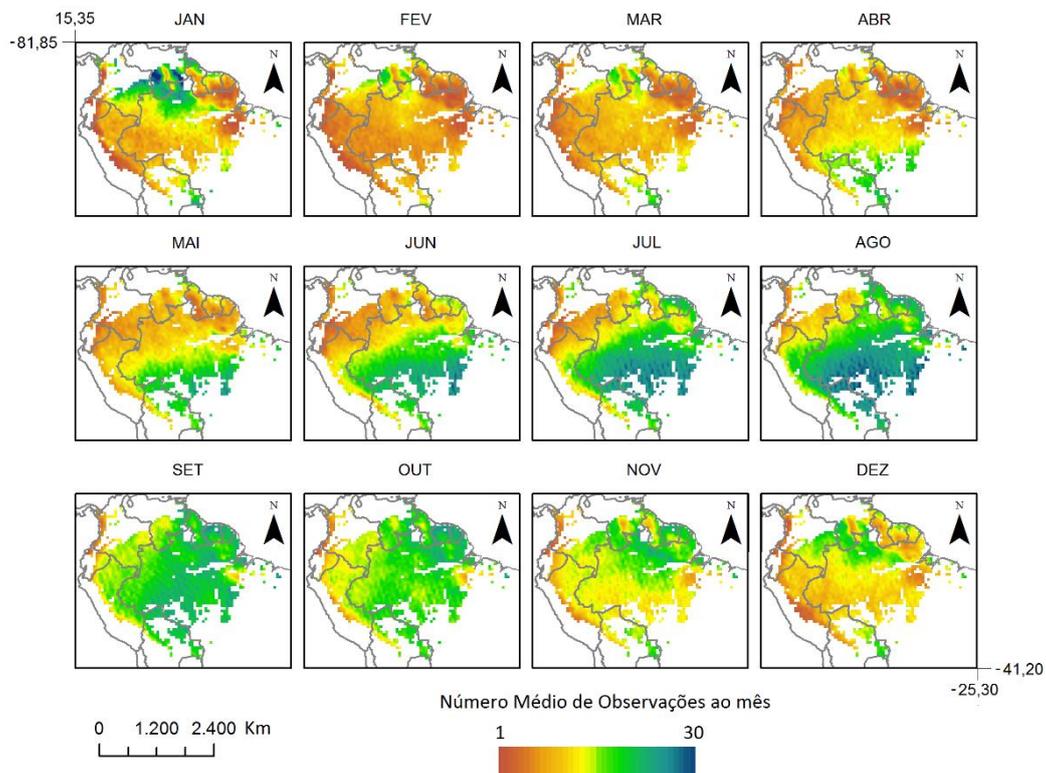
Os padrões espaciais da média anual de observações de ChF através do sensor GOME-2 são mostrados na Figura 5.9. As áreas ocidentais da floresta amazônica têm menos observações, ao contrário do extremo sul e de partes do leste e da Amazônia central, que possuem uma amostragem maior.

Figura 5.9 – Média anual de observações do sensor Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2) na área de estudo.



A Figura 5.10 mostra as médias mensais de observações de ChIF através do sensor Gome-2, entre 2007 e 2015. No escudo das guianas o menor número de observações ocorre entre dezembro e maio, enquanto entre julho e novembro o número de observações é maior. No sul o número de observações é próximo a 15 por mês, com exceção de fevereiro. Próximo aos Andes o número de observações sempre é baixo. No centro, o período em que ocorre menos observações vai de janeiro até maio, enquanto em agosto ocorre um maior número de observações. No norte o menor número de observações ocorre entre abril e julho, enquanto o maior ocorre em janeiro.

Figura 5.10 – Média mensal de observações do sensor Global Ozone Monitoring Experiment–2 (GOME-2) na área de estudo.



6 DISCUSSÕES

6.1. Sazonalidade da fotossíntese na Amazônia

Os padrões apresentados na Figura 5.1 mostram que a sazonalidade da fotossíntese varia espacialmente na floresta amazônica. Essa afirmação é coerente com os resultados obtidos por Silva et al. (2013), os quais mostram que existem regiões com distintos padrões de sazonalidade intra-anual de NDVI ao longo da bacia amazônica. Dados baseados em torres de fluxo (WU et al., 2016; RESTREPO-COUBE et al., 2013) e EVI (WAGNER et al., 2017; GUAN et al., 2015) também indicam variações na sazonalidade da fotossíntese ao longo da Amazônia, principalmente entre a porção equatorial e o sul da Amazônia. Os resultados obtidos nesta pesquisa revelam que a sazonalidade da fotossíntese possui um padrão bem definido nas regiões sul, central e no nordeste (escudo das guianas) da Amazônia (Figura 5.1). Ao contrário das demais áreas da Amazônia, os valores de máxima produtividade (máxima fotossíntese) no escudo das guianas apresentaram um padrão espacial contínuo (Figuras 5.1 e 5.7 B).

O escudo das guianas é caracterizado por solos mais antigos e menos férteis que o restante da floresta amazônica (MALHI et al., 2004; STEEGE et al., 2013). Isso torna a produtividade, e conseqüentemente o *turnover*, menor nessas áreas (MALHI et al., 2004). Isso faz com que a composição das espécies nessas áreas seja distinta do restante da Amazônia (MALHI et al., 2004; STEEGE et al., 2013). Dessa forma, é possível que os padrões espaciais contínuos de máxima produtividade encontrados para o escudo das guianas na Figura 5.1 sejam relacionados com a composição das espécies nessas áreas.

6.2. Relação entre a fotossíntese e as variáveis climáticas de precipitação e radiação

A hipótese nula (H0) de que as variações de precipitação e radiação incidente não possuem relação com a fotossíntese na floresta amazônica é rejeitada, como mostram os resultados do modelo (Figura 5.3). Assim,

aceita-se a hipótese alternativa H1, de que as variações de precipitação e radiação exercem influência sobre a sazonalidade da fotossíntese.

Os resultados mostrados na Figura 5.3 mostram que a fotossíntese é sensível às variações da radiação em 76% da floresta amazônica. Na Figura 5.4 (B, D, F) é possível observar que a fotossíntese aumenta consoante o crescimento da radiação durante a estação seca. O crescimento da fotossíntese em resposta ao aumento da radiação (Figura 5.4 B, F) também foi observado através do EVI (HUETE et al., 2006; BI et al., 2015; BRANDO et al., 2015; LOPES et al., 2016; MYNENI et al., 2007; SALESKA et al., 2007; WAGNER et al., 2016; WAGNER et al., 2017), do IAF (BI et al., 2015; MYNENI et al., 2007; TANG et al., 2017) e de dados de torres de fluxo (WU et al., 2016; RESTREPO-COUBE et al., 2013), durante a estação seca nas florestas da Amazônia Central e Oriental. Os resultados exibidos na Figura 5.3 revelam que as florestas onde a correlação entre radiação e fotossíntese é positiva ocorrem em praticamente toda a Amazônia, com exceção da região sul.

Uma relação inversa entre a fotossíntese e a precipitação nas áreas positivamente associadas com a radiação pode ser observada nas Figuras 3.4 e 5.1. Assim, é provável que a precipitação não limite a fotossíntese durante a estação seca nessas áreas. Os resultados apresentados aqui concordam com a hipótese de aumento da atividade fotossintética durante a estação seca em áreas não limitadas pela água da floresta amazônica (BERTANI et al., 2017; HUETE et al., 2006; BI et al., 2015; BRANDO et al., 2015; LOPES et al., 2016; MYNENI et al., 2007; SALESKA et al., 2007; WAGNER et al., 2016; WAGNER et al., 2017; GUAN et al., 2015; JONES et al., 2014; SALESKA et al., 2016), e contrariam a afirmação de que o verdejamento observado pelo EVI-MODIS durante as estações secas na Amazônia é resultado de artefatos gerados pela geometria de aquisição do sensor MODIS (MORTON et al., 2014).

As áreas associadas positivamente à radiação são compostas em sua maioria por florestas sempre verdes, como mostra a Figura 4.3. As

menores taxas de variação sazonal da fotossíntese encontradas nas áreas associadas positivamente à radiação (Figura 5.2) também corroboram o comportamento sempre verde da vegetação nessas áreas. Assim, os resultados desta pesquisa indicam que a abscisão foliar que pode ocorrer durante a estação seca nas áreas cuja sazonalidade da fotossíntese não é limitada pela água, mostrada no estudo de Chave et al. (2009), é compensada pela produção de novas folhas.

A aplicação dos atrasos mensais sobre a radiação melhorou significativamente os resultados do modelo (Figura 5.5). Isso indica que há uma relação assíncrona entre fotossíntese e radiação nas áreas onde a floresta é associada positivamente à radiação. A fotossíntese começou a aumentar de 1 a 3 meses após o aumento da radiação nessas áreas (Figura 5.4, B, F – fotossíntese e radiação atingem o pico máximo em Outubro e Setembro, respectivamente).

A relação assíncrona entre fotossíntese e radiação, observada nas áreas onde a floresta é associada positivamente à radiação, pode ser explicada pelo tempo que a vegetação leva para emitir brotações e formar folhas novas nos dosséis (RESTREPO-COUBE et al., 2013; LOPES et al., 2016; JONES et al., 2014). Ainda, é possível que algumas áreas onde houve uma relação assíncrona entre fotossíntese e radiação possam ser compostas por espécies que ajustam sua resposta fotossintética às mudanças na radiação incidente de forma mais lenta. O aumento da radiação incidente é capaz de provocar a emissão de brotações e posteriormente a emergência de folhas novas (Figura 5.4, B, F) (GIRARDIN et al. 2016; KLEBS et al. 1914). Esse processo pode fazer com que os dosséis sejam compostos por folhas mais novas. Assim, o aumento observado na fotossíntese pode ter ocorrido porque as folhas mais novas tendem a possuir maior capacidade de realizar a fotossíntese (WU et al., 2016; RESTREPO-COUBE et al., 2013; BRYANT et al., 2016).

A forma como a vegetação absorve a Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) também pode contribuir para que a fotossíntese tenha uma relação assíncrona com a radiação. Cirino et al. (2014) sugerem que a

fotoossíntese nas florestas amazônicas é realizada de forma mais eficiente através da RFA difusa do que através da RFA direta. Como no início da estação úmida há mais nuvens e aerossóis (CIRINO et al., 2014) e, conseqüentemente, maior quantidade de RFA difusa, a atividade fotoossintética pode aumentar e ficar fora de fase com a radiação incidente.

Por outro lado, a taxa fotoossintética tende a aumentar junto com a precipitação durante a estação úmida em áreas onde a fotoossíntese é limitada pela água, localizadas principalmente no sul da Amazônia (Figuras 5.4, A, C). Essas observações são coerentes com um estudo anterior realizado em florestas tropicais secas, que mostrou uma rápida brotação em árvores decíduas no início da estação úmida (BORCHERT et al., 1994). Os resultados do modelo também mostram consonância entre o aumento da fotoossíntese e da precipitação no sul da Amazônia, pois pioraram quando os atrasos mensais na precipitação foram aplicados. Além disso, a máxima fotoossíntese (Figura 5.1) no sul da Amazônia também ocorre em fase com os maiores valores de precipitação (Figura 3.4). Dessa forma, os resultados desta pesquisa corroboram a hipótese de que a precipitação limita a fotoossíntese nas florestas do sul da Amazônia, e também revelam uma consonância entre os picos de precipitação e atividade fotoossintética nessas áreas.

Os resultados apresentados aqui também estão de acordo com as análises realizadas por Jones et al. (2014), onde observou-se que a emissão de folhas novas tende a ser mais síncrona com a disponibilidade de água conforme o número de meses secos aumenta. Isso sugere que os brotos já estão presentes nas árvores dessas áreas durante a estação seca, porém em um estado de dormência devido ao stress hídrico. Assim que a estação úmida inicia, o estado de dormência dos brotos é quebrado e novas folhas são produzidas, o que pode resultar em um aumento da atividade fotoossintética.

A vegetação limitada pela água é composta predominantemente por florestas de transição semi-decíduas (Figura 4.3). Isso indica que a

abscisão foliar tende a ocorrer (CHAVE et al., 2009) e não é acompanhada pela produção de folhas novas durante a estação seca nessas áreas. A ocorrência de comunidades de árvores decíduas sugere que o suprimento de água é insuficiente para manter o estado sempre verde da vegetação em tais áreas durante a estação seca (CHAVE et al., 2009; ENQUIST et al., 2007), o que pode determinar as maiores variações observadas na sazonalidade da fotossíntese (Figura 5.2).

É importante mencionar que a disponibilidade de nutrientes, especialmente o fósforo, pode ter um papel importante na atividade fotossintética da floresta amazônica, conforme demonstrado no estudo de (MERCADO et al., 2011). No entanto, este efeito não foi quantificado em nosso estudo.

6.3. Associação entre os fatores climáticos que influenciam a sazonalidade da fotossíntese e o gradiente espacial da precipitação média anual

Os resultados obtidos aqui indicam que a hipótese nula H_0 , de que a Precipitação Média Anual (PMA) é igual nas áreas possivelmente associadas com a precipitação e nas áreas nas áreas possivelmente associadas com a radiação, deve ser rejeitada, pois houve uma diferença significativa entre a PMA nas áreas onde a vegetação é associada com a água e onde a vegetação é associada com a radiação. Assim, aceita-se a hipótese alternativa H_2 , de que a PMA tende a ser diferente conforme a variável climática que exerce maior influência sobre a sazonalidade da fotossíntese.

Os resultados apresentados aqui mostram que a Precipitação Média Anual (PMA) média nas áreas onde a fotossíntese é limitada por água é igual a $2000 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, enquanto nas áreas positivamente associadas com a radiação a PMA média é igual a $2600 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$. Isso revela que apenas a região sul da Amazônia está abaixo do limiar estabelecido por Guan et al. (2015) ($2000 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) para que a atividade fotossintética não tenha uma diminuição significativa durante a estação seca.

Áreas com a mesma Precipitação Média Anual (PMA) podem ter aumentos na sazonalidade da fotossíntese associados com a radiação ou com a precipitação, ou com a combinação de ambos (Figura 5.3). Outros fatores, tais como estrutura florestal, composição, capacidade de armazenamento de água no solo e disponibilidade de nutrientes também podem influenciar a atividade fotossintética, sendo necessários mais estudos que investiguem o papel dessas variáveis no processo da fotossíntese em grande escala. É importante notar que 11% da área de estudo cuja sazonalidade da fotossíntese está positivamente associada à radiação possui PMA abaixo do limiar de 2000 mm·ano⁻¹. Assim, a fotossíntese em tais áreas pode se tornar limitada pela água, caso o volume de precipitação diminua na Amazônia.

As florestas cuja sazonalidade da fotossíntese é limitada pela água, além das florestas cuja sazonalidade da fotossíntese é positivamente associada à radiação e que possuem Precipitação Média Anual (PMA) próxima de 2000 mm·ano⁻¹, podem ser mais ameaçadas pelas futuras mudanças climáticas (FENG et al., 2013), pois as taxas de recuperação das florestas tropicais em relação ao déficit hídrico tendem a se tornar mais lentas conforme a PMA diminui até limiares críticos (VERBESSELT et al., 2016), como por exemplo o estabelecido por Guan et al. (2015), de 2000 mm·ano⁻¹. Além disso, a diversidade de espécies pode diminuir conforme o aumento no número de estações secas (STEEGE et al., 2003), caso as previsões de diminuição do volume de precipitação se confirmem na Amazônia.

6.4. Período em que ocorre a máxima atividade fotossintética na Amazônia

Esta pesquisa mostrou que os picos máximos da atividade fotossintética tendem a ocorrer durante a estação úmida na Amazônia. Esse padrão é semelhante ao comportamento do NDVI na Amazônia, demonstrado no estudo de Silva et al. (2013), onde os picos máximos dessa variável foram observados durante a estação úmida. Os resultados apresentados aqui (Figura 5.8) revelam que a atividade máxima da fotossíntese ocorre

durante a estação úmida até mesmo nas regiões cujas florestas são positivamente associadas à radiação.

A ocorrência dos picos máximos de sazonalidade da fotossíntese durante a estação úmida (Figura 5.8) pode ser embasada por três explicações complementares:

Primeiro, é possível que isso ocorra em resposta à recarga de água dos solos no início da estação úmida. A maioria das áreas onde os picos de fotossíntese ocorrem até dois meses após o término da estação seca possuem pelo menos três meses de estação seca (Figura 3.3), o que corrobora essa hipótese. Em segundo, a precipitação pode estar em fase com a radiação em partes da Amazônia norte e central (BRADLEY et al., 2011). Assim, os picos máximos de sazonalidade da fotossíntese podem ocorrer durante a estação úmida porque a radiação máxima coincide com o início do período de chuvas. Por fim, o aumento da radiação difusa é capaz de elevar os níveis de fotossíntese no início da estação úmida. O aumento da fração difusa da Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA), relacionado ao aumento de nuvens e aerossóis durante o início da estação úmida, é capaz de favorecer o processo fotossintético, pois a vegetação pode usar a RFA difusa de forma mais eficiente para realizar a fotossíntese do que a RFA direta (CIRINO et al., 2014).

No entanto, os picos de fotossíntese ocorrem predominantemente durante a estação seca na porção nordeste da Amazônia - mais especificamente no escudo das guianas (Figura 5.8). É provável que a sazonalidade da fotossíntese nas florestas situadas no escudo das guianas seja associada apenas com a radiação e não possui limitação por água. Dessa forma, os resultados desta pesquisa mostram que a ocorrência dos picos máximos de fotossíntese durante a estação seca nessas áreas tende a ser uma função apenas da radiação (Figura 5.4, B, F).

As características da região nordeste da Amazônia, como árvores profundamente enraizadas e as propriedades do solo, permitem que a vegetação obtenha água do solo durante a estação seca (NEPSTAD et

al., 1994; OLIVEIRA et al., 2005). Nessas regiões o comprimento das estações secas é menor, se comparado com o comprimento das estações secas nas áreas onde os picos de fotossíntese ocorrem durante a estação úmida (Figura 3.3). Isso reforça a hipótese de que a máxima atividade fotossintética ocorre na estação seca devido às características da floresta e do ambiente dessa região, e não devido apenas a um elevado número de estações secas – o que aumentaria a probabilidade de ocorrência dos picos nesse período.

Os picos máximos da fotossíntese observados durante a estação úmida (Figura 5.8) contrastam com os picos máximos de EVI observados durante a estação seca nos estudos de Huete et al. (2006) e Brando et al. (2010) na região de Tapajós-PA. Os picos máximos da fotossíntese observados por Huete et al. (2006) e Brando et al. (2010) durante a estação seca ocorrem apenas na região nordeste (Figura 5.8), portanto os resultados obtidos aqui sugerem que esses padrões não podem ser extrapolados para toda a Amazônia.

Os picos máximos da fotossíntese observados durante a estação úmida (Figura 5.8) também contrastam com a sazonalidade do Índice de Área Foliar (IAF) obtida a partir de dados satelitais na Amazônia por Mynenia et al., (2009). O IAF tende a ser síncrono com a radiação incidente (MYNENIA et al., 2009; BI et al., 2015), e seus picos máximos ocorrem durante a estação seca (MYNENIA et al., 2009) ou no primeiro mês da estação úmida na Amazônia (BI et al., 2015). Essas diferenças podem ocorrer porque o IAF possui limitações para representar a sazonalidade da fotossíntese na Amazônia (WU et al., 2016).

A ocorrência dos picos máximos da fotossíntese durante a estação úmida (Figura 5.8) também sugere que algumas das análises de verdejamento (*green - up*) possam ser reavaliadas. Por exemplo, nos estudos de Guan et al. (2015) e Huete et al. (2006) o verdejamento (*green - up*) foi avaliado pela diferença entre o EVI da estação seca e o EVI da estação úmida. Embora a fotossíntese aumente durante a estação seca nas áreas não limitadas por água (Figuras 5.1 e 5.4 B, F), a possível

ocorrência dos picos máximos da fotossíntese durante a estação úmida (Figura 5.8) não foi levada em consideração por Guan et al. (2015) e Huete et al. (2006). O fato de a fotossíntese prolongar seu crescimento após o fim da estação seca, e atingir seus valores máximos na estação úmida, pode subestimar o quanto o aumento da radiação incidente altera a fenologia foliar na Amazônia, nos tipos de análises realizados por Guan et al. (2015) e Huete et al. (2006).

É importante ressaltar que a fertilidade do solo também pode afetar o processo fotossintético. A Produtividade Primária Líquida (PPL) na Amazônia é correlacionada com a fertilidade do solo, em especial o fósforo (MERCADO et al., 2011; ARAGÃO et al., 2009). Porém, os padrões espaciais de produtividade da floresta parecem não estar relacionados com os padrões de deposição de nutrientes pela atmosfera nesta região (MAHOWALD et al., 2005; MAHOWALD et al., 2009). Estudos indicam que a Amazônia pode estar perdendo fósforo para oceanos adjacentes e outras regiões em razão do vento (MAHOWALD et al., 2005). Assim, uma diminuição da atividade fotossintética deveria ser observada, caso a deposição de nutrientes pela atmosfera realmente possua importância na produtividade das florestas na Amazônia. No entanto, a metodologia aplicada aqui procurou remover as tendências temporais dos dados de fotossíntese e, portanto, esse efeito provavelmente não afetou os resultados desta pesquisa.

6.5. Incertezas relacionadas com a fluorescência de clorofila (ChlF) obtida a partir do sensor GOME-2

Os dados de fluorescência de clorofila (ChlF) obtidos por sensores satelitais são inerentemente contaminados por nuvens, devido à baixa resolução espacial em que esses dados são gerados. Além disso, na Anomalia do Atlântico Sul os satélites em órbita são expostos a um aumento do fluxo de partículas energéticas, o que leva a um aumento do ruído nas medições, e isso resulta em uma maior incerteza e redução no número de observações da ChlF (JOINER et al., 2013).

Os padrões espaciais observados na Figura 5.9, que mostra a média anual de observações de fluorescência de clorofila (ChlF) do sensor GOME-2, são parecidos com os da Figura 3.2. À medida que a Precipitação Média Anual (PMA) aumentou (Figura 3.2), houve uma tendência de diminuição no número de observações (Figura 5.9). As áreas ocidentais da floresta amazônica têm menos observações e, portanto, a ChlF obtida para essas áreas pode apresentar maiores incertezas em relação ao restante da área de estudo. Embora o número de observações da ChlF aumente do noroeste para o sudeste da Amazônia (5.9), esse gradiente não teve impacto sobre a significância do modelo.

Também é importante levar em consideração uma tendência de degradação radiométrica nos valores de fluorescência de clorofila (ChlF) observados através do sensor GOME-2 a bordo do METOP-A (JOINER et al., 2016). Embora sejam realizados ajustes sobre os dados de ChlF na versão 3 para corrigir a tendência de degradação radiométrica, é possível que ainda existam erros nos valores de ChlF associados a esse processo (JOINER et al., 2016). Como as análises realizadas aqui removeram a componente de tendência da série temporal dos dados de ChlF, a degradação observada no sensor GOME-2 a bordo do METOP-A (JOINER et al., 2016) não afetou os resultados obtidos aqui.

A consistência na modelagem da fotossíntese através da precipitação e da radiação incidente foi obtida apesar da baixa resolução espacial dos dados GOME-2. É importante ressaltar que a missão METOP-A, bem como a GOSAT (OLIVEIRA et al., 2005), não foram planejadas para o estudo da fluorescência de clorofila (ChlF).

A *Fluorescence Explorer Mission*—FLEX (que faz parte do *Living Planet Programme*, da Agência Espacial Europeia - ESA) está sendo desenvolvida especificamente para a obtenção da fluorescência de clorofila (ChlF) (OLIVEIRA et al., 2005). O lançamento da FLEX pode superar a limitação relativa à baixa resolução espacial inerente aos satélites atuais que obtêm a ChlF. Além disso, a FLEX será capaz de

mensurar todo o espectro da ChlF e permitirá o cálculo de outros parâmetros da vegetação a partir da radiância obtida no topo da atmosfera, como o Índice de Área Foliar (IAF) e o conteúdo de clorofila dos dosséis.

7 CONCLUSÕES

Este estudo apresentou resultados que visam contribuir com o entendimento da relação entre o clima e a sazonalidade da fotossíntese na Amazônia. As quatro questões propostas na seção 1.1 podem ser respondidas da seguinte forma:

1. Como é a sazonalidade da fotossíntese na Amazônia?

A sazonalidade da fotossíntese apresenta padrões distintos na Amazônia. Esta pesquisa revelou que os picos sazonais de máxima fotossíntese possuem um padrão espacial contínuo no escudo das Guianas.

2. A fotossíntese varia em função da sazonalidade climática?

Sim. A fotossíntese mostrou uma forte relação com os aumentos da precipitação e da radiação incidente na Amazônia.

Os resultados obtidos aqui demonstram que a sazonalidade da fotossíntese aumentou de forma síncrona com o início da estação úmida em áreas limitadas pela água. Isso pode indicar que os brotos já estão presentes nas árvores limitadas pela água durante a estação seca, porém em um estado de dormência devido ao stress hídrico. Assim que a estação úmida é iniciada, o estado de dormência é quebrado, e novas folhas, com maior capacidade fotossintética, passam a compor o dossel dessas florestas, o que pode resultar em um aumento da fotossíntese.

Por outro lado, a sazonalidade da fotossíntese aumentou de 1 a 3 meses após o aumento da radiação na maioria das florestas associadas com a radiação. A defasagem temporal entre a radiação e a sazonalidade da fotossíntese observada nas áreas associadas com a radiação podem estar relacionados ao tempo necessário para a vegetação emitir brotações e produzir novas folhas. Além disso, o aumento da incidência da Radiação Fotossinteticamente Ativa difusa durante a estação úmida também pode explicar a defasagem temporal observada entre a radiação e a sazonalidade da fotossíntese nas áreas associadas com a radiação.

Essa defasagem temporal também pode ser explicada pela ocorrência da precipitação em fase com a radiação em algumas regiões da Amazônia.

3. Qual é a relação entre as variáveis climáticas que influenciam a sazonalidade da fotossíntese (precipitação e radiação) e o gradiente espacial de Precipitação Média Anual (PMA)?

Os resultados desta pesquisa revelaram que a PMA foi significativamente maior nas áreas onde a vegetação é associada à radiação. O valor de PMA nas áreas limitadas pela água ($2000 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) foi próximo ao limite estabelecido por Guan et al. (2015) para manter o estado sempre verde da vegetação. Acima de um limiar de PMA de $3300 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ a produção de folhas novas depende quase que exclusivamente da sazonalidade da radiação incidente, enquanto que, abaixo de um limiar de PMA de $1600 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, a produção de folhas novas depende quase que exclusivamente da precipitação. As áreas onde a fotossíntese é associada à radiação e possuem uma PMA próxima a um limiar de $\approx 2000 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ podem se tornar limitadas pela precipitação, devido aos aumentos esperados na frequência e intensidade de secas extremas na região amazônica (DUFFY et al., 2015). Caso essas projeções se concretizem, a vegetação nessas áreas provavelmente sofrerá alterações em sua composição, e será dominada por comunidades de árvores decíduais ao invés das florestas sempre verdes. Além disso, as florestas limitadas pela precipitação podem ser mais ameaçadas pelas mudanças climáticas projetadas para a Amazônia.

4. Quando ocorre a atividade máxima de fotossíntese na floresta amazônica (estação seca ou chuvosa)?

A máxima atividade fotossintética na Amazônia tende a ocorrer na estação úmida, inclusive nas áreas com florestas cuja sazonalidade da fotossíntese é positivamente associada com a radiação. Curiosamente, esta pesquisa revelou que no escudo das guianas os picos máximos da sazonalidade da fotossíntese ocorrem predominantemente durante a

estação seca. Isso sugere que nas florestas do escudo das guianas a sazonalidade da fotossíntese é influenciada unicamente pela radiação.

8 RECOMENDAÇÕES

Este trabalho analisou a relação que as variáveis climáticas de precipitação e radiação incidente possuem com a sazonalidade da fotossíntese na floresta amazônica, através de um Modelo Linear de Regressão Múltipla (MLRM). Os resultados obtidos pelo MLRM mostram que a sazonalidade da fotossíntese possui relação significativa com as variáveis climáticas em 83% da área de estudo, o que equivale a uma área de 4.695.000 km². Porém, o clima tem se alterado nos últimos anos na Amazônia (MALHI e WRIGHT, 2004; MARENGO et al, 2011; FENG et al., 2011) e causado efeitos sobre a vegetação (ANDERSON et al., 2005; PHILLIPS et al., 2009; BRIENEN et al., 2015; GATTI et al., 2014; DOUGHTY et al., 2015; FELDPAUSCH et al., 2016). Eventos extremos também têm sido observados (JIMENEZ-MUNOZ, 2016; ESPINOSA et al., 2011; MARENGO et al., 2016; MALHI et al., 2008; SANTOSO et al., 2015) (Figura 2.5). Ainda, projeções indicam que essas alterações tendem a continuar (SOLOMON et al., 2009; HARRIS et al., 2008; SPRACKLEN et al., 2012; ORLOWSKY e SENEVIRATNE, 2012; FIELD et al., 2012) e podem ser potencializadas pelo processo de desflorestamento da Amazônia (ARAGAO, 2012; SPRACKLEN et al., 2012). Portanto, a sugestão para futuros trabalhos é complementar o estudo de modelagem da sazonalidade da fotossíntese desenvolvido aqui, utilizando-se dados de projeções futuras para o clima, como por exemplo as do quinto relatório de avaliação do IPCC, baseadas em simulações do *Coupled Model Intercomparison Project 5* (CMIP5) para o século 21 (ORLOWSKY e SENEVIRATNE, 2012). Assim, a influência das projeções climáticas sobre a fotossíntese poderá ser avaliada, e as áreas mais vulneráveis às possíveis mudanças no clima poderão ser identificadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORÓS-LÓPEZ, J. et al. Remote sensing of chlorophyll fluorescence for estimation of stress in vegetation. Recommendations for future missions. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, p. 3769–3772, 2007.
- AMORÓS-LÓPEZ, J. et al. Evaluation of remote sensing of vegetation fluorescence by the analysis of diurnal cycles. *International Journal of Remote Sensing*, v.29, p. 5423-5436, 2008. DOI: 10.1080/01431160802036391.
- ANDERSON, L.O. Remote sensing detection of droughts in amazonian forest canopies. *New Phytologist*, v. 187, p. 733-750, 2010. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2010.03355.x.
- ARAGÃO, L. E. O. C. et al. Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. *Biological Reviews*, v. 2, p. 913–931, 2014.
- ARAGÃO, L. E. O. C. The rainforest's water pump. *Nature*, v.489, p. 217-218, 2012. DOI: 10.1038/nature11485.
- ARAGÃO, L. E. O. C. et al. Above- and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils. *Biogeosciences*, v. 12, p. 2759-2778, 2009. DOI:10.5194/bg-6-2759-2009.
- BAKER, T.R. et al. Variation in wood density determines spatial patterns in amazonian forest biomass. *Global Change Biology*, v.10, p.545-562, 2004. DOI:10.1111/j.1365-2486.2004.00751.x.
- BAKER, N.R. et al. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, v. 59, p. 89-113, 2008. DOI: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759.
- BERTANI, G.; WAGNER, F.; ANDERSON, L.; ARAGÃO, L. Chlorophyll fluorescence data reveals climate-related photosynthesis seasonality in amazonian forests. *Remote Sensing*, v.9, e1275, 2017. DOI: 10.3390/rs9121275.
- BERRY, J.; BJORKMAN, O. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, v. 31, p. 491–543, 1980.
- BI, J. et al. Sunlight mediated seasonality in canopy structure and photosynthetic activity of amazonian rainforests. *Environmental Research Letters*, v.10, e064014, 2015. DOI: 10.1088/1748-9326/10/6/064014.
- BOLHÀR-NORDENKAMPF, H. R. et al. Chlorophyll fluorescence as a probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: a review of current instrumentation. *Functional Ecology*, v. 3, p. 497–514, 1989.
- BONTEMPO e SILVA., E. A. et al. Contrasting traits, contrasting environments, and considerations on population dynamics under a changing climate: an

- ecophysiological field study of two co-dominant tree species. *Plant Species Biology*, v. 31, p.38–49, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/1442-1984.12074>.
- BORCHERT R. Soil and Stem Water Storage Determine Phenology and Distribution of Tropical Dry Forest Trees. *Ecology*, v. 75, p. 1437–1449, 1994. DOI: <https://doi.org/10.2307/1937467>.
- BOTTA, A.; RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J. A. Long-term variations of climate and carbon fluxes over the Amazon basin. *Geophysical Research Letters*, v. 29, p.33-1– 33-4, 2002. DOI:10.1029/2001GL013607.
- BRADLEY, A. V. et al. Relationships between phenology, radiation and precipitation in the amazon region. *Global Change Biology*, v. 17, p. 2245-2260, 2011. DOI:10.1111/j.1365-2486.2011.02405.x.
- BRANDO, P. M. et al. Seasonal and interannual variability of climate and vegetation indices across the amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, v. 107, p.14685-14690, 2010. DOI: 14685-14690, 10.1073/pnas.0908741107.
- BRIENEN, R. J. W. et al. Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, v. 519, p. 344–348, 2015. DOI:10.1038/nature14283.
- BRYANT C. et al. Leaf aging of Amazonian canopy trees as revealed by spectral and physiochemical measurements. *New Phytologist*, v. 214, p. 1049-1063, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.13853>.
- CAO, M.; WOODWARD, F. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. *Global Change Biology*, v. 4, p. 185–198, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00125.x>.
- COX, P.M. et al. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 78, n.1/3, p.137-156, 2004. DOI: 10.1007/s00704-004-0049-4.
- COX, P.M. et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, v. 408, p.184-187, 2000. DOI: 10.1038/35041539.
- CHAVE, J. et al. Regional and seasonal patterns of litterfall in tropical South America. *Biogeosciences*, v.7, p. 43–55, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-7-43-2010>.
- CIRINO, G.G.; SOUZA, R.A.F.; ADAMS, D.K.; ARTAXO, P. The effect of atmospheric aerosol particles and clouds on net ecosystem exchange in the amazon. *Atmos. Chem. Phys.*, v. 14, p. 6523–6543, 2014. DOI: 10.5194/acp-14-6523-2014.
- DA ROCHA, H.R. et al. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. *Ecological Applications*, v. 14, p. 22-32, 2004. DOI: 10.1890/02-6001.

- GATES, D. M. et al. Spectral properties of plants. *Applied Optics*, v. 4, p.11-20, 1965.
- MOURA, Y.M. et al. 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. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.07.006.
- DE SOUSA, C. et al. Progress in remote sensing of photosynthetic activity over the amazon basin. *Remote Sensing*, v.9, p.48, 2017. DOI: 10.3390/rs9010048.
- DOUGHTY, C. E. et al. Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia. *Nature*, v. 519, p. 78–82, 2015. DOI: 10.1038/nature14213.
- DU, S. et al. Response of canopy solar-induced chlorophyll fluorescence to the absorbed photosynthetically active radiation absorbed by chlorophyll. *Remote Sensing*, v.9, n.9, e911, 2017. DOI: 10.3390/rs9090911.
- ESPINOZA, J. C. et al. Climate variability and extremes drought in the upper Solimões River (Western Amazon Basin): understanding the exceptional 2010 drought. *Geophysical Research Letters*, v. 38, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011GL047862>.
- FARQUHAR, G.D.; VON CAEMMERER, S.; BERRY, J.A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. *Planta*, v. 149, p. 78-90, 1980. DOI: 10.1007/bf00386231.
- FELDPAUSCH, T. R. et al. Amazon forest response to repeated droughts. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 30, p. 964-982, 2016. DOI:10.1002/2015GB005133.
- FENG, X.; PORPORATO, A.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Changes in rainfall seasonality in the tropics. *Nature Climate Change*, v. 3, p. 811-815, 2013. DOI: 10.1038/nclimate1907.
- FIELD, C. B. et al. *IPCC, 2012: Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: a special report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012. 582 p.
- FLEXAS, J. et al. Steady-state chlorophyll fluorescence (fs) measurements as a tool to follow variations of net CO₂ assimilation and stomatal conductance during water-stress in C3 plants. *Physiologia Plantarum*, v. 114, p. 231-240, 2002. DOI: 10.1034/j.1399-3054.2002.1140209.x.
- FRANKENBERG, C. et al. Remote sensing of terrestrial chlorophyll fluorescence from space. *SPIE Newsroom*, p. 2–5, 2013. DOI: 10.1117/2.1201202.004725.
- FRANKENBERG, C.; PLATT, U.; WAGNER, T. Iterative maximum a posteriori (IMAP)-DOAS for retrieval of strongly absorbing trace gases: model studies for CH₄ and CO₂ retrieval from near infrared spectra of SCIAMACHY onboard ENVISAT. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, v. 4, p. 6067–6106, 2004.

- FRANKLIN, O. et al. Modeling carbon allocation in trees: a search for principles. *Tree Physiology*, v. 32, p. 648-666, 2012. DOI:10.1093/treephys/tp138.
- FRIEND, A. D. et al. Carbon residence time dominates uncertainty in terrestrial vegetation responses to future climate and atmospheric CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 111, n. 9, p. 3280–5, 2014.
- GALVÃO, L. S. et al. On intra-annual EVI variability in the dry season of tropical forest: A case study with MODIS and hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, v. 115, p. 2350-2359, 2011. DOI: 10.1016/j.rse.2011.04.035.
- GAO, X. et al. (2000). Optical–biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sensing of Environment*, v. 74, p. 609– 620, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00150-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00150-4).
- GATTI, L. V. et al. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. *Nature*, v. 506, p. 76–80, 2014. DOI: 10.1038/nature12957.
- GAUSMAN, H.W. Leaf reflectance of near-infrared. *Photogrammetric Engineering*, v. 40, p. 183–191, 1974.
- GIRARDIN, C. A. J. et al. Seasonal trends of amazonian rainforest phenology, net primary productivity, and carbon allocation. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 30, p. 700-715, 2016. DOI:10.1002/2015gb005270.
- GLOOR, M. R. J. W. Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophysical Research Letters*, v. 40, p. 1729–1733, 2013. DOI:10.1002/grl.50377.
- GREGORY-WODZICKI, K. Uplift history of the Central and Northern Andes: a review. *Geological Society of America Bulletin*, v. 112, p. 1091-1105, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2000\)112<1091:UHOTCA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112<1091:UHOTCA>2.0.CO;2).
- GUAN, K. et al. Photosynthetic seasonality of global tropical forests constrained by hydroclimate. *Nature Geoscience*, v. 8, p. 284-289, 2015. DOI: 10.1038/ngeo2382.
- GUANTER, L. et al. Retrieval and global assessment of terrestrial chlorophyll fluorescence from gosat space measurements. *Remote Sensing of Environment*, v. 121, p. 236-251, 2012. DOI: 10.1016/j.rse.2012.02.006.
- HANSEN, M.C. et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, v. 342, p. 850–853, 2013. DOI: 10.1126/science.1244693.
- HARRIS, P. P. et al. Amazon Basin climate under global warming: the role of the sea surface temperature. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, v. 363, p. 1753-1759, 2008. DOI: 10.1098/rstb.2007.0037.
- HILKER, T. et al. Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 111, p. 16041-16046, 2014. DOI: 10.1073/pnas.1404870111.

HUETE, A. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, p. 195–213, 2002. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, v. 25, p. 295-309, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).

HUETE, A. R. et al. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters*, v. 33, n.6, 2006. DOI: 10.1029/2005gl025583.

HUFFMAN, G. J. et al. The trmm multisatellite precipitation analysis (tmpa): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, v. 8, p. 38-55, 2007. DOI: 10.1175/jhm560.1.

JENSEN, J. R. *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*. 2.ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2005. 598p.

JIMENEZ-MUNOZ, J. C. et al. Record-breaking warming and extreme drought in the amazon rainforest during the course of el nino 2015-2016. *Scientific Reports*, v. 6, e33130, 2016. DOI:10.1038/srep33130.

JOINER, J. et al. First observations of global and seasonal terrestrial chlorophyll fluorescence from space. *Biogeosciences*, v. 8, n. 3, p. 637–651, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-8-637-2011>.

JOINER, J. et al. Global monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence from moderate-spectral-resolution near-infrared satellite measurements: methodology, simulations, and application to gome-2. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 6, p. 2803-2823, 2013. DOI: 10.5194/amt-6-2803-2013.

JOINER, J. et al. New measurements of chlorophyll fluorescence with gome-2 and comparisons with the seasonal cycle of GPP from flux towers. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON REMOTE SENSING OF VEGETATION FLUORESCENCE, 5., 2014, Paris, France. *Proceedings...* 2014. p. 7–11.

JOINER, J. et al. New methods for the retrieval of chlorophyll red fluorescence from hyperspectral satellite instruments: simulations and application to gome-2 and sciamachy. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 9, p. 3939-3967, 2016. DOI: 10.5194/amt-9-3939-2016.

JOINER, J. et al. Filling-in of near-infrared solar lines by terrestrial fluorescence and other geophysical effects: simulations and space-based observations from sciamachy and gosat. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 5, p. 809-829, 2012. DOI: 10.5194/amt-5-809-2012.

JOINER, J. et al. First observations of global and seasonal terrestrial chlorophyll fluorescence from space. *Biogeosciences*, v. 8, p. 637-651, 2011. DOI: 10.5194/bg-8-637-2011.

JONES, M. O. et al. Asynchronous amazon forest canopy phenology indicates adaptation to both water and light availability. *Environmental Research Letters*, v. 9, e124021, 2014. DOI: 10.1088/1748-9326/9/12/124021.

KAUFMAN, Y. J.; TANRE', D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 30, p. 261–270, 1992. DOI: 10.1109/36.134076.

KING, M. D.; GREENSTONE, R. (Eds.). *1999 EOS reference handbook: a guide to NASA's Earth Science Enterprise and the Earth Observing System*. Washington: NASA/Goddard Space Flight Center, 1999. v. 1.

KÖHLER, P. et al. A linear method for the retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence from gome-2 and sciamachy data. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 8, p. 2589-2608, 2015. DOI: 10.5194/amt-8-2589-2015.

KÖHLER, P.; GUANTER, L.; KOBAYAS H., H.; WALTHER, S.; YANG, W. Assessing the potential of sun-induced fluorescence and the canopy scattering coefficient to track large-scale vegetation dynamics in amazon forests. *Remote Sensing of Environment*, v. 204, p. 769-785, 2018. DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.025.

KOREN, V. et al. A parameterization of snowpack and frozen ground intended for ncep weather and climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 104, p. 19569-19585, 1999. DOI: 10.1029/1999jd900232.

LEE, J. E. et al. Forest productivity and water stress in amazonia: observations from gosat chlorophyll fluorescence. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 280, 2013. DOI: 10.1098/rspb.2013.0171.

LEWIS, S. L. et al. The 2010 Amazon drought. *Science*, v. 331, n.6017, p.554, 2011. DOI: 10.1126/science.1200807.

LIU, X.; LIU, L. Influence of the canopy brdf characteristics and illumination conditions on the retrieval of solar-induced chlorophyll fluorescence. *International Journal of Remote Sensing*, v. 39, p. 1782-1799, 2017. DOI: 10.1080/01431161.2017.1404165.

LIU, X.; LIU, L.; ZHANG, S.; ZHOU, X. New spectral fitting method for full-spectrum solar-induced chlorophyll fluorescence retrieval based on principal components analysis. *Remote Sensing*, v. 7, p.10626-10645, 2015. DOI: 10.3390/rs70810626.

LOPES, A. P. et al. Leaf flush drives dry season green-up of the central amazon. *Remote Sensing of Environment*, v. 182, p. 90-98, 2016. DOI: 10.1016/j.rse.2016.05.009.

LYAPUSTIN, A. I. et al. Multi-angle implementation of atmospheric correction for modis (maiac): 3. atmospheric correction. *Remote Sensing of Environment*, v. 127, p. 385-393, 2012. DOI: 10.1016/j.rse.2012.09.002.

MADANI, N. et al. Global analysis of bioclimatic controls on ecosystem productivity using satellite observations of solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing*, v. 9, n.6, p.530, 2017. DOI: 10.3390/rs9060530.

MAEDA, E. E. et al. Consistency of vegetation index seasonality across the amazon rainforest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 52, p. 42-53, 2016. DOI: 10.1016/j.jag.2016.05.005.

MALHI, Y. et al. Climate change, deforestation, and the fate of Amazon. *Science*, v. 319, p. 169–172, 2008. DOI: 10.1126/science.1146961.

MALHI, Y. et al. The above-ground coarse wood productivity of 104 neotropical forest plots. *Global Change Biology*, v. 10, p. 563-591, 2004. DOI:10.1111/j.1529-8817.2003.00778.x.

MALHI, Y. The productivity, metabolism and carbon cycle of tropical forest vegetation. *Journal of Ecology*, v. 100, p. 65–75, 2012. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2011.01916.x.

MALHI, Y.; DOUGHTY, C.; GALBRAITH, D. The allocation of ecosystem net primary productivity in tropical forests. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 366, p. 3225–3245, 2011. DOI: 10.1098/rstb.2011.0062.

MALHI, Y. et al. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Global Change Biology*, v. 12, p. 1107–1138, 2006. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01120.x.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, v. 36, p. 1033–1050, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4420>.

MARENGO, J. A. et al. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophysical Research Letters*, v. 38, p. 1–5, 2011. DOI: 10.1029/2011GL047436.

MAXWELL, K.; JOHNSON, G. N. Chlorophyll fluorescence - a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, v. 51, p. 659–668, 2000. DOI: 10.1093/jexbot/51.345.659.

MERCADO, L. M. et al. Variations in amazon forest productivity correlated with foliar nutrients and modelled rates of photosynthetic carbon supply. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, v. 366, p. 3316–3329, 2011. DOI: 10.1098/rstb.2011.0045.

MERONI, M. et al. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: Review of methods and applications. *Remote Sensing Environment*, v. 113, p. 2037–2051, 2009. DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.003.

MITCHELL, T.; JONES, P. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, v. 25, p. 693–712, 2005. DOI: 10.1002/joc.1181.

- MAHOWALD, N.M.; ARTAXO, P.; BAKER, A.R.; JICKELLS, T.D.; OKIN, G.S.; RANDERSON, J.T.; TOWNSEND, A.R. Impacts of biomass burning emissions and land use change on Amazonian atmospheric phosphorus cycling and deposition. *Glob. Biogeochem. Cycles*, v.19, 2005. DOI: 10.1029/2005GB002541.
- MAHOWALD, N.M.; ENGELSTAEDTER, S.; LUO, C.; SEALY, A.; ARTAXO, P.; BENITEZ-NELSON, C.; BONNET, S.; CHEN, Y.; CHUANG, P.Y.; COHEN, D.D.; et al. Atmospheric iron deposition: Global distribution, variability, and human perturbations. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, v. 1, p. 245–278, 2009.
- MOREIRA, M. A. *Fundamentos de sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2001.
- MORENO, J. *Global mapping of terrestrial vegetation photosynthesis: the fluorescence explorer (FLEX) mission*. Disponível em: <ftp://ftp.legos.obs-mip.fr/pub/tmp3m/IGARSS2014/abstracts/1777.pdf> Acesso em: 02 maio 2015.
- MORTON, D.C. et al. Amazon forests maintain consistent canopy structure and greenness during the dry season. *Nature*, v. 506, p. 221-224, 2014. DOI: 10.1038/nature13006.
- MUNRO, R. et al. The gome-2 instrument on the metop series of satellites: instrument design, calibration, and level 1 data processing: an overview. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 9, p. 1279-1301, 2016. DOI: 10.5194/amt-9-1279-2016.
- MYNENI R. B. et al. Large seasonal swings in leaf area of Amazon rainforests. *Proceedings of The National Academy of Sciences of the United States of America*, v.104, p.4820–4823, 2007.
- NEPSTAD, D. C. et al. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*, v. 372, p. 666– 669, 1994. DOI:10.1038/372666a0.
- NI, Z. et al. Investigation of atmospheric effects on retrieval of sun-induced fluorescence using hyperspectral imagery. *Sensors*, v. 16, n.4, p.480, 2016. DOI: 10.3390/s16040480.
- NOBRE C.A.; SELLERS P.J.; SHUKLA J. Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of Climate*, v.4, p. 957–988, 1991. DOI: 10.1175/1520-0442(1991)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2.
- ORLOWSKY, B.; SENEVIRATNE, S. I. Global changes in extreme events: regional and seasonal dimension. *Climatic Change*, v. 110, p. 669-696, 2012. DOI: 10.1007/s10584-011-0122-9.
- PARAZOO, N.C. et al. Terrestrial gross primary production inferred from satellite fluorescence and vegetation models. *Global Change Biology*, v. 20, p. 3103-3121, 2014. DOI: 10.1111/gcb.12652.
- PARAZOO, N.C; et al. Interpreting seasonal changes in the carbon balance of southern amazonia using measurements of xco2 and chlorophyll fluorescence

- from gosat. *Geophysical Research Letters*, v. 40, p. 2829-2833, 2013. DOI: 10.1002/grl.50452.
- PLASCYK, J. A.; GABRIEL, F. C. The Fraunhofer Line Discriminator MKII: an airborne instrument for precise and standardized ecological luminescence measurements. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, v. 24, p. 306–313, 1975.
- PHILLIPS, O. L. et al. of the Amazon Rainforest. *Science*, v. 323, p. 1344–1347, 2009. DOI: 10.1126/science.1164033.
- PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLICH, T.M. *Sensoriamento remoto da vegetação*. 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 176p.
- PORCAR-CASTELL, A. et al. Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: mechanisms and challenges. *Journal of Experimental Botany*, v. 65, p. 4065-4095, 2014. DOI: 10.1093/jxb/eru191.
- QUESADA, C.A.; LLOYD, J.; ANDERSON, L.O.; FYLLAS, N.M.; SCHWARZ, M.; CZIMCZIK, C.I. Soils of amazonia with particular reference to the rainfor sites. *Biogeosciences*, v. 8, p. 1415-1440, 2011. DOI: 10.5194/bg-8-1415-2011
- RAY, D.; NEPSTAD, D.; MOUTINHO, P. Micrometeorological and canopy controls of fire susceptibility in a forested amazon landscape. *Ecological Applications*, v. 15, p. 1664-1678, 2005. DOI:10.1890/05-0404.
- RESTREPO-COUBE, N. et al. What drives the seasonality of photosynthesis across the amazon basin? a cross-site analysis of eddy flux tower measurements from the Brasil flux network. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 182/183, p. 128-144, 2013. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.04.031.
- RICHARDSON, A. J.; WIEGAND, C. L. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 43, n.2, p. 1541-1552, 1977.
- RODELL, M. et al. The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 85, p. 381-394, 2004. DOI: 10.1175/bams-85-3-381.
- ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: ERTS Symposium, 3., 1973. *Proceedings...* Washington, DC: NASA, 1973. v. 1, p. 309-317. (NASA SP-351).
- SAATCHI, S. et al. Persistent effects of a severe drought on Amazonian forest canopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 110, n. 2, p. 565–570, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1204651110>.
- SALESKA, S. R. et al. Amazon forests green-up during 2005 drought. *Science*, v. 318, p. 612-612, 2007. DOI: 10.1126/science.1146663.
- SALESKA, S.R. et al. Dry-season greening of amazon forests. *Nature*, v. 531, E4-5, 2016. DOI: 10.1038/nature16457.

- SAMPAIO, G. et al. Regional climate change over eastern amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, v. 34, L17709, 2007. DOI:10.1029/2007GL030612.
- SANTOSO, A. et al. ENSO extremes and diversity: dynamics, teleconnections, and impacts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, p. 1969–1972, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00141.1>.
- SCHREIBER, U et al. Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer. *Photosynthesis Research*, v. 10, p. 51–62, 1986.
- SITCH, S. et al. Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five dynamic global vegetation models (dgvms). *Global Change Biology*, v.14, p. 2015-2039, 2008. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01626.x.
- SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation from amazonian rainforest. *Proceedings of the Royal Society of London - Series B. Biological Sciences*, v. 233, p. 321-346, 1988. DOI: 10.1098/rspb.1988.0024.
- SOLOMON, S. et al. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.106, p. 1704-1709, 2009. DOI: 10.1073/pnas.0812721106.
- SPRACKLEN, D. V., et al. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature*, v. 489, p. 282-285, 2012. DOI:10.1038/nature11390.
- SOMBROEK, W. Spatial and temporal patterns of amazon rainfall. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, v. 30, p. 388-396, 2001. DOI: 10.1579/0044-7447-30.7.388.
- TANG, H.; DUBAYAH, R. Light-driven growth in Amazon evergreen forests explained by seasonal variations of vertical canopy structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 114, p. 2640–2644, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1616943114>.
- TER STEEGE, H. et al. A spatial model of tree a-diversity and - density for the Amazon Region. *Biodiversity and Conservation*, v. 12, p. 2255–2276, 2003.
- TER STEEGE, H. et al. Hyperdominance in the Amazonian tree flora. *Science*, v. 342, n.6156, e1243092, 2013. DOI: 10.1126/science.1243092.
- THOMAS, G. E.; STAMNES, K. Radiative transfer in the atmosphere and ocean, 2nd ed., Cambridge university press, Cambridge, 2002.
- TIAN, H. et al. Effect of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems. *Nature*, v. 396, p. 664–667, 1998. DOI:10.1038/25328.
- VAN WITTENBERGHE, S. et al. Bidirectional sun-induced chlorophyll fluorescence emission is influenced by leaf structure and light scattering

properties — a bottom-up approach. *Remote Sensing of Environment*, v. 158, p.169-179, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.012>.

VERBESSELT, J. et al. Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, v. 114, p. 2970-2980, 2010. DOI: 10.1016/j.rse.2010.08.003.

VERBESSELT, J. et al. Remotely sensed resilience of tropical forests. *Nature Climate Change*, v. 6, p.1028-1031, 2016. DOI: 10.1038/nclimate3108.

VON RANDOW, C. et al. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in south west amazonia. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 78, p. 5-26, 2004. DOI: 10.1007/s00704-004-0041-z.

WAGNER, F.H. et al. Asynchronism in leaf and wood production in tropical forests: a study combining satellite and ground-based measurements. *Biogeosciences*, v. 10, p. 7307–7321, 2013. DOI: 10(11):7307–7321.

WAGNER, F. H. et al. Climate seasonality limits leaf carbon assimilation and wood productivity in tropical forests. *Biogeosciences*, v. 13, p. 2537-2562, 2016. DOI:10.5194/bg-13-2537-2016.

WAGNER, F. H. et al. Climate drivers of the amazon forest greening. *PLoS One*, v. 12, e0180932, 2017. DOI:10.1371/journal.pone.0180932.

WU, J. et al. Leaf development and demography explain photosynthetic seasonality in amazon evergreen forests. *Science*, v. 351, p. 972-976, 2016. DOI: 10.1126/science.aad50686.

ZHANG, Y. et al. Reduced solar-induced chlorophyll fluorescence from GOME-2 during Amazon drought caused by dataset artifacts. *Global Change Biology*. 2018. Accepted Author Manuscript. DOI:10.1111/gcb.14134.

ZHAO, M.; RUNNING, S.W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, v. 329, p. 940-943, 2010. DOI: 10.1126/science.1192666.

