



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia

UTILIZAÇÃO DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA ANÁLISE DE SECAS NA AMAZÔNIA NO SÉCULO XXI

Jéssica de Souza Panisset

Orientadores: D. Sc. Renata Libonati dos Santos (UFRJ)

D. Sc. José Ricardo de Almeida França (UFRJ)

Dezembro de 2016

UTILIZAÇÃO DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA ANÁLISE DE
SECAS NA AMAZÔNIA NO SÉCULO XXI

Jéssica de Souza Panisset

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (área: Meteorologia).

Orientadores: D. Sc. Renata Libonati dos Santos
e D. Sc. José Ricardo de Almeida França

Rio de Janeiro
Dezembro de 2016

UTILIZAÇÃO DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA ANÁLISE DE
SECAS NA AMAZÔNIA NO SÉCULO XXI

Jéssica de Souza Panisset

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM METEOROLOGIA.

Examinada por:

Prof.^a D. Sc. Renata Libonati dos Santos

Prof. D. Sc. José Ricardo de Almeida França

D. Sc. Caio Augusto dos Santos Coelho

Prof.^a D. Sc. Célia Marina Pedroso Gouveia

Prof. D. Sc. Leonardo de Faria Peres

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2016

Panisset, Jéssica de Souza

Utilização de dados de Sensoriamento Remoto para análise de secas na Amazônia no século XXI / Jéssica de Souza Panisset. – Rio de Janeiro: UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN, 2016.

XV, 57 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Renata Libonati dos Santos e José Ricardo de Almeida França.

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN Programa de Pós-graduação Meteorologia, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 51-57.

1. Seca. 2. Amazônia. 3. Século XXI. I. Panisset, Jéssica. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPGM/IGEO/CCMN, Programa de Pós-graduação em Meteorologia. III. Título.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me permitido alcançar tantas coisas nos últimos 3 anos, a maior parte das quais eu não me julgava capaz de conseguir.

À minha família e aos amigos, por não me terem deixado desistir. Obrigada por todas as inúmeras vezes em que me disseram: “aguenta mais um pouco”.

Aos meus orientadores e colaboradores Renata, José Ricardo, Leonardo e Daniela por toda a paciência, tempo, incentivo, discussões, ideias, telefonemas, mensagens, e-mails, reuniões via skype e o que mais eu possa estar esquecendo. Obrigada, na verdade, por tudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida no primeiro ano deste mestrado, e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro ao Projeto de Pesquisa intitulado “Sistema de Análise de Desastres e Riscos Ambientais: Utilizando Dados de Sensoriamento Remoto para Análise de Eventos Extremos”.

RESUMO

Grandes áreas da bacia Amazônica experimentaram três secas intensas apenas nos quinze primeiros anos do século XXI (2005, 2010 e 2015). Diferentes modelos climáticos que utilizam cenários futuros baseados no aumento da concentração de gases de efeito estufa e de aerossóis sugerem que eventos como estes podem ser cada vez mais frequentes, podendo provocar mudanças na dinâmica da floresta Amazônica, acelerando as mudanças climáticas globais. Um parâmetro chave para determinar a magnitude do efeito das extremas e recentes secas na Amazônia é a sensibilidade da floresta à seca, a qual pode ser avaliada através de índices de vegetação e de seca baseados em dados de sensoriamento remoto orbital. Desta forma, o objetivo deste trabalho é compreender a relação existente entre as variáveis meteorológicas e a vegetação em anos de seca, utilizando dados de temperatura da superfície continental (LST) e dos índices de vegetação obtidos através do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), dados de precipitação estimados pelo sensor TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) e dados de radiação de onda curta da reanálise MERRA (*Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications*) para o período de 2000 a 2015. Os resultados indicam que as três secas diferem entre si quanto à área e período de atuação, intensidade, localização e duração. O inverno (junho a setembro) foi a estação mais afetada em 2005 e em 2010, enquanto em 2015 foi o verão (outubro a janeiro). Corroborando estudos anteriores, observou-se que em 2005 houve um único epicentro no oeste da bacia Amazônica, o qual foi novamente afetado em 2010, juntamente com o noroeste e o sudeste da região. Em 2015 os epicentros se concentraram no leste da bacia. Foram observados alguns máximos históricos de radiação durante a seca de 2005 e de temperatura em 2010. A seca de 2015 apresentou-se como o evento mais abrangente e intenso durante os primeiros anos do século XXI, quando foram observados máximos de temperatura em toda a bacia Amazônica, além de máximos de radiação solar. Os índices de vegetação NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) e EVI (Índice de Realce de Vegetação) não forneceram evidências sobre a resposta da floresta à seca. Por outro lado, o monitoramento orbital de secas através de índices híbridos que utilizam NDVI e LST mostrou-se válido para a bacia Amazônica, confirmando o papel da temperatura da superfície como indicador do estresse hídrico da vegetação. Este trabalho é pioneiro em caracterizar a seca de 2015 na bacia Amazônica e compará-la com as secas extremas anteriores ocorridas em 2005 e

2010, abrindo novas perspectivas para a compreensão destes eventos sob o ponto de vista da resiliência da floresta.

Palavras-chave: Seca, Amazônia, século XXI.

ABSTRACT

Large areas of the Amazon basin experienced three intense droughts only in the first fifteen years of the 21st century (namely in 2005, 2010 and 2015). Different climate models using future scenarios based on increasing concentrations of greenhouse gases and aerosols suggest that events such as these may be more frequent, causing changes in the dynamics of the Amazon rainforest, accelerating global climate change. A key parameter to determine the magnitude of the recent extreme droughts in Amazon is forest sensitivity to drought, which can be assessed using vegetation and drought indices based on orbital remote sensing data. Thus, the objective of this work is to understand the relationship between meteorological variables and vegetation in drought years, using Land Surface Temperature (LST) and vegetation indices data obtained through the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sensor, rainfall data estimated by the TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) sensor and shortwave radiation data from the MERRA (Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications) reanalysis for the period from 2000 to 2015. Results show that the three events differ markedly in terms of areal and time coverage, intensity, location and duration. The winter (June to September) was the most affected season both in 2005 and 2010, while in 2015 it was the summer (October to January). Corroborating previous studies, there was only one epicenter in 2005 in the west of the Amazon basin, which was again affected in 2010 together with the northwest and the southeast area. In 2015 drought epicenters were concentrated in the east of the basin. It was observed some maximums of shortwave radiation in 2005 and of temperature in 2010. The 2015 drought was the broader and more intense event during the first years of the 21st century, when temperature historical maximums were recorded at the entire basin, together with historical maximum values of solar radiation. Results show that NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and EVI (Enhanced Vegetation Index) indices did not provide evidence on the forest's response to drought. On the other hand, the orbital monitoring of droughts through hybrid indices using NDVI and LST proved to be valid for the Amazon region, confirming the role of LST as an indicator of vegetation water stress. This work is the first to characterize the drought of 2015 in the Amazon basin and to compare it with the previous extreme droughts occurred in 2005 and 2010, opening new perspectives for the understanding of these events from the point of view of forest resilience.

Key words: Drought, Amazon, 21st century.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE ACRÔNIMOS	XV
1. INTRODUÇÃO	- 1 -
1.1. Motivação.....	- 1 -
1.2. Definição de seca	- 2 -
1.3. Precipitação na Amazônia e as Secas de 2005, 2010 e 2015.....	- 4 -
1.4. Descrição do problema.....	- 7 -
1.5. Objetivos e organização do trabalho	- 11 -
2. DADOS E METODOLOGIA	- 12 -
2.1. Região de estudo	- 12 -
2.2. Índices de Vegetação e de Seca.....	- 13 -
2.3. Variáveis meteorológicas	- 17 -
2.4. Dados.....	- 18 -
2.5. Metodologia	- 19 -
2.5.1. Qualidade dos Índices de Vegetação	- 19 -
2.5.2. Pré-processamento.....	- 20 -
2.5.3. Compostos sazonais.....	- 21 -
2.5.4. Anomalias padronizadas	- 22 -
3. RESULTADOS	- 23 -
3.1. Caracterização Meteorológica das Secas.....	- 23 -
3.2. Variáveis meteorológicas	- 29 -
3.3. Índices de Vegetação e de Seca.....	- 36 -
3.4. Comparação entre os eventos de seca de 2005, 2010 e 2015	- 41 -
4. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	- 47 -
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 51 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – A sequência geral da ocorrência dos diferentes tipos de seca. Adaptado de Zargar et al. (2011). - 3 -

Figura 2 – Localização da Bacia Amazônica na América do Sul e os diferentes tipos de cobertura do solo presentes segundo dados do produto de Land Cover do MODIS (2012), de acordo com a classificação do IGBP (*International Geosphere-Biosphere Programme*) (Friedl et al., 2010). - 13 -

Figura 3 – Anomalias padronizadas da precipitação durante JJAS de 2005 (a), JJAS de 2010 (b) e ONDJ de 2015 (c) em toda a área de estudo. Os epicentros das secas estão destacados através de retângulos pretos..... - 23 -

Figura 4 – Primeiros, segundos e terceiros mínimos de precipitação ocorridos em JJAS de 2005 (a), JJAS de 2010 (b) e ONDJ de 2015 (c). Na mesma região onde foram registrados mínimos de precipitação em 2005 (píxeis vermelhos), foram registrados segundos mínimos (píxeis azuis) em 2010, indicando que ambas as secas atingiram aquela região. Na série de dados de ONDJ, mínimos absolutos foram observados em 2015 em grande parte da bacia Amazônica. - 24 -

Figura 5 – Anomalias padronizadas da área afetada pela seca entre os anos 2000 e 2015 em JJAS (linha sólida) e ONDJ (linha pontilhada). As áreas afetadas pela seca são definidas como aquelas em que a anomalia padronizada da precipitação é menor do que -1. Os números sobre o gráfico indicam a porcentagem da área da bacia sob condições de seca em JJAS 2005, JJAS 2010 e ONDJ 2015..... - 25 -

Figura 6 – Identificação dos epicentros das secas de 2005 (a), 2010 (b) e 2015 (c). - 26 -

Figura 7 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da precipitação no epicentro da seca de 2005. - 27 -

Figura 8 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da precipitação nos epicentros 1 (superior), 2 (centro) e 3 (inferior) da seca de 2010..... - 28 -

Figura 9 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da precipitação nos epicentros 1 (superior), 2 (centro) e 3 (inferior) da seca de 2015..... - 28 -

Figura 10 – Anomalias padronizadas das variáveis meteorológicas Radiação Solar (a, b, c) e Temperatura da Superfície (d, e, f) durante JJAS de 2005 (esquerda), JJAS de 2010 (centro) e ONDJ de 2015 (direita). - 30 -

Figura 11 – Primeiros, segundos e terceiros mínimos das variáveis meteorológicas Radiação Solar (a, b, c) e Temperatura da Superfície (d, e, f) durante JJAS de 2005 (esquerda), JJAS de 2010 (centro) e ONDJ de 2015 (direita). - 30 -

Figura 12 – Primeiros, segundos e terceiros máximos das variáveis meteorológicas Radiação Solar (a, b, c) e Temperatura da Superfície (d, e, f) durante JJAS de 2005 (esquerda), JJAS de 2010 (centro) e ONDJ de 2015 (direita). - 31 -

Figura 13 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da LST no epicentro da seca de 2005..... - 33 -

Figura 14 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da LST nos epicentros 1 (superior), 2 (centro) e 3 (inferior) da seca de 2010..... - 33 -

- Figura 15 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da LST nos epicentros 1 (superior), 2 (centro) e 3 (inferior) da seca de 2015..... - 34 -
- Figura 16 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da radiação solar no epicentro da seca de 2005. - 35 -
- Figura 17 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da radiação solar nos epicentros 1 (superior), 2 (centro) e 3 (inferior) da seca de 2010..... - 35 -
- Figura 18 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da radiação solar nos epicentros 1 (superior), 2 (centro) e 3 (inferior) da seca de 2015..... - 36 -
- Figura 19 – Anomalias padronizadas de EVI (a, b, c), NDVI (d, e, f), VCI1 (g, h, i), VCI2 (j, k, l), TCI (m, n, o), VHI1(p, q, r) e VHI2 (s, t, u) durante JJAS de 2005 (esquerda), JJAS de 2010 (centro) e ONDJ de 2015 (direita) em toda a área de estudo. - 38 -
- Figura 20 – Primeiros, segundos e terceiros mínimos de VCI2 (a, b, c), TCI (d, e, f) e VHI2 (g, h, i) durante JJAS de 2005 (esquerda), JJAS de 2010 (centro) e ONDJ de 2015 (direita) em toda a área de estudo. - 39 -
- Figura 21 – Anomalias padronizadas da área afetada pela seca (linha azul) e pelo escurecimento entre os anos 2000 e 2015 em JJAS (esquerda) e ONDJ (direita), de acordo com o EVI (linha verde sólida) e o NDVI (linha verde pontilhada). As áreas afetadas pela seca (escurecimento) são definidas como aquelas em que a anomalia padronizada da precipitação (do índice de vegetação/seca) é menor do que -1..... - 40 -
- Figura 22 – Anomalias padronizadas da área afetada pela seca e pelo escurecimento entre os anos 2000 e 2015 em JJAS (painéis superiores) e ONDJ (painéis inferiores), de acordo com o VHI1 (a, c) e o VHI2 (b, d). Também são mostradas as anomalias padronizadas áreas afetadas por anomalias padronizadas de LST acima de +1. As áreas afetadas pela seca (escurecimento) são definidas como aquelas em que a anomalia padronizada da precipitação (do índice de vegetação/seca) é menor do que -1..... - 41 -
- Figura 23 – *Boxplots* das anomalias padronizadas das variáveis meteorológicas de JJAS 2005 (esquerda) e dos índices de vegetação/seca de JJAS 2005 (centro) e de ONDJ 2005 (direita) no epicentro da seca de 2005..... - 42 -
- Figura 24 – *Boxplots* das anomalias padronizadas das variáveis meteorológicas de JJAS 2010 (painéis superiores), dos índices de vegetação/seca de JJAS 2010 (painéis centrais) e de ONDJ 2010 (painéis inferiores) em cada um dos três epicentros..... - 43 -
- Figura 25 – *Boxplots* das anomalias padronizadas das variáveis meteorológicas de ONDJ 2015 (painéis superiores), dos índices de vegetação/seca de ONDJ 2015 (painéis centrais) e de FMAM 2016 (painéis inferiores) em cada um dos três epicentros. - 44 -
- Figura 26 – Primeiros, segundos e terceiros quartis (percentis 25, 50 e 75) das séries temporais dos valores médios dos índices EVI, NDVI, VHI1 e VHI2 na área afetada pela seca em cada epicentro identificado na bacia Amazônica. Para os epicentros de 2005 e de 2010 foram utilizadas as séries temporais de JJAS, e para 2015, de ONDJ. A área afetada pela seca é definida como aquela em que a anomalia padronizada da precipitação é menor que -1..... - 46 -
- Figura 27 – Primeiros, segundos e terceiros quartis das séries temporais dos valores médios das variáveis meteorológicas Precipitação, LST e Radiação Solar na área afetada pela seca em cada epicentro identificado na Amazônia. Para os epicentros de 2005 e de 2010 foram utilizadas as

séries temporais de JJAS, e para 2015, de ONDJ. A área afetada pela seca é definida como aquela em que a anomalia padronizada da precipitação é menor que -1..... - 47 -

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados utilizados no presente trabalho e suas respectivas fontes, resolução inicial, unidade e período.	- 19 -
Tabela 2. Correspondência entre as estações (quadrimestres) e os compostos de 16 dias de NDVI e EVI.	- 21 -
Tabela 3 – Principais coberturas de solo encontradas em cada epicentro das secas de 2005, 2010 e 2015 em percentual de área coberta.	- 26 -
Tabela 4 – Porcentagem da área da bacia Amazônica em que foram registrados primeiros, segundos ou terceiros máximos e mínimos nos compostos das variáveis meteorológicas de JJAS 2005, JJAS 2010 e ONDJ 2015.....	- 32 -
Tabela 5 – Porcentagem de píxeis em que foram registrados primeiros, segundos ou terceiros máximos e mínimos nos compostos de cada índice em JJAS 2005, JJAS 2010 e ONDJ 2015.....	- 39 -

LISTA DE ACRÔNIMOS

ARVI	Atmospheric Resistant Vegetation Index
BT	Brightness Temperature
CMG	Climate Modeling Grid
EVI	Enhanced Vegetation Index
FMAM	Fevereiro-Março-Abril-Maio
GEOS	Goddard Earth Observing System Data Assimilation System
GPCC	Global Precipitation Climatology Centre
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JFM	Janeiro-Fevereiro-Março
JAS	Julho-Agosto-Setembro
JJAS	Junho-Julho-Agosto-Setembro
LAI	Leaf Area Index
LST	Land Surface Temperature
MAIAC	Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction
MERRA	Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near-infrared
ONDJ	Outubro-Novembro-Dezembro-Janeiro
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SVI	Standardized Vegetation Index
TCI	Temperature Condition Index
TMPA	TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
VCI	Vegetation Condition Index
VHI	Vegetation Health Index
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Extremos climáticos são fenômenos meteorológicos incomuns, nos quais uma determinada variável meteorológica apresenta valores acima (abaixo) de um limiar próximo ao limite superior (inferior) dos valores já ocorridos (IPCC, 2012). Exemplos de extremos climáticos são as secas, as ondas de calor e de frio, as cheias, os furacões e os tornados.

O caráter e a severidade dos impactos advindos de extremos climáticos dependem não somente dos extremos em si, mas também da exposição (presença de pessoas, meios de subsistência, recursos e serviços ambientais, infraestrutura e recursos econômicos, sociais ou culturais em locais que possam ser afetados negativamente) e da vulnerabilidade (propensão ou predisposição a ser afetado de forma adversa), as quais são dinâmicas, variando nas escalas temporal e espacial e dependentes de fatores econômicos, sociais, geográficos, demográficos, culturais, institucionais, governamentais e ambientais (IPCC, 2012). Cenários futuros baseados no aumento da concentração de gases de efeito estufa e de aerossóis na atmosfera sugerem que extremos climáticos podem ser cada vez mais frequentes (Marengo *et al.*, 2008). Diversos modelos climáticos globais e regionais apontam para um futuro mais quente na América do Sul, com a temperatura do ar aumentando entre 2 e 5 °C até 2100 (Magrin *et al.*, 2014). Com relação à precipitação, ainda existe uma considerável incerteza sobre o seu comportamento futuro, em especial sobre a Amazônia. No entanto, o aumento da temperatura pode induzir o aumento da evapotranspiração nas regiões tropicais, o que resultaria na redução da quantidade de umidade no solo, ainda que a precipitação não varie expressivamente (Salazar, Nobre e Oyama, 2007). Adicionalmente, alterações no uso do solo e a queima de biomassa associada ao aumento de incêndios florestais e a subsequente injeção de aerossóis na atmosfera têm o potencial para afetar o início da estação chuvosa e a quantidade de precipitação na Amazônia (Andreae *et al.*, 2004). Se as perspectivas de aumento da frequência de secas se confirmarem, a Amazônia ocidental pode enfrentar alterações nos atuais padrões hidroecológicos em menos de uma década (Maeda *et al.*, 2015). Caso tais secas provoquem a substituição da floresta por savanas em um clima mais seco e quente como alguns estudos têm sugerido (Cox *et al.*, 2004; Huntingford *et al.*, 2008), o carbono liberado para a atmosfera vai acelerar as mudanças climáticas globais de forma expressiva (Cox *et al.*, 2000).

Um parâmetro chave para determinar a magnitude deste efeito é a sensibilidade – ou resistência – das florestas tropicais à seca. No entanto, a sensibilidade à seca destas florestas é mal compreendida e tem sido objeto de diversos estudos científicos, principalmente no caso da floresta Amazônica. A utilização de índices de vegetação com base em sensoriamento remoto na investigação dessa sensibilidade tem sido extensivamente discutida, com diversos resultados conflitantes sobre as últimas secas ocorridas na região (Saleska *et al.*, 2007; Samanta *et al.*, 2010).

Nos anos de 2005 e 2010, grandes áreas da bacia Amazônica experimentaram duas das secas mais intensas dos últimos 100 anos (Marengo *et al.*, 2011). Durante a confecção deste estudo, no entanto, mais uma vez a Amazônia viu-se atingida por uma intensa e generalizada seca em 2015. Tais episódios de secas ocorridos no século XXI proporcionam uma oportunidade única para o estudo da sensibilidade da floresta Amazônica ao déficit hídrico e do desempenho de diferentes índices de vegetação e de seca com base em sensoriamento remoto.

O presente estudo será um dos primeiros a analisar a recente seca de 2015 sob o aspecto dos índices de vegetação e de seca e variáveis meteorológicas obtidos através de sensoriamento remoto.

1.2. Definição de seca

A seca é um desastre natural que ocorre em praticamente todas as zonas climáticas, mesmo em áreas com altas taxas de precipitação, uma vez que estão principalmente relacionadas à redução da quantidade de precipitação recebida em um determinado período de tempo, como uma estação ou ano (Mishra e Singh, 2010). Ao contrário da aridez, que é uma característica permanente do clima e restrita a áreas com baixas taxas de precipitação (Wilhite, 1994), a seca é uma irregularidade temporária, que também não deve ser confundida com uma onda de calor, a qual possui uma escala de tempo típica associada de uma semana, enquanto a seca pode persistir por meses ou até mesmo anos (Chang e Wallace, 1987; Lyon, 2009).

Segundo Zargar *et al.* (2011), a definição de seca é por si só complexa, sendo considerada em geral como uma deficiência extrema de precipitação. A comunidade meteorológica define a seca em termos gerais como uma “prolongada ausência ou marcada deficiência na precipitação”, uma “deficiência de precipitação que resulta em escassez de água para alguma atividade ou grupo”, ou um “período de tempo anormalmente seco

suficientemente prolongado para que a falta de precipitação cause sério desequilíbrio hidrológico” (AMSC, 1997; WMO, 1992).

A Sociedade Americana de Meteorologia (AMS, do inglês *American Meteorological Society*) agrupa as definições e os tipos de seca em quatro categorias: meteorológica ou climatológica, agrícola, hídrica e socioeconômica. Tais secas ocorrem em uma ordem particular, como pode ser visto na Figura 1 (Zargar *et al.*, 2011): deficiências na precipitação levam à ocorrência da seca meteorológica, durante a qual são observadas temperaturas elevadas e umidade relativa baixa, além de aumento da evaporação e da transpiração. A redução da infiltração leva à deficiência de umidade do solo, estabelecendo-se assim a seca agrícola, que leva ao estresse hídrico das plantas, à redução da biomassa e da produtividade. Quando os déficits de precipitação ocorrem sobre um período prolongado, a disponibilidade de água nas camadas superficiais e subsuperficiais é afetada, reduzindo o nível de rios, lagos e reservatórios, causando a seca hidrológica, que persiste até bastante tempo após o fim da seca meteorológica. Por último, o conceito de seca socioeconômica leva em consideração a estreita relação entre a seca e as atividades humanas (Wilhite, 1994), associando a oferta e a demanda de algum bem econômico ou serviço com elementos das secas meteorológica, hidrológica e agrícola. Assim, a seca poderia ser definida como o momento em que a demanda excede a oferta, a qual diminui devido às condições do tempo.

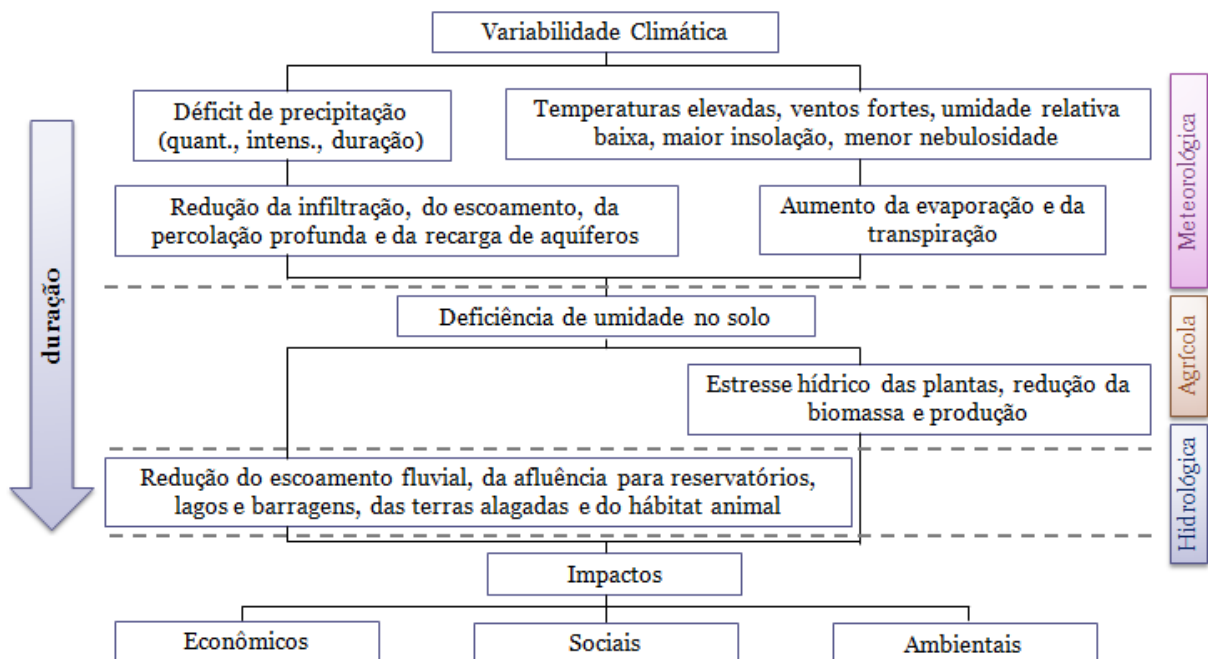


Figura 1 – A sequência geral da ocorrência dos diferentes tipos de seca. Adaptado de Zargar *et al.* (2011).

1.3. Precipitação na Amazônia e as Secas de 2005, 2010 e 2015

A região Amazônica é caracterizada por diversos regimes de precipitação, uma vez que se estende pelos dois hemisférios. De fato, durante um ano “normal”, devido ao aquecimento alternativo dos hemisférios, a precipitação na região mostra fases opostas entre as partes norte e sul, com uma estação chuvosa no inverno austral na porção norte (precipitação continental influenciada pelo deslocamento meridional da Zona de Convergência Intertropical – ZCIT) e no verão na porção sul (precipitação resultante da convecção organizada pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (Marengo e Espinoza, 2015). Desta forma, a precipitação máxima na porção sul da bacia Amazônica ocorre dois meses antes (dezembro/janeiro/fevereiro) do que na porção central (fevereiro/março/abril) e seis meses antes do que na porção norte (junho/julho/agosto). A precipitação mínima no sul da bacia ocorre em junho/julho/agosto, seis meses antes do que no norte (janeiro/fevereiro/março) (Tomasella *et al.*, 2010). A região Amazônica, principalmente a parte central, sofre grande influência do ramo descendente da Célula de Hadley, o qual induz um período de seca bem característico (Fisch, Marengo e Nobre, 1998).

Anomalias negativas de precipitação na região Amazônica geralmente têm como causas a ocorrência de eventos de El Niño e/ou o forte aquecimento das águas superficiais do Atlântico tropical Norte durante o inverno e a primavera austrais (Marengo *et al.*, 2008). Três das mais severas secas registradas na Amazônia foram associadas a eventos muito intensos de El Niño, nos anos de 1925–26, 1982–83, e 1997–98, sendo que as duas últimas também foram influenciadas pelo intenso aquecimento das águas do Atlântico tropical Norte. Outras grandes secas ocorreram na região nos anos de 1963-64 e 1979-81, não estando relacionadas a eventos de El Niño.

De fato, de acordo com Yoon e Zeng (2010), a temperatura da superfície do mar (TSM) do Atlântico Norte tropical possui uma influência na precipitação da Amazônia comparável àquela exercida pelas TSM do Pacífico equatorial, enquanto as TSM do Atlântico Sul parecem ter um impacto limitado na região.

As TSM do Atlântico tropical Norte exercem um papel fundamental na determinação da variabilidade interanual da precipitação na Amazônia, especialmente no sul da região e durante a estação seca (julho a outubro), enquanto o Pacífico tropical possui uma forte correlação com a precipitação na Amazônia durante a estação chuvosa (dezembro a abril). Apesar da correlação com o El Niño ser mais forte e generalizada, este fenômeno possui

maiores impactos no leste da Amazônia (em direção à foz do rio Amazonas) (Yoon e Zeng, 2010).

Os mecanismos responsáveis pela influência do Atlântico na bacia Amazônica são a alteração no posicionamento da circulação divergente norte-sul (Célula de Hadley) e o deslocamento da ZCIT em direção às águas mais quentes. Um aquecimento no Atlântico tropical Norte induz movimentos descendentes sobre a bacia Amazônica, resultando em uma redução da convergência de fluxo de umidade e precipitação abaixo do normal. Já a influência do El Niño na Amazônia se deve a anomalias na circulação leste-oeste (Célula de Walker), de forma que um aquecimento no Pacífico Central altera o posicionamento da Célula de Walker, ocasionando movimentos descendentes anômalos sobre a região nordeste do Brasil e a porção leste da Amazônia, resultando em chuvas abaixo do normal em toda a região (Yoon e Zeng, 2010).

Desta forma, segundo Yoon e Zeng (2010), nos anos em que há um intenso fenômeno de El-Niño a precipitação na Amazônia é dominada pela influência do Pacífico; quando o fenômeno é fraco e o Atlântico Norte está mais quente que o normal, a influência do Atlântico domina.

Em 2005, ano em que não se verificou a ocorrência do fenômeno El Niño, grandes setores do oeste da bacia Amazônica experimentaram a mais severa seca em 40 anos, e uma das mais intensas dos últimos 100 anos (Marengo *et al.*, 2008). Diferentemente das secas relacionadas à ocorrência deste fenômeno, que costumam abranger grande parte da Amazônia e até o Nordeste brasileiro, em 2005 a seca restringiu-se à porção sudoeste da Amazônia, resultado de uma estação seca maior e mais extrema do que o normal.

De acordo com Marengo *et al.* (2008), a falta de chuva causou diversos problemas à população local, em especial a ribeirinha, tais como a mortandade de peixes, a destruição de plantações, a falta de comida, a interrupção da navegação nos rios, o encalhamento de barcos e problemas na geração de hidroeletricidade. Além disso, foi facilitada a ocorrência de incêndios florestais, e devido à fumaça aeroportos, escolas e comércio foram fechados. Houve a proliferação de doenças e instaurou-se um caos econômico na região.

O aquecimento do Atlântico foi a causa mais provável da seca de 2005 (Marengo *et al.*, 2008). Durante este ano, as águas do Atlântico tropical Norte estiveram anormalmente quentes (uma tendência iniciada em 2003), enquanto as condições do Pacífico equatorial eram

próximas das normais. Além disso, o gradiente meridional de TSM (a diferença entre as TSM do Atlântico tropical Norte e do Atlântico tropical Sul) esteve bastante elevado, pouco acima de 1 °C, marca atingida apenas uma dezena de vezes entre os anos de 1920 e 2005.

A seca de 2005 foi à época considerada como “uma em um século”. Em 2010, no entanto, quando a TSM do Atlântico Norte se encontrava mais uma vez com valores acima da média, outra seca, ainda mais severa, atingiu a região Amazônica. Assim como no evento de 2005, este também coincidiu com a estação seca (julho a setembro), e novamente os níveis de precipitação voltaram ao normal nos meses seguintes.

O nível das águas do Rio Negro no porto de Manaus, um dos mais utilizados índices para a caracterização de seca na Amazônia devido ao fato de representar a precipitação de toda a porção oeste da bacia Amazônica e de ser a mais antiga série de dados da região, atingiu em outubro de 2010 o seu mais baixo valor desde o ano de 1902: enquanto em 2005 o nível do rio foi de 14,75 m (o oitavo mais baixo desde o início dos registros), em outubro de 2010 este valor foi de 13,63 m, tornando este o ano mais seco na região desde o início dos registros desses dados (Xu *et al.*, 2011).

De acordo com Espinoza *et al.* (2011), a intensidade da seca de 2010, quando comparada à de 2005, pode ser explicada pela ocorrência de um evento de El Niño no verão austral, além das já mencionadas anomalias positivas de TSM no Atlântico Norte no outono e no inverno austrais.

A ocorrência de um El Niño em 2009-2010 é uma diferença notável em relação à seca de 2005, quando não foi observada anomalia de TSM no Pacífico equatorial (Marengo *et al.*, 2008). De acordo com Espinoza *et al.* (2011), o ano de 2010 foi um ano de transição entre eventos de El Niño e La Niña; entre outubro de 2009 e março de 2010, predominavam anomalias positivas de TSM sobre o Pacífico equatorial (>2 °C), correspondendo ao El Niño de 2009-2010. Entre abril e junho, a TSM estava próxima do normal, e no inverno austral, surgiram as anomalias negativas, tendo início a La Niña de 2010-2011.

Segundo Lewis *et al.* (2011), a seca de 2010 abrangeu uma área bem maior que a de 2005 (3,0 e 1,9 milhões de quilômetros quadrados, respectivamente), sendo marcada por três epicentros: no sudoeste da Amazônia, no centro-norte da Bolívia e no Estado do Mato Grosso. Em 2005, apenas um epicentro foi detectado, no sudoeste da Amazônia.

Um intenso El Niño é apontado como a causa da seca de 2015 sobre a Amazônia (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2016). O El Niño 2015/16 foi o primeiro evento intenso dos últimos 18 anos, apresentando magnitude comparável – ou até mesmo superior – a do evento de 1997/98, o qual foi considerado o evento climático do século XX devido à sua magnitude extraordinária, com consequências globais.

As secas induzidas pelo aquecimento das TSM no Pacífico equatorial são caracterizadas pela abrangência generalizada na Amazônia. De acordo com Jiménez-Muñoz *et al.* (2016), no entanto, o evento de 2015/16, registrou um dipolo entre o sudoeste (condições úmidas) e o nordeste (condições de seca) da bacia Amazônica. Como resultado, a área mais afetada pela seca neste ano foi o nordeste da região.

Além do déficit de precipitação, a seca de 2015/16 caracterizou-se por altas temperaturas, induzidas tanto pela ocorrência do El Niño quanto pela tendência de aumento da temperatura observada nos últimos anos na região. Em 2015 foram registrados recordes de temperatura na Amazônia, e esse aquecimento anômalo traduziu-se na maior área sob condições de seca extrema já registrada na região, cerca de 13% da floresta (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2016).

1.4. Descrição do problema

Desde o lançamento dos primeiros satélites de observação da Terra, esforços consideráveis têm sido conduzidos para o estudo do estado e da dinâmica da vegetação utilizando índices de vegetação com base em dados de sensoriamento remoto. Diferentes índices de vegetação (Bannari *et al.*, 1995) têm sido desenvolvidos através da combinação de duas ou mais bandas espectrais, onde assume-se a hipótese de que uma análise multiespectral fornece supostamente mais informações do que uma única banda. Grande parte dos índices de vegetação utiliza valores de radiância¹, reflectância² da superfície ou reflectância no topo da atmosfera em bandas espectrais localizadas na região do visível (~0,6 µm) e do infravermelho-próximo (NIR, do inglês *Near-infrared*) (~0,8 µm) do espectro eletromagnético. Estes índices são bem correlacionados com vários parâmetros da vegetação como a biomassa verde, conteúdo de clorofila, índice de área foliar, perda e danos foliar, atividade fotossintética, fluxos de carbono, fenologia, entre outros. Adicionalmente, eles são

¹ A radiância é a quantidade de energia radiante que deixa uma unidade de área no terreno, sendo medida por um sensor.

² A reflectância é a razão entre a radiância e a irradiância (quantidade de energia incidente em uma unidade de área, medida no mesmo instante de tempo), sendo uma grandeza adimensional.

também úteis para diferentes análises de imagem, como classificação de culturas e detecção de mudanças nas condições de esverdeamento da vegetação.

Apesar de numerosos estudos sobre diferentes índices de vegetação e de seca com base em sensoriamento remoto e a aplicação destes em diversas disciplinas como mudanças climáticas, ciclos biogeoquímicos e estudos ecológicos, muitas questões ainda permanecem abertas sobre a representabilidade destes índices durante os episódios de seca na região Amazônica. Saleska et al. (2007), utilizando dados da quarta versão do EVI - Índice de Realce de Vegetação (do inglês *Enhanced Vegetation Index*) (Liu e Huete, 1995) do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), reportaram um esverdeamento (do inglês *greening*) na Amazônia durante a seca de 2005, sugerindo que florestas intactas poderiam ser muito mais resilientes à seca do que se esperava, podendo retirar água do solo através de suas profundas raízes e respondendo positivamente ao aumento na radiação solar devido à falta de nuvens, aumentando assim a produtividade vegetal. Estes resultados contrariam os registros de aumento na mortalidade das árvores (Phillips *et al.*, 2009) e de extensiva queima de biomassa (Aragão *et al.*, 2007) durante o ano de 2005 e foram especialmente contestados por Samanta *et al.* (2010), sob a alegação de serem irreprodutíveis com ambos os dados da quarta versão do EVI (quando excluídos os efeitos de aerossóis, sombreamentos e nuvens, isto é, quando filtrados) e da quinta versão (filtrados ou não).

Anderson *et al.* (2010), utilizando o mesmo conjunto de dados, também reportaram anomalias positivas de EVI em 2005, porém em áreas onde comprovadamente houve mortalidade da vegetação, sugerindo que a resposta do EVI poderia estar relacionada a mudanças estruturais nas florestas afetadas pela seca. Por outro lado, Morton *et al.* (2014) argumentaram que o aparente esverdeamento da floresta Amazônica presente em dados de sensoriamento remoto resultam de alterações sazonais na reflectância no NIR, um artefato de variações na geometria sol-sensor. De acordo com o estudo, a remoção de artefatos de mudança de geometria sol-sensor nos dados de reflectância no vermelho e no NIR do MODIS eliminariam o esverdeamento no EVI do MODIS durante os meses da estação seca.

Segundo Hilker *et al.* (2014), a cobertura vegetal da Amazônia é altamente sensível a alterações nos padrões de precipitação e a sua redução desde 2000 diminuiu a condição de esverdeamento da vegetação em grandes partes da Amazônia. Os autores acreditam ter produzido evidências de que secas persistentes poderiam degradar a floresta Amazônica, o que poderia ter efeitos de cascata no balanço global de carbono e na dinâmica do clima. Seu

trabalho mostrou ainda que porções da Amazônia de fato ficam mais verdes durante a estação seca, o que é consistente com estudos prévios que indicam limitações de luz durante a estação úmida. Durante secas prolongadas, no entanto, uma vez que o fornecimento de água no solo é drenado, a folhagem começa a cair, e o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada - NDVI (do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*) (Rouse Jr *et al.*, 1974) é reduzido. Isto contradiz registros prévios de esverdeamento durante secas; ao contrário, confirma o perecimento da vegetação em grande escala durante secas extremas, correspondendo bem aos padrões espaciais de mudanças na biomassa observadas em campo.

Por outro lado, Feldpausch *et al.* (2016), com base em dados *in situ* na Amazônia, não acharam evidências para a hipótese de que repetidas secas levam a impactos realçados, sugerindo que os efeitos da seca de 2010 foram em grande parte independentes de secas anteriores. Enquanto a mortalidade cresceu expressivamente em 2010, os efeitos da seca não foram substancialmente agravados em 2010 naquelas florestas que enfrentaram secas antes deste ano. Assim, a mudança líquida da biomassa durante o evento de 2010 foi aproximadamente a mesma de anos anteriores e independente do fato de uma determinada região ter sido ou não afetada por secas na história recente, antes de 2010. Desta forma, a hipótese de que os impactos de secas anteriores podem ter simplesmente eliminado árvores destinadas a morrer não é validada pelos resultados. Os resultados deste artigo, de uma consistente redução no crescimento das árvores associada à seca de 2010, contrastam com o reporte de Doughty *et al.* (2015) de que a produtividade vegetal permaneceu constante neste ano.

De acordo com Atkinson, Dash e Jeganathan (2011), no entanto, definitivamente não é possível detectar a resposta da vegetação à seca utilizando índices de vegetação baseados em dados de sensoriamento remoto, isto é, observando as mudanças em sua condição de esverdeamento. Neste artigo, novamente foi reportada uma tendência significativa de diminuição dos valores dos índices, porém os autores afirmam que esta tendência é independente da ocorrência de secas, podendo ser causada por fatores ambientais ou relacionados a ruídos, os quais requerem mais investigação. O artigo conclui, depois de diversas análises, que tanto o aumento da condição de esverdeamento da vegetação observado por Saleska *et al.* (2007) em 2005 e quanto o declínio observado por Xu *et al.* (2011) em 2010 não podem ser explicados pelos eventos de seca ocorridos nestes anos.

Atkinson, Dash e Jeganathan (2011) ressaltam que os resultados não mostram que o funcionamento e a produtividade da vegetação da Amazônia não respondem à seca, uma vez que foi reportado anteriormente que secas resultam em declínio na produtividade primária bruta e líquida na vegetação da Amazônia (Lewis *et al.*, 2011; Zhao e Running, 2010). Em vez disso, os resultados de Atkinson, Dash e Jeganathan (2011) demonstram a inabilidade dos índices de vegetação EVI e NDVI em detectar a resposta da Amazônia a um evento de seca. Índices de vegetação de banda larga (como NDVI e EVI) tendem a saturar em áreas de cobertura vegetal com estrutura densa de múltiplas camadas de florestas tropicais úmidas, como a Amazônia (Asner *et al.*, 2004). Segundo os autores, é improvável que a perda de cobertura vegetal devido à seca seja suficiente para produzir alterações detectáveis no sinal da condição de esverdeamento apresentada por tais índices. Assim, enquanto a produtividade pode ser reduzida durante as secas, o grau de esverdeamento permanece alto.

Todos os artigos mencionados anteriormente que utilizaram índices de vegetação baseados em sensoriamento remoto utilizaram as versões 4 e/ou 5 dos produtos do MODIS. Bi *et al.* (2016), contudo, analisaram as respostas da Amazônia às secas de 2005 e 2010 utilizando dados de EVI e NDVI provenientes das versões 5 e 6 do MODIS e do MAIAC (*Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction*) do MODIS. Para a seca de 2005, todos os dados de NDVI apontam para uma diminuição da condição de esverdeamento (ou seja, um escurecimento - do inglês *browning*) ou nenhuma mudança na maior parte das regiões impactadas pela seca, enquanto o EVI, especialmente da versão 5, mostrou aumento da condição de esverdeamento nas áreas afetadas pela seca. Os resultados contraditórios entre NDVI e EVI nos dados da versão 5 do MODIS, de acordo com os autores, podem ser devido aos diferentes algoritmos de recuperação. O NDVI é calculado usando apenas as bandas do vermelho e do NIR, enquanto o EVI usa as duas bandas e o azul. A banda do azul recebe maiores porcentagens de radiação atmosférica devido ao espalhamento Rayleigh³ do que as do vermelho e do NIR. O espalhamento Rayleigh na banda do azul deveria ter sido corrigido nos produtos do MODIS sob condições ideais, mas as fortes e frequentes quantidades de aerossóis sobre a Amazônia durante as secas torna a correção atmosférica insuficiente, resultando em reflectâncias elevadas na banda do azul e, conseqüentemente, em elevados valores de EVI. Desta forma, correções atmosféricas incompletas elevam valores de EVI.

³Refere-se ao espalhamento da luz visível (0,4-0,7 μm) por moléculas atmosféricas, as quais são muito menores que o comprimento de onda dos fótons espalhados. Uma vez que a intensidade espalhada por moléculas de ar numa direção específica é inversamente proporcional ao comprimento de onda, a luz azul é mais espalhada do que as demais, e assim o céu, quando visto longe do disco do Sol, parece azul (Liou, 2002).

Ainda de acordo com Bi *et al.* (2016), para a seca de 2010, todas as três versões do NDVI mostram um extensivo escurecimento em toda a vegetação impactada pela seca. Os padrões contraditórios das anomalias padronizadas do NDVI (escurecimento) e do EVI (esverdeamento) da versão 6 sugerem que também possam existir contaminações atmosféricas residuais nos dados da sexta versão de EVI (uma vez que contaminações atmosféricas residuais possuem efeitos opostos no NDVI e no EVI: diminuem NDVI e elevam EVI. Assim, se ambos NDVI e EVI apontam para o aumento ou a diminuição da “verdura”, então os dados não estão contaminados).

Com relação à tendência de diminuição dos valores dos índices de vegetação – tendência de escurecimento – encontrada em artigos anteriores, Bi *et al.* (2016) mostraram que esta tendência não foi encontrada nos dados mais modernos de EVI e NDVI (da versão 6 do MODIS e do MAIAC).

Adicionalmente, Toomey *et al.* (2011), analisando dados de temperatura da superfície terrestre (LST) do satélite MODIS, concluíram que a perda de biomassa durante as secas de 2005 e 2010 não se deveu apenas ao estresse hídrico, mas também ao estresse térmico, uma vez que as regiões afetadas pelos eventos de 2005 e 2010 não estavam apenas mais secas, mas notavelmente mais quentes. Da mesma forma, Jiménez-Muñoz *et al.* (2013) analisaram dados de LST e de temperatura da superfície do mar (TSM) a fim de analisar a extensão, a variação interanual e a tendência de longo prazo das anomalias térmicas na Amazônia e sua relação com os padrões de TSM observados nos oceanos Atlântico e Pacífico. Seus resultados mostram um aquecimento significativo e sustentado sobre a Amazônia durante a última década (2000 – 2012), especialmente durante as secas de 2005 e 2010, mas também nos anos de 2011 e 2012. Tais eventos recentes de aquecimento estão relacionados a anomalias de TSM no Atlântico tropical durante JAS (julho-agosto-setembro) e no Pacífico central/leste durante JFM (janeiro-fevereiro-março). Além disso, as anomalias de TSM em ambos os oceanos se combinam de diferentes maneiras e em diferentes estações de forma a induzir aquecimento sobre a Amazônia.

1.5. Objetivos e organização do trabalho

Com base na discussão sobre a ocorrência das três grandes secas na bacia Amazônica no século XXI e seus impactos na vegetação, este trabalho tem como objetivos:

- 1) Analisar os eventos das secas na Amazônia nos anos de 2005, 2010 e 2015 do ponto de vista de variáveis meteorológicas;

2) Verificar a utilidade dos índices com base em sensoriamento remoto em captar a resposta da floresta Amazônica à seca;

3) Entender a relação existente entre as variáveis meteorológicas e a vegetação em anos de seca e identificar qual variável meteorológica teve maior influência em cada evento.

Espera-se que os resultados encontrados forneçam evidências sobre a sensibilidade da floresta Amazônica à seca. Neste contexto, as etapas necessárias para o cumprimento dos objetivos podem ser divididas da seguinte forma:

- Utilizar índices de seca com base em índices de vegetação, nomeadamente o NDVI e o EVI para testar a resposta destes aos eventos selecionados;
- Utilizar o método híbrido (método que combina dados de reflectância e de emissão no infravermelho térmico) VHI (Índice de Saúde da Vegetação, do inglês *Vegetation Health Index*) (Kogan, 1995a); e
- Utilizar dados de variáveis meteorológicas como precipitação, temperatura da superfície e radiação solar a fim de compreender a relação existente entre estas e a vegetação em anos de seca.

Incluindo a presente Introdução, a dissertação está organizada em cinco capítulos. O capítulo 1 apresenta a motivação para o trabalho e um breve histórico dos principais artigos sobre a utilização de índices de vegetação e a detecção de secas na Amazônia. O capítulo 2 fornece uma descrição de todos os dados utilizados e a metodologia empregada, que inclui a mudança da resolução, a confecção dos compostos sazonais e a filtragem da qualidade dos dados, além da definição das anomalias padronizadas. O capítulo 3 expõe os resultados encontrados para a caracterização das três secas extremas do século XXI através da análise de variáveis meteorológicas e índices de vegetação e seca derivados de sensoriamento remoto. O capítulo 4 apresenta as principais conclusões obtidas neste trabalho. Finalmente, o capítulo 5 cita as referências bibliográficas utilizadas.

2. DADOS E METODOLOGIA

2.1. Região de estudo

A região de estudo deste trabalho consiste na bacia Amazônica (Figura 2), a qual possui uma área estimada de 6,3 milhões de quilômetros quadrados, sendo aproximadamente 5 milhões em território brasileiro e o restante dividido entre os países do Peru (17%), Bolívia (11%), Colômbia (5,8%), Equador (2,2%), Venezuela (0,7%) e Guiana (0,2%). Esta região é

limitada a oeste pela Cordilheira dos Andes (com elevações de até 6000 m), a norte pelo Planalto das Guianas (com picos montanhosos de até 3000 m), a sul pelo Planalto Central (altitudes típicas de 1200 m) e a leste pelo Oceano Atlântico, por onde toda a água captada na bacia escoar para o mar (Fisch, Marengo e Nobre, 1998). A vegetação é em sua maior parte composta por florestas perenes de folha larga (do inglês *evergreen broadleaf forest*), sendo encontradas também regiões de savana (estados de Rondônia e Mato Grosso, além da Bolívia).

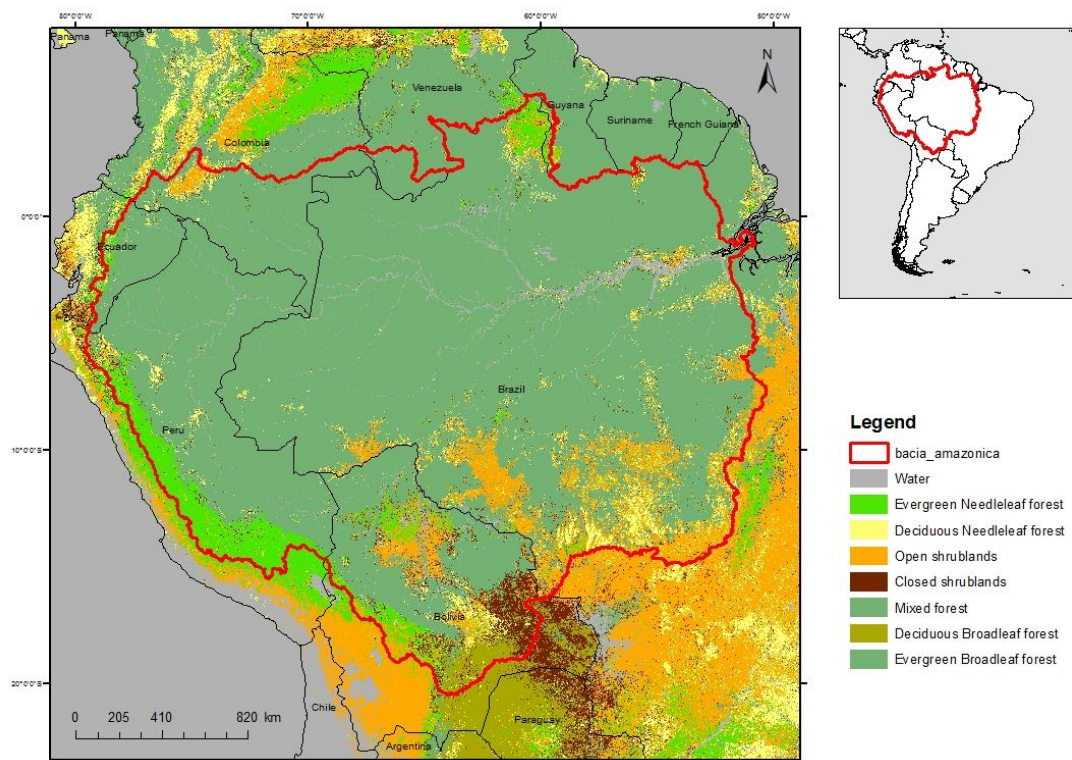


Figura 2 – Localização da Bacia Amazônica na América do Sul e os diferentes tipos de cobertura do solo presentes segundo dados do produto de Land Cover do MODIS (2012), de acordo com a classificação do IGBP (*International Geosphere-Biosphere Programme*) (Friedl *et al.*, 2010).

2.2. Índices de Vegetação e de Seca

Como se tem utilizado índices espectrais com base em sensoriamento remoto para avaliar o estado e a dinâmica da vegetação, uma tentativa especial tem sido feita para aplicá-los como indicadores para a identificação e monitoramento de secas. Desta forma, os índices de seca podem ser agrupados em três categorias:

- Índices com base somente em índices de vegetação que utilizam a refletância da vegetação na região do visível e do infravermelho-próximo. O NDVI, o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI, do inglês *Soil Adjusted Vegetation Index*) (Huete, 1988), o Índice de Vegetação com Resistência Atmosférica (ARVI, do inglês *Atmospheric Resistant Vegetation*

Index) (Kaufman e Tanré, 1992), o EVI, a anomalia de NDVI (Anyamba, Tucker e Eastman, 2001), o Índice Padronizado de Vegetação (SVI, do inglês *Standardized Vegetation Index*) (Peters *et al.*, 2002) e o Índice de Condição da Vegetação (VCI, do inglês *Vegetation Condition Index*) (Kogan, 1995b) pertencem a este grupo;

- Índices com base na temperatura da superfície continental que utilizam dados no infravermelho térmico ou como aproximação a temperatura de brilho, como o Índice de Condição da Temperatura (TCI, do inglês *Temperature Condition Index*) (Kogan, 1995b); e
- Métodos híbridos que combinam dados de reflectância e térmicos, incluindo a razão entre a temperatura da superfície continental (LST, do inglês *Land Surface Temperature*) e o NDVI (McVicar e Bierwirth, 2001) e o VHI.

A princípio os métodos de monitoramento de secas com base em índices que utilizam dados de sensoriamento remoto possuem vantagens sobre métodos tradicionais meteorológicos, tais como: (1) a resolução espacial da coleção de dados é alta (e.g., resolução do píxel de 1 km) quando comparada com estações meteorológicas; (2) o sensor cobre grandes áreas geográficas; e (3) os dados estão disponíveis para regiões com uma baixa densidade de estações meteorológicas.

O índice de vegetação mais amplamente utilizado para aplicações agrícolas, de silvicultura, de pastagens e ecológicas é o NDVI, um índice baseado em sensoriamento remoto que identifica as condições da vegetação (Rouse Jr *et al.*, 1974). O NDVI utiliza as reflectâncias na região do vermelho e do infravermelho-próximo para calcular se a vegetação está saudável ou não-saudável e esparsa (ou seja, sofrendo com um evento de seca ou uma infestação de insetos). O NDVI é dado pela equação (1):

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

onde NIR é a reflectância espectral na região do infravermelho-próximo e R é a reflectância espectral no vermelho. Sob condições normais, a clorofila (substância verde que produz carboidratos nas plantas) absorve a luz, refletindo menos na região do vermelho e resultando em maiores valores de NDVI. Plantas sob estresse refletem mais na região do vermelho, resultando em menores valores do índice (Zargar *et al.*, 2011).

O NDVI vem sendo amplamente utilizado em estudos de fenologia da vegetação e de variabilidade interanual. Recentemente, diferentes autores têm estudado a relação entre o

NDVI e campos meteorológicos mostrando a existência de atrasos nestas relações, nomeadamente com a precipitação (Buermann *et al.*, 2003) e temperatura (Julien, Sobrino e Verhoef, 2006). Apesar de suas inúmeras aplicações, o NDVI apresenta algumas desvantagens, tais como a saturação sobre áreas com alta concentração de biomassa e a alta sensibilidade a variações em níveis inferiores ao da copa das árvores (solo de fundo – *soil background*). Essas limitações levaram ao desenvolvimento de diversos outros índices de vegetação, como o SAVI, que supostamente é menos sensível ao solo de fundo (Huete, 1988) e o ARVI que aparentemente reduz o efeito atmosférico (Kaufman e Tanré, 1992).

Mais recentemente, o EVI foi desenvolvido com o intuito de melhorar o monitoramento da vegetação através de uma maior sensibilidade do sinal da vegetação em regiões com altos valores de biomassa (e.g., florestas tropicais), da correção dos sinais espúrios e da redução dos efeitos atmosféricos (Huete *et al.*, 1997). O EVI é baseado nos índices NDVI, SAVI e ARVI, e utiliza funcionalidades de cada um destes com o intuito de minimizar interferências atmosféricas e do solo. O EVI é dado pela equação (2):

$$EVI = G * \frac{N-R}{N+C_1R-C_2B+L} \quad (2)$$

onde N, R e B são as reflectâncias da superfície corrigidas ou parcialmente corrigidas atmosféricamente (espalhamento Rayleigh e absorção pelo ozônio) nas bandas do infravermelho-próximo, do vermelho e do azul, respectivamente. G é o fator de ganho; L é o ajuste do solo de fundo e C1 e C2 são os coeficientes que utilizam a banda do azul para corrigir influências dos aerossóis na banda do vermelho. Os coeficientes adotados no algoritmo do EVI são: L= 1, C1= 6, C2= 7,5 e G (fator de ganho)= 2,5. (Huete *et al.*, 1997; Huete, Justice e Liu, 1994). Enquanto o NDVI é sensível à clorofila, o EVI responde mais a variações na estrutura da copa das árvores, como no Índice de Área Foliar (LAI, do inglês *Leaf Area Index*) (Huete *et al.*, 2002).

Utilizando dados de diversos anos, o NDVI pode ser convertido em um outro índice, o VCI, o qual tem sido aplicado com sucesso no monitoramento de secas e das condições da vegetação em diversos países (Kogan, 1995b). O VCI se baseia na forte dependência existente entre a vegetação e o clima, fato este que também serviu de base para o desenvolvimento de um sistema de classificação climática baseado no tipo de vegetação pelo biólogo alemão W. Köppen, há mais de 100 anos. O VCI permite a detecção de eventos de seca e a determinação de seu início, intensidade, duração e impacto na vegetação (Heim Jr, 2002), determinando o

desvio do valor atual de NDVI com relação ao seu valor mínimo de toda a série de dados. O valor de VCI para uma estação é dado pela equação (3):

$$VCI_j = 100 * \frac{NDVI_j - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (3)$$

onde $NDVI_j$ é o valor de NDVI sazonal atual, e $NDVI_{max}$ e $NDVI_{min}$ são os valores de NDVI máximo e mínimo de toda série de dados referente àquela estação, respectivamente. O VCI representa a influência das condições do tempo dos valores de NDVI, seu valor variando entre 0 e 100, correspondendo a alterações nas condições da vegetação que variam de extremamente não favoráveis a ótimas (Kogan, 1995b). Neste trabalho, além da definição clássica do VCI explicitada na Equação (3), propomos a utilização do VCI com base no EVI (daqui para a frente denominado VCI1, enquanto o VCI original, com base no NDVI, será chamado de VCI2).

Modificando o VCI de forma a usar a temperatura de brilho ao invés do NDVI como dado de entrada, Kogan (1995a) obteve um outro índice, o TCI. Tal índice determina o desvio da temperatura atual da temperatura máxima da série de dados, baseando-se na ideia de que quanto maior for a temperatura, mais intensa será a seca (Zargar *et al.*, 2011). O TCI é dado pela equação (4):

$$TCI_j = 100 * \frac{BT_{max} - BT_j}{BT_{max} - BT_{min}} \quad (4)$$

onde BT_j é o valor de temperatura de brilho (BT) atual sazonal, e BT_{max} e BT_{min} são os valores de BT máximo e mínimo de toda série de dados referente àquela estação, respectivamente. Neste trabalho, no entanto, utilizaremos a LST no cálculo do TCI, por se tratar de uma estimativa mais apropriada do que a temperatura de brilho (Sun e Kafatos, 2007).

$$TCI_j = 100 * \frac{LST_{max} - LST_j}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (5)$$

Adicionalmente, Kogan (1995b) obteve o índice híbrido VHI, o qual combina o VCI e o TCI, utilizando um peso a para as contribuições de ambos (em que, na falta de maiores informações, $a=0,5$). O VHI, considerado por Kogan (2001) como mais efetivo que outros índices, é dado pela equação (6):

$$VHI = a * VCI + (1 - a) * TCI \quad (6)$$

Os índices híbridos assumem uma forte correlação negativa entre os valores de NDVI e de LST, uma vez que um aumento da temperatura causa um aumento da evaporação

simultaneamente com um decréscimo da umidade do solo, resultando por fim num declínio na cobertura vegetal (Lambin e Ehrlich, 1996; Nemani e Running, 1989). Como a LST influencia o crescimento da vegetação, valores de temperatura têm sido utilizados como critério adicional, além do EVI e do NDVI, para avaliar o estado e o desenvolvimento da vegetação (Running *et al.*, 1995; Tucker *et al.*, 2001). Semelhantemente ao VCI, o VHI será calculado neste trabalho, com base em ambos EVI (VHI1) e NDVI (VHI2).

2.3. Variáveis meteorológicas

Apesar das vantagens mencionadas sobre os índices com base em sensoriamento remoto, as variáveis meteorológicas são de fundamental importância para o entendimento de como a atmosfera e a vegetação se comportam durante eventos de seca.

A precipitação é o parâmetro principal causador da seca, porém pode não ser a única causa da mortalidade da vegetação; altas temperaturas, por exemplo, aumentam a evapotranspiração e diminuem a disponibilidade de água, afetando o crescimento da vegetação (Zhao e Running, 2010). Além disso, a temperatura determina parcialmente as taxas de fotossíntese e de respiração da vegetação, bem como a quantidade de nutrientes disponíveis para a absorção da planta através da influência na taxa de decomposição da liteira. Em ambientes muito quentes, a produtividade da vegetação pode ser limitada como resultado de uma diminuição abrupta na fotossíntese bruta e um aumento contínuo da respiração (Churkina e Running, 1998).

Outro importante controle ambiental da produtividade da vegetação é a radiação solar (Churkina e Running, 1998), uma vez que a fotossíntese ocorre apenas em ambientes com uma quantidade suficiente de luz. Embora as nuvens possam reduzir drasticamente a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa, as plantas ainda fotossintetizam em um dia nublado usando radiação difusa, mas a taxas mais baixas. Assim, enquanto o aumento de radiação solar inicialmente pode aumentar a produtividade da vegetação, secas prolongadas diminuem a fotossíntese e podem levar à mortalidade da vegetação (Hilker *et al.*, 2014).

De acordo com Churkina e Running (1998), a produtividade da maioria dos ecossistemas terrestres é controlada por mais de um fator climático; no entanto, nas regiões tropicais da América do Sul, África e Sudeste Asiático nenhum destes fatores climáticos – temperatura, disponibilidade de água e radiação solar – foi identificado como limitante da produtividade. Segundo os autores, outros controles ambientais como por exemplo a disponibilidade de nutrientes, restrições biológicas ou a limitação na absorção de radiação

fotossinteticamente ativa por meio de coberturas multicamadas podem limitar a produtividade da vegetação nessas regiões.

Desta forma, dados de precipitação, temperatura da superfície e radiação solar foram utilizados neste trabalho, visando compreender a relação existente entre estas e a vegetação durante eventos de seca.

2.4. Dados

Os índices de vegetação NDVI e EVI utilizados neste estudo foram obtidos a partir do sensor MODIS a bordo do satélite Terra, mais especificamente a sexta versão do produto *MOD13C1 – “Vegetation Indices 16-Day L3 Global 0.05deg CMG”* (Didan, 2015) com resolução espacial de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ e resolução temporal de 16 dias, para o período de 2000 a 2016.

Os dados de LST correspondem à quinta versão do produto *MODIS/Terra Land Surface Temperature and Emissivity Monthly L3 Global 0.05Deg CMG* (MOD11C3) (Wan, 2008), com resolução espacial de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ e resolução temporal mensal, para o período de 2000 a 2016, a fim de que fossem utilizados no cálculo dos índices de seca baseados na faixa do infravermelho térmico e como dados auxiliares de temperatura, nas análises dos resultados. Foram utilizados ambos os dados diurnos (LST_Day_CMG) e noturnos (LST_Night_CMG), a partir dos quais foram calculadas temperaturas médias mensais.

A fim de serem detectadas as regiões da Amazônia afetadas pelos eventos de secas, foram utilizadas estimativas mensais de precipitação de 2000 a 2015, com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, provenientes do produto *TRMM/TMPA 3B43 TRMM and Other Sources Monthly Rainfall Product V7* (Huffman *et al.*, 2007). Estes dados foram originados por um algoritmo que mescla as estimativas de precipitação feitas pelo satélite TRMM (do inglês *Tropical Rainfall Measuring Mission*) e a análise mensal acumulada do Centro de Climatologia Global de Precipitação (GPCC, do inglês *Global Precipitation Climatology Centre*), baseada em dados de pluviômetros.

Problemas de resolução espacial e disponibilidade de dados de variáveis meteorológicas de sensoriamento remoto podem ser contornados com a utilização das chamadas reanálises. Os dados da radiação solar incidente na superfície são provenientes da Análise Retrospectiva da Era Moderna para Pesquisa e Aplicações (MERRA, do inglês *Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications*) (Rienecker *et al.*, 2011).

A base MERRA é uma reanálise de dados atmosféricos da NASA para a era dos satélites que utiliza o *Goddard Earth Observing System Data Assimilation System Version 5* (GEOS-5). Neste estudo, foram utilizados os produtos mensais MERRA IAU 2d *land surface diagnostics* - *tavgM_2d_lnd_Nx*, com resolução longitudinal de $2/3^\circ$ e latitudinal de $1/2^\circ$.

A Tabela 1 sintetiza o conjunto de dados utilizados neste trabalho. A precipitação e a radiação solar abrangem o período entre o primeiro quadrimestre de 2000 e o último de 2015 (que inclui janeiro de 2016); os índices de vegetação/seca e a LST incluem um quadrimestre a mais (fevereiro a maio de 2016).

Tabela 1 – Dados utilizados no presente trabalho e suas respectivas fontes, resolução inicial, unidade e período.

Dados	Fonte	Resolução Inicial	Unidade	Período
NDVI/EVI	MODIS (MOD13C1)	$0,05^\circ \times 0,05^\circ$	–	2000-2016
LST	MODIS (MOD11C3)	$0,05^\circ \times 0,05^\circ$	K	2000-2016
VCI/TCI/VHI	Dados trimestrais de LST, EVI e NDVI.	$0,05^\circ \times 0,05^\circ$	–	2000-2016
Precipitação	TRMM (3B43)	$0,25^\circ \times 0,25^\circ$	mm h ⁻¹	2000-2015
Radiação Solar à superfície	MERRA Data Assimilation System (SWLAND)	$2/3^\circ \times 1/2^\circ$	W m ⁻²	2000-2015
Uso e Cobertura do solo	MODIS (MCD12C1)	$0,05^\circ \times 0,05^\circ$	–	2012

2.5. Metodologia

2.5.1. Qualidade dos Índices de Vegetação

Os índices de vegetação do MODIS possuem um indicador de qualidade associado a cada pixel (do inglês *quality flag*), permitindo ao usuário identificar dados com a qualidade comprometida. Deste modo, procedeu-se à filtragem dos dados, a fim de que aqueles com qualidade ruim ou insuficiente (devido à contaminação por nuvens ou aerossóis, por exemplo) não fossem considerados, visando um controle de qualidade e a utilização de dados que melhor representassem a superfície.

A qualidade de cada píxel dos compostos de 16 dias de EVI e NDVI é acessada através dos indicadores de qualidade correspondentes, os quais possuem 16 bits de informação. Os primeiros dois bits referem-se à qualidade do índice de forma geral

(“MODLAND_QA”): se foi produzido e possui boa qualidade (00), se foi produzido mas outros itens de qualidade devem ser checados (01), se foi produzido mas provavelmente está contaminado por nuvens (10) e se não foi produzido devido a outras razões diferentes de nuvens (11). A utilidade do índice é mostrada nos próximos quatro bits, podendo o píxel possuir a mais alta qualidade (0000), uma qualidade mais baixa (0001), uma qualidade decrescente (0010 a 1010), a qualidade mais baixa (1100), uma qualidade tão baixa que não é útil (1101), falta de dados (1110) ou não processado (1111). Os bits 6 e 7 possuem informação sobre a quantidade de aerossóis, podendo apresentar um dos quatro valores – “Climatologia” (00), “Baixa” (01), “Média” (10) e “Alta” (11), em que “Baixa”, “Média” e “Alta” se referem à espessura ótica em 550 nm menor que 0,2, entre 0,2 e 0,5 e maior que 0,5, respectivamente (Vermote e Vermeulen, 1999). Outros bits indicam a presença (1) ou a ausência (0) de nuvens, se a correção atmosférica foi feita, se o píxel se refere a terra ou a água e a qualidade geoespacial.

De acordo com Xu *et al.* (2011), a presença de nuvens obscurece a superfície radiometricamente, corrompendo os valores dos índices de vegetação atribuídos. O uso da espessura ótica climatológica no processo de correção atmosférica indica que a quantidade de aerossóis é desconhecida, provavelmente devido à presença de nuvens, e píxeis com alta quantidade de aerossóis dificilmente corrigidos de maneira efetiva.

O método de filtragem utilizado neste estudo é semelhante ao utilizado por Samanta *et al.* (2010), Xu *et al.* (2011) e Bi *et al.* (2016); os píxeis são considerados válidos quando:

- a) O índice de vegetação é produzido – “MODLAND_QA” igual a 00 ou 01;
- b) A utilidade do índice é menor que 1011 (possui a mais alta qualidade, uma qualidade mais baixa ou uma qualidade decrescente);
- c) A quantidade de aerossóis é baixa (01) ou média (10); e
- d) Não são detectadas nuvens – Ambos “*Adjacent cloud detected*” e “*Mixed Clouds*” iguais a 0.

2.5.2. Pré-processamento

Uma vez que os dados utilizados possuem diferentes resoluções espaciais (EVI, NDVI e LST: 0,05° x 0,05°; precipitação: 0,25° x 0,25°; radiação solar: 2/3° x 1/2°), tornou-se necessário a sua padronização. Neste contexto, todos os dados tiveram a sua resolução alterada para a mesma resolução da precipitação (0,25° x 0,25°) antes de serem feitos os demais cálculos. A mudança da resolução dos dados foi feita através da aplicação do método de interpolação pelo vizinho mais próximo (do inglês *nearest neighbor*) no ambiente do programa MATLAB.

2.5.3. Compostos sazonais

Neste trabalho, foram definidas três estações para cada ano e para todos os dados utilizados foram obtidos compostos sazonais. As estações (ou quadrimestres) definidas foram: FMAM (fevereiro-março-abril-maio), JJAS (junho-julho-agosto-setembro) e ONDJ (outubro-novembro-dezembro-janeiro), para as quais foram estabelecidas correspondências com os compostos de 16 dias dos dados do EVI e do NDVI, de acordo com a Tabela 2. Os compostos dos dados do MODIS são de 16 dias porque essa é a duração do ciclo de repetição do sensor, durante o qual cada ponto na terra será visualizado com uma gama de ângulos de visão entre de aproximadamente 55° (Huete, Justice e van Leeuwen, 1999).

Os compostos sazonais de EVI e NDVI para cada ano do período de dados foram obtidos através da média aritmética entre os compostos de 16 dias de cada estação, para cada píxel. Semelhantemente, os compostos sazonais da temperatura e da radiação foram obtidos através da média aritmética entre os dados mensais correspondentes a cada quadrimestre, e os da precipitação, através de sua soma. Os índices VCI, TCI e VHI foram obtidos a partir de tais dados sazonais.

Tabela 2. Correspondência entre as estações (quadrimestres) e os compostos de 16 dias de NDVI e EVI.

Composto	Início	Fim	Estação	Composto	Início	Fim	Estação
1	01/jan	16/jan	ONDJ	13	12/jul	27/jul	JJAS
2	17/jan	01/fev	ONDJ	14	28/jul	12/ago	JJAS
3	02/fev	17/fev	FMAM	15	13/ago	28/ago	JJAS
4	18/fev	05/mar	FMAM	16	29/ago	13/set	JJAS
5	06/mar	21/mar	FMAM	17	14/set	29/set	JJAS
6	22/mar	06/abr	FMAM	18	30/set	15/out	ONDJ
7	07/abr	22/abr	FMAM	19	16/out	31/out	ONDJ
8	23/abr	08/mai	FMAM	20	01/nov	16/nov	ONDJ
9	09/mai	24/mai	FMAM	21	17/nov	02/dez	ONDJ
10	25/mai	09/jun	JJAS	22	03/dez	18/dez	ONDJ
11	10/jun	25/jun	JJAS	23	19/dez	31/dez	ONDJ
12	26/jun	11/jul	JJAS				

2.5.4. Anomalias padronizadas

As anomalias padronizadas correspondem às anomalias de uma variável divididas pelo seu desvio padrão, sendo utilizadas em diversos artigos que tratam de secas na Amazônia, tais como: Atkinson, Dash e Jeganathan (2011), Bi et al. (2016), Jiménez-Muñoz et al. (2013), Lewis et al. (2011), Moura et al. (2015), Saleska et al. (2007), Samanta et al. (2010) e Xu et al. (2011). Tais anomalias são úteis na análise de dados que estão relacionados, porém não são comparáveis (como por exemplo dados de grandezas diferentes ou sujeitos a variações sazonais), removendo as influências de localização e dispersão dos dados (Wilks, 2006). Desta forma, as anomalias padronizadas foram também utilizadas no presente trabalho.

As anomalias padronizadas, que são adimensionais, foram calculadas para todos os índices de vegetação e de seca e variáveis meteorológicas, para cada quadrimestre do período de referência (2000 – 2015), sendo definidas como:

$$z = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (7)$$

onde X_i é o dado para o qual se quer calcular a anomalia, \bar{X} é a média dos 16 (ou 17) dados sazonais (2000 – 2015 ou 2016) para cada píxel e σ é o desvio padrão para cada píxel. Outro modo de enxergar a anomalia padronizada é como uma medida de distância, em unidades de desvio padrão, entre o valor de um dado e a sua média (Wilks, 2006).

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização Meteorológica das Secas

Nesta seção são apresentados quatro aspectos relativos à caracterização das secas extremas do século XXI na bacia Amazônica: i) localização espacial; ii) quantificação das áreas afetadas; iii) evolução temporal; e iv) duração dos eventos.

De acordo com as anomalias padronizadas da precipitação, a seca meteorológica de 2005 atingiu principalmente o oeste da bacia Amazônica durante o quadrimestre JJAS (Figura 3a), apresentando um único epicentro. Em 2010, o déficit de precipitação atingiu seu pico em JJAS em três epicentros, nomeadamente no oeste, noroeste e no sudeste (Figura 3b) da bacia. Tais resultados concordam com os epicentros encontrados em estudos anteriores (Coelho *et al.*, 2012; Espinoza *et al.*, 2011; Lewis *et al.*, 2011; Marengo *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2011). A seca de 2015, no entanto, abrangeu quase toda bacia, porém sendo mais intensa no leste da região, onde podem ser encontrados três epicentros contíguos (Figura 3c), durante o quadrimestre ONDJ (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2016).

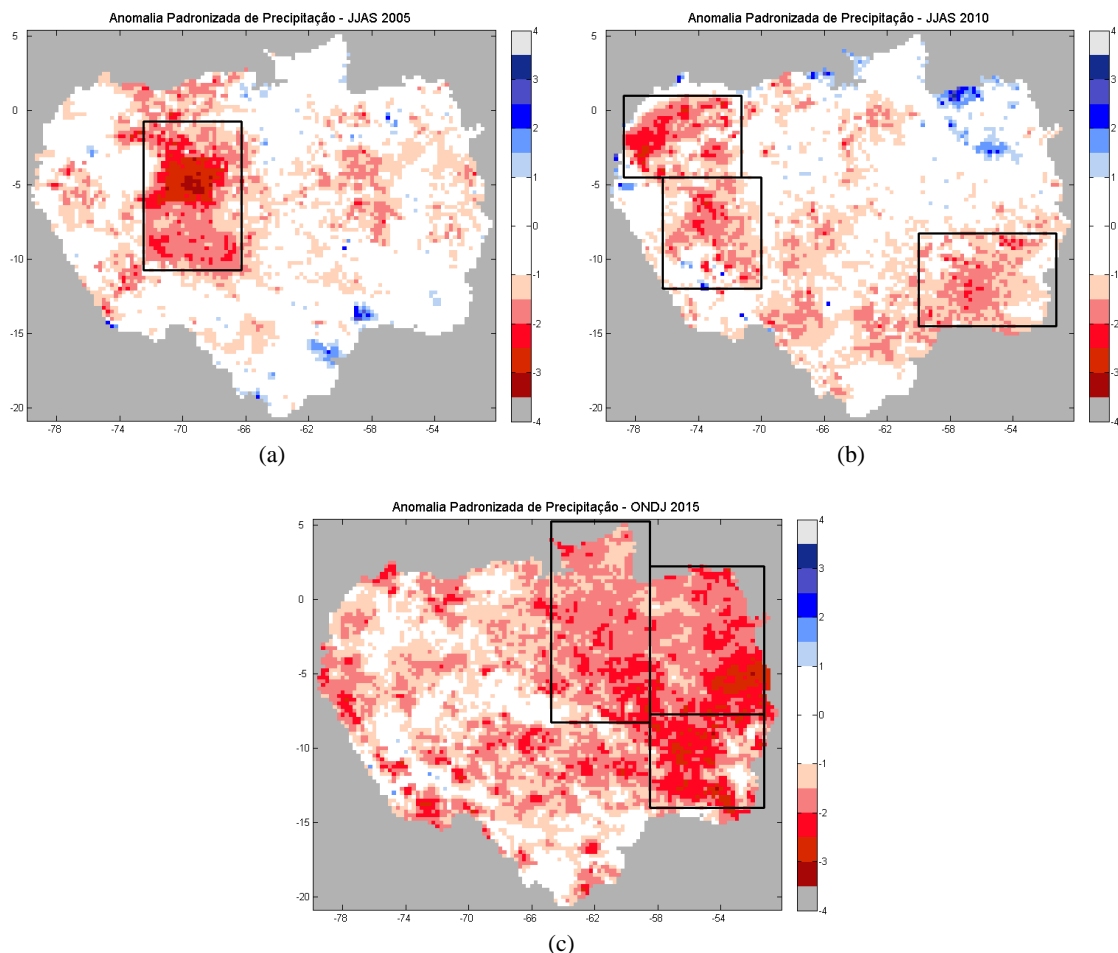


Figura 3 – Anomalias padronizadas da precipitação durante JJAS de 2005 (a), JJAS de 2010 (b) e ONDJ de 2015 (c) em toda a área de estudo. Os epicentros das secas estão destacados através de retângulos pretos.

De fato, ao analisar toda a série de dados (2000 – 2015), percebe-se que nesses anos foram registrados valores mínimos de precipitação em diversas áreas, como pode ser visto na Figura 4. Nesta figura, são assinalados os píxeis cujos mínimos de precipitação ocorreram no quadrimestre de interesse. São também destacados os segundos e terceiros mínimos, a fim de que seja possível captar o sinal das três secas. Considerando-se a série de dados referente ao quadrimestre JJAS, percebe-se que na porção oeste da Amazônia os valores mínimos de precipitação ocorreram em ambos os anos de 2005 e 2010. Neste último também foram observados mínimos no noroeste e sudeste da região. Com relação à ONDJ, percebe-se que em 2015, diferentemente dos demais anos, em quase toda a Amazônia foram registrados valores mínimos de precipitação, tornando evidente o caráter mais generalizado desta seca em relação às anteriores.

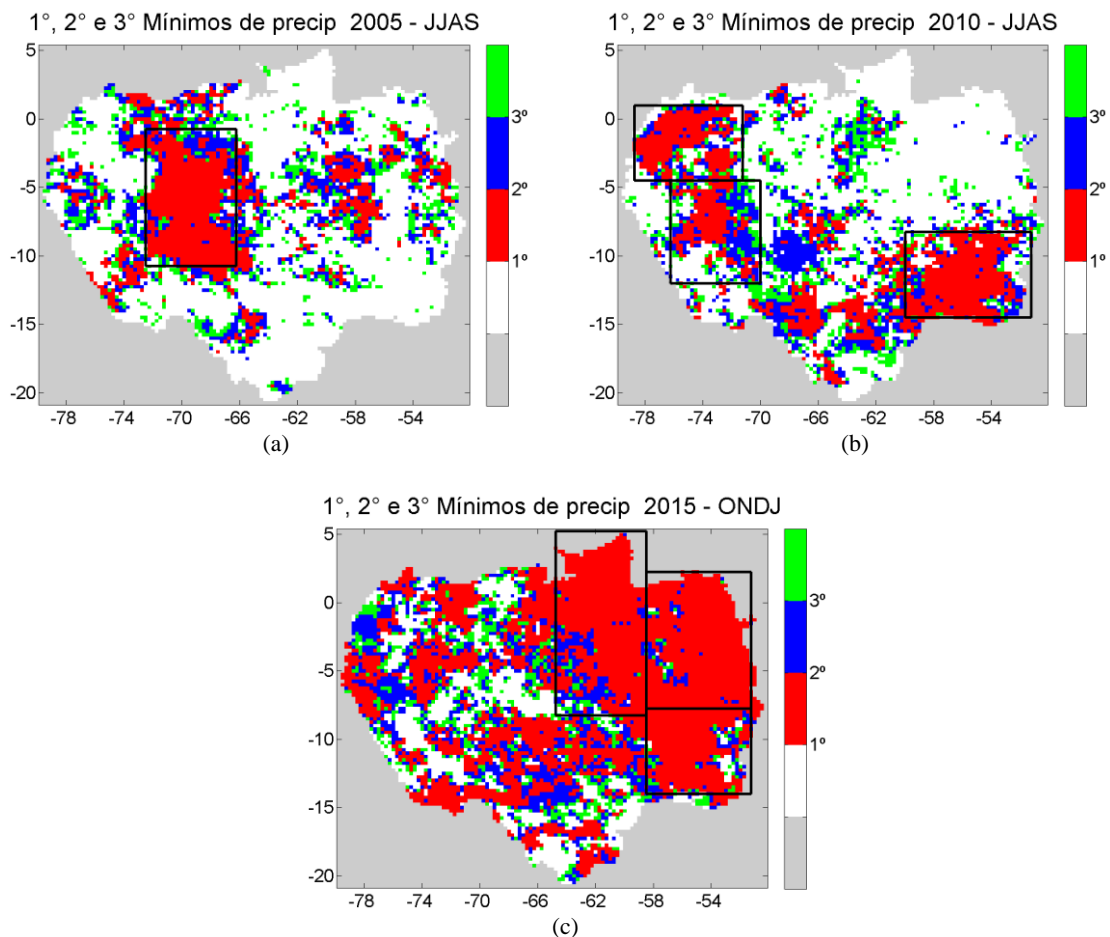


Figura 4 – Primeiros, segundos e terceiros mínimos de precipitação ocorridos em JJAS de 2005 (a), JJAS de 2010 (b) e ONDJ de 2015 (c). Na mesma região onde foram registrados mínimos de precipitação em 2005 (píxeis vermelhos), foram registrados segundos mínimos (píxeis azuis) em 2010, indicando que ambas as secas atingiram aquela região. Na série de dados de ONDJ, mínimos absolutos foram observados em grande parte da bacia Amazônica.

A área da bacia Amazônica afetada pela seca – definida como a área em que a anomalia padronizada da precipitação é menor do que -1 – foi computada para cada ano entre

2000 e 2015, para ambos os quadrimestres JJAS e ONDJ. Na Figura 5 são apresentadas as anomalias padronizadas da área afetada pela seca, além da porcentagem da área da bacia sob condições de seca em JJAS 2005, JJAS 2010 e ONDJ 2015. Ficam evidentes 3 máximos de área afetada nos anos de 2005, 2010 e 2015 (JJAS), e nenhum outro ONDJ da série de dados apresentou uma seca comparável à de 2015. Durante a seca de 2005, observou-se que 38% da área da bacia experimentou déficit de precipitação; em 2010 a área atingida subiu para 43%. Estes resultados corroboram com Lewis *et al.* (2011) que mostrou a maior abrangência espacial da seca de 2010 em relação ao ano de 2005. Durante a seca de 2015 observa-se um aumento expressivo na área afetada pela seca em relação aos eventos anteriores (2005, 2010), atingindo 80% da região. De fato, 2015 apresenta uma anomalia padronizada de área afetada que é aproximadamente o dobro (3,4) das secas anteriores (1,8 em 2005 e 2,1 em 2010), considerando os diferentes quadrimestres de ocorrência das secas de 2005 e 2010 (JJAS) e 2015 (ONDJ). Desta forma, pode-se afirmar que a seca de 2015 foi a pior seca da história em termos de área afetada (abrangência espacial), atingindo uma área duas vezes superior a das secas de 2005 e 2010.

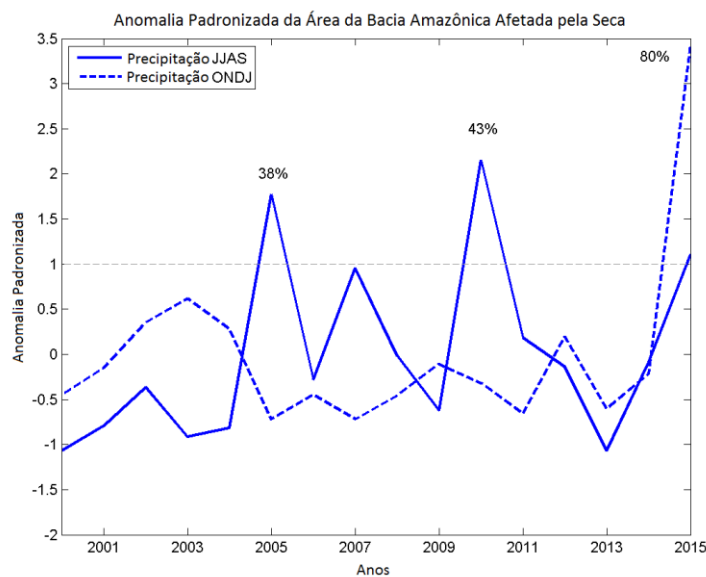


Figura 5 – Anomalias padronizadas da área afetada pela seca entre os anos 2000 e 2015 em JJAS (linha sólida) e ONDJ (linha pontilhada). As áreas afetadas pela seca são definidas como aquelas em que a anomalia padronizada da precipitação é menor do que -1. Os números sobre o gráfico indicam a porcentagem da área da bacia sob condições de seca em JJAS 2005, JJAS 2010 e ONDJ 2015.

A Figura 6 apresenta a delimitação e a identificação dos epicentros em cada um dos anos de secas. Na Tabela 3 é possível observar os principais tipos de coberturas de solo presentes em cada um desses epicentros, nos quais predominam as florestas perenes (*evergreen broadleaf forests*, em inglês). No entanto, nota-se que nos epicentros 3 de 2010 e

2015, localizados no sudeste da bacia Amazônica, também possuem uma porcentagem expressiva de sua área coberta pelo cerrado (*savannas*, em inglês, em torno de 25%) e por plantações (*croplands*, em inglês cerca de 8%).

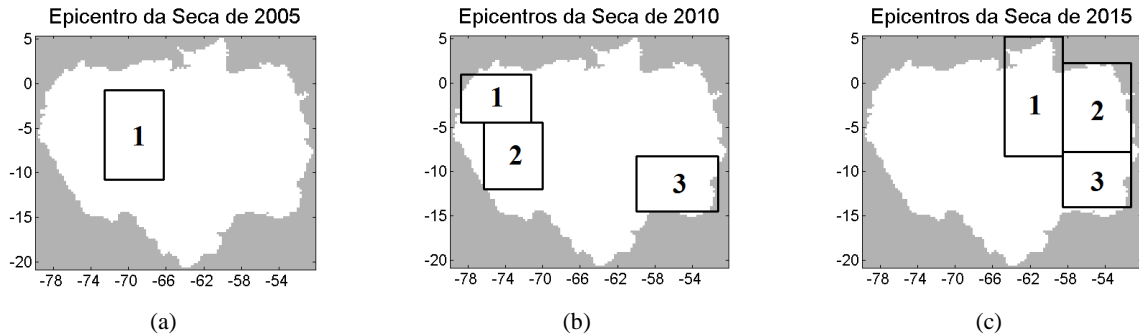


Figura 6 – Identificação dos epicentros das secas de 2005 (a), 2010 (b) e 2015 (c).

Tabela 3 – Principais coberturas de solo encontradas em cada epicentro das secas de 2005, 2010 e 2015 em percentual de área coberta.

	2005-1	2010-1	2010-2	2010-3	2015-1	2015-2	2015-3
Água	0,1%	-	-	-	1,2%	2,4%	-
Florestas Perenes	98,0%	97,8%	96,0%	64,0%	92,1%	92,0%	63,8%
Cerrado	1,6%	0,3%	-	26,0%	1,7%	2,5%	25,6%
Pastagens	-	0,9%	3,1%	0,2%	3,5%	-	0,1%
Áreas alagadas	0,1%	0,1%	0,2%	-	1,2%	1,3%	-
Plantações	-	-	-	7,9%	-	-	8,5%
Plantações/Mosaico de vegetação natural	0,2%	0,5%	0,4%	1,8%	0,3%	1,4%	1,9%

As Figuras 7, 8 e 9 apresentam os *boxplots*⁴ das anomalias padronizadas da precipitação nos epicentros das secas (identificados na Figura 6). Ao analisarmos a evolução das anomalias padronizadas da precipitação em cada epicentro, é possível observar a evolução temporal e a duração das mesmas. As anomalias negativas de precipitação no epicentro de 2005 começaram a ser notadas em ONDJ de 2004, diminuíram em FMAM e se agravaram consideravelmente no quadrimestre JJAS, com valores em torno de -2. No quadrimestre seguinte, no entanto, foram registrados valores de chuva acima da média, sendo a duração desta seca de 3 quadrimestres. Em 2010, o déficit de precipitação se iniciou em ONDJ do ano anterior no epicentro 1 (noroeste da bacia), agravando-se em JJAS e apresentando anomalias

⁴ O *boxplot*, ou diagrama de caixa, é uma ferramenta gráfica amplamente utilizada, introduzida por Tukey (1977). É um gráfico simples que apresenta cinco quantis da amostra: o valor mínimo, o quartil inferior, a mediana, o quartil superior e o valor máximo. Usando esses cinco valores, o *boxplot* essencialmente apresenta um esboço rápido da distribuição dos dados (Wilks, 2006).

negativas fracas até ONDJ de 2011. A seca também teve início em ONDJ de 2009 no epicentro 2, permanecendo até ONDJ de 2010. Já no epicentro 3, a seca, apesar de intensa (chegando a apresentar valores inferiores a -1,5), durou apenas 2 estações: FMAM e JJAS. Os resultados corroboram estudos anteriores sobre a duração e a localização temporal das secas de 2005 e 2010 (Coelho *et al.*, 2012; Espinoza *et al.*, 2011; Marengo *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2011). Quanto à duração, a seca de 2010 se estendeu por 7 quadrimestres no epicentro 1, 4 quadrimestres no epicentro 2 e 2 quadrimestres no epicentro 3.

A seca de 2015, no entanto, difere das demais por ter sido causada por um evento intenso de El Niño (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2016), e por isso sua atuação máxima se deu em ONDJ, com anomalias negativas de precipitação sendo notadas já em FMAM nos epicentros 1 e 2 e em JJAS no epicentro 3. Não é possível, com base nesses dados, afirmar se a seca de 2015 permaneceu no quadrimestre seguinte, porém a sua duração foi de pelo menos 3 quadrimestres nos epicentros 1 e 2 e 2 quadrimestres no epicentro 3.

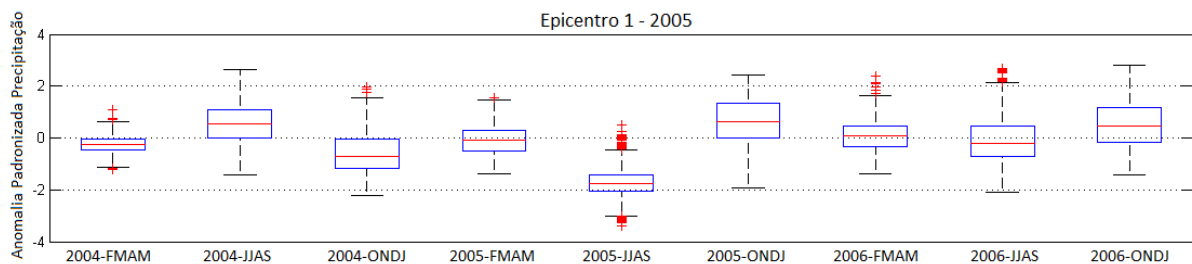


Figura 7 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da precipitação no epicentro da seca de 2005.

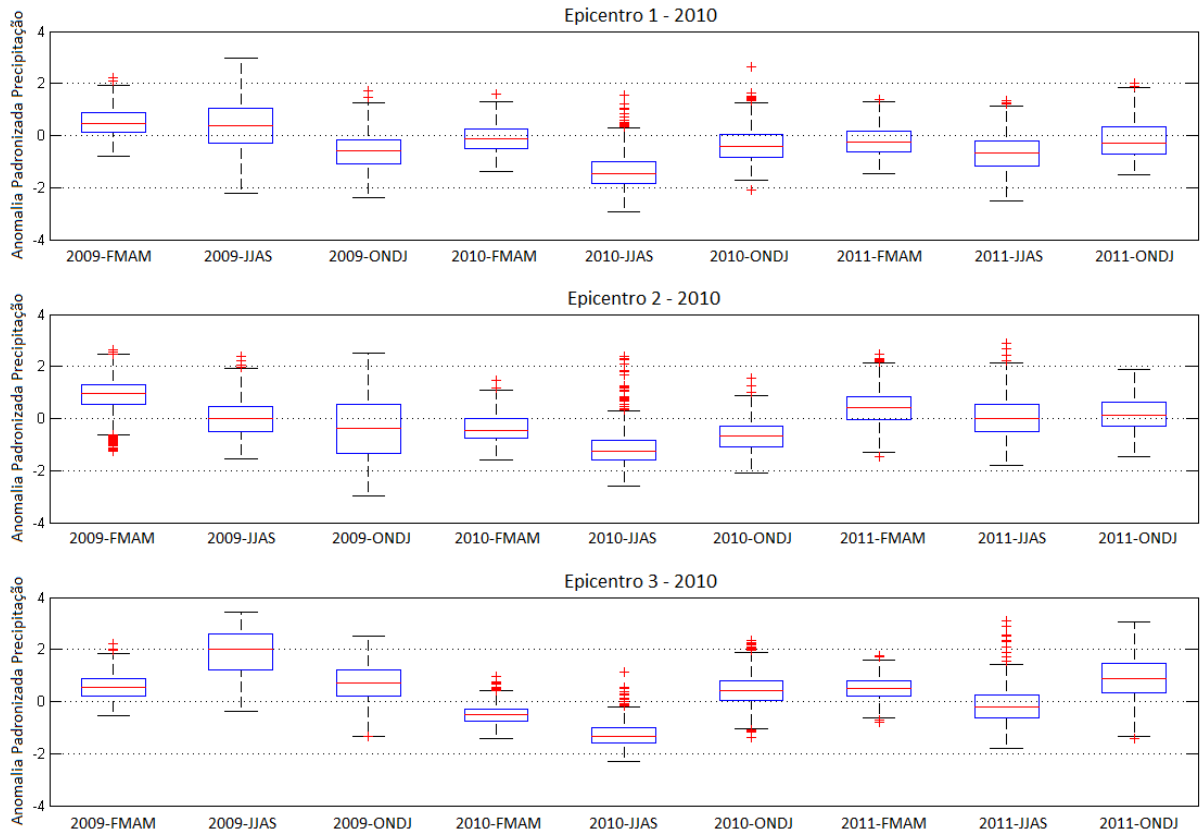


Figura 8 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da precipitação nos epicentros 1 (superior), 2 (centro) e 3 (inferior) da seca de 2010.

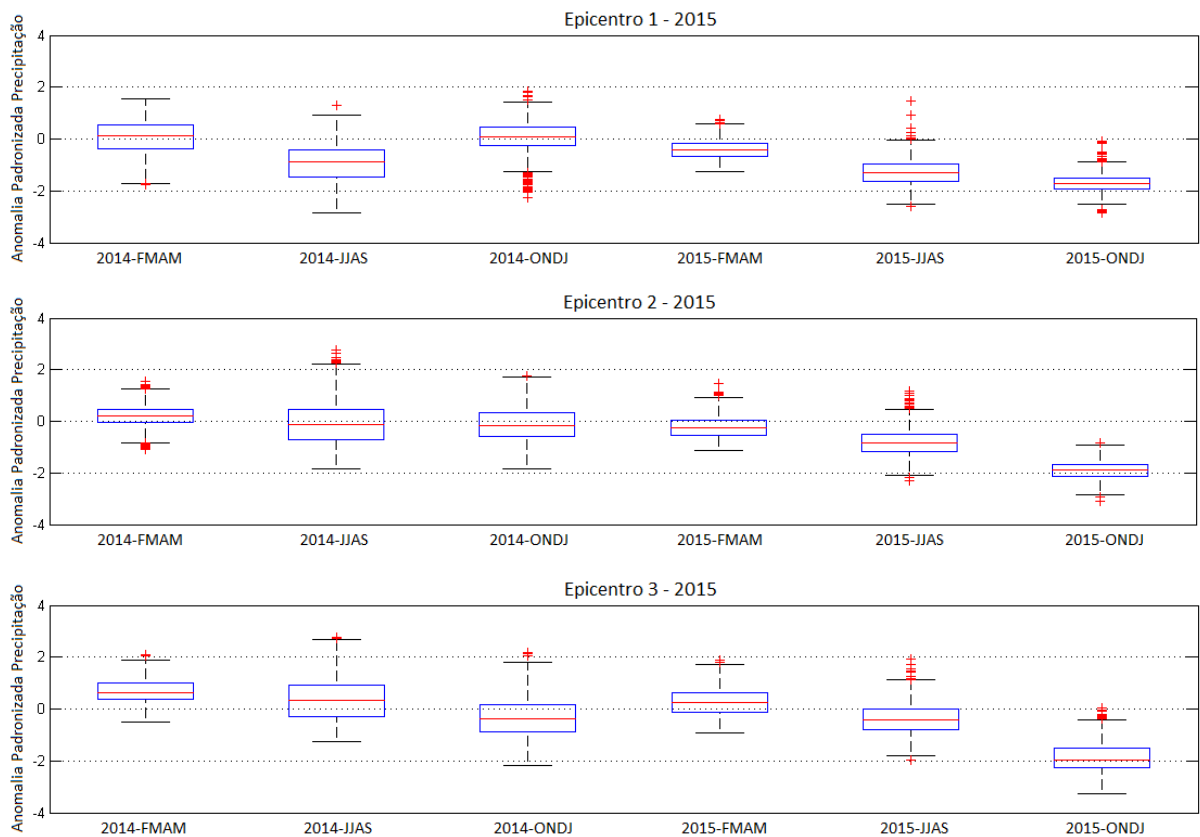


Figura 9 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da precipitação nos epicentros 1 (superior), 2 (centro) e 3 (inferior) da seca de 2015.

3.2. Variáveis meteorológicas

Conforme discutido nas seções anteriores, as secas na Amazônia têm sido analisadas na maioria dos estudos através do déficit de precipitação. Porém alguns estudos indicam que outras variáveis, como a temperatura e a radiação solar (Churkina e Running, 1998; Zhao e Running, 2010) podem levar à mortalidade da vegetação na região (Hilker *et al.*, 2014). Desta forma, a presente seção fornece a análise destes parâmetros na região da bacia Amazônica durante as três secas em questão. Vale a pena ressaltar que a LST observada por satélites em regiões de florestas é indiretamente um indicador da evapotranspiração, umidade do solo e estresse hídrico da vegetação (Karnieli *et al.*, 2010), pois neste caso trata-se de uma medida da temperatura do solo ou da cobertura da vegetação ou uma mistura de ambos (Parida *et al.*, 2008).

A análise das anomalias padronizadas das variáveis meteorológicas (Figura 10) nos quadrimestres de maior atuação das secas (JJAS para 2005 e 2010 e ONDJ para 2015) revela que em 2005 e em 2015 foram observados valores de radiação solar acima da média, ao contrário de 2010, quando os valores estiveram dentro do esperado. Com relação à temperatura, notam-se valores próximos à média em 2005, anomalias positivas em 2010 e muito positivas em 2015.

Considerando toda a série de dados, percebe-se que apenas em 2005 foram observados alguns valores mínimos de LST (Figura 11), porém em uma área fora do epicentro da seca. No ano de 2010, alguns mínimos de radiação foram registrados no epicentro 1 e principalmente a leste dele, em uma região em que de fato não ocorreram anomalias expressivas de precipitação. Nos demais anos não foram registrados mínimos de radiação; pelo contrário, ambas as secas de 2005 e de 2015 (porção norte da bacia) caracterizaram-se por valores máximos de radiação solar (Figura 12). Com relação à LST, alguns máximos foram registrados em 2005 e em grande parte dos epicentros de 2010. Em ONDJ de 2015, no entanto, quase toda a bacia Amazônica experimentou máximos absolutos (primeiros máximos da série de dados) de temperatura da superfície (Figura 12f).

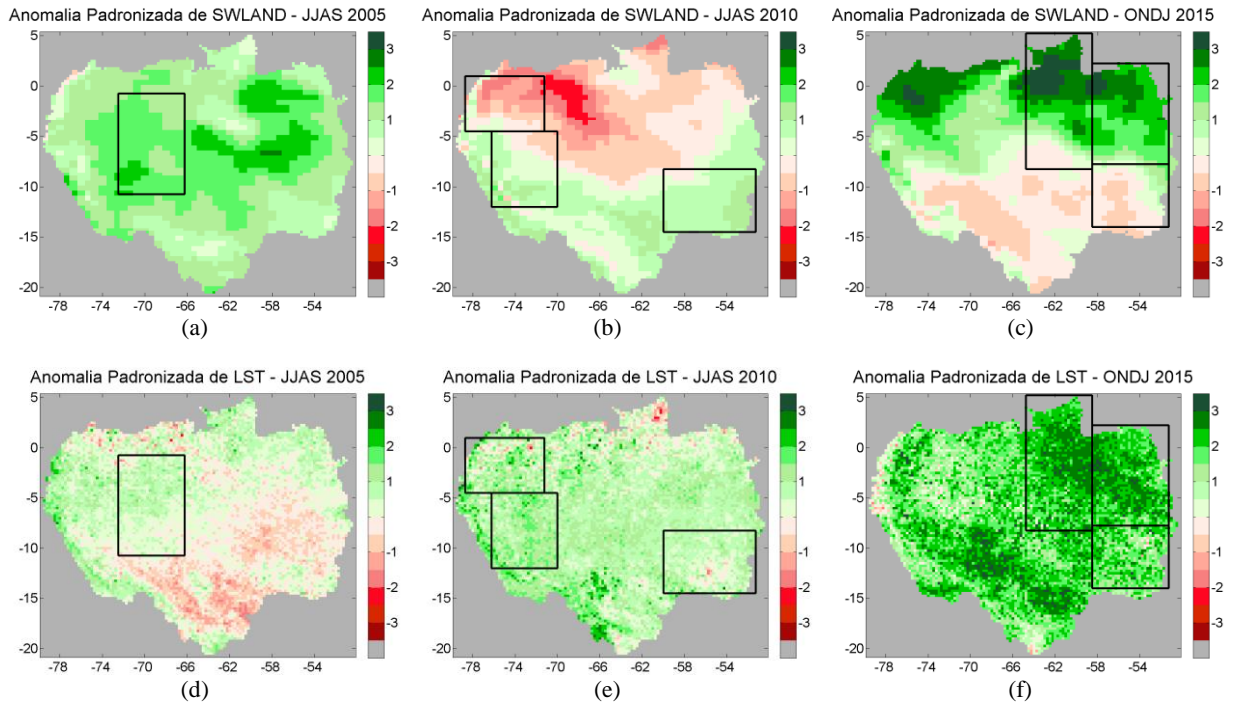


Figura 10 – Anomalias padronizadas das variáveis meteorológicas Radiação Solar (a, b, c) e Temperatura da Superfície (d, e, f) durante JJAS de 2005 (esquerda), JJAS de 2010 (centro) e ONDJ de 2015 (direita).

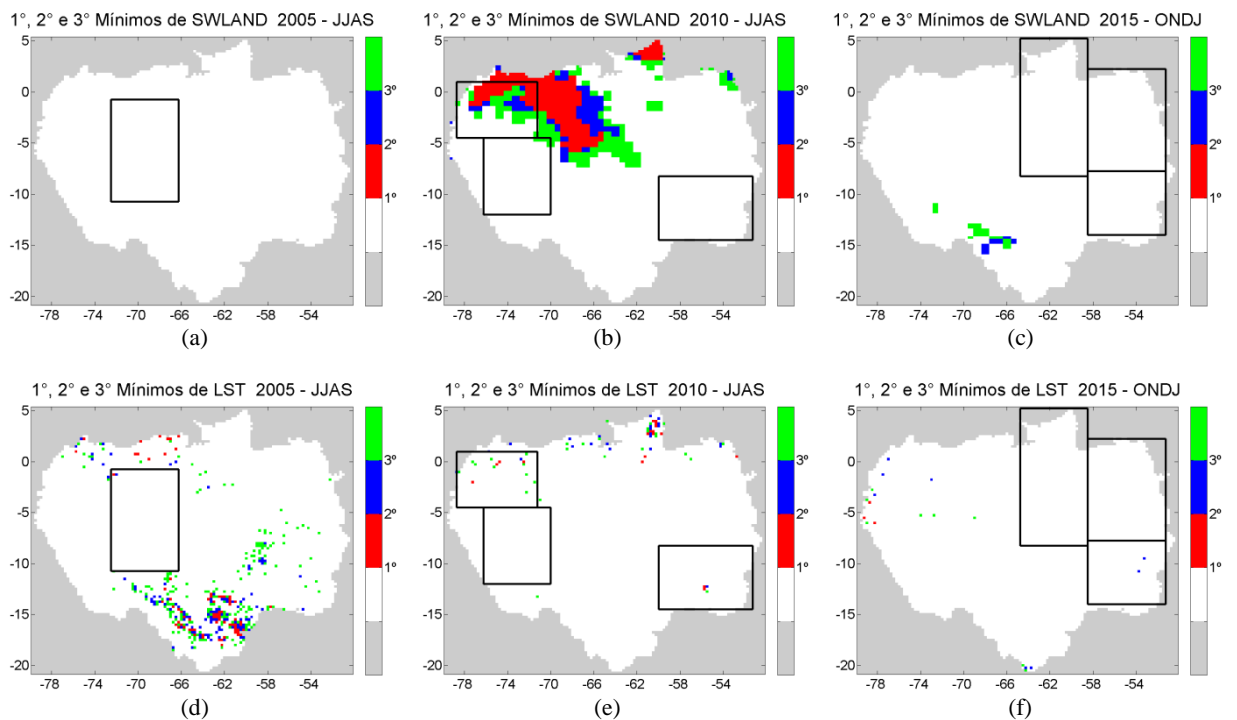


Figura 11 – Primeiros, segundos e terceiros mínimos das variáveis meteorológicas Radiação Solar (a, b, c) e Temperatura da Superfície (d, e, f) durante JJAS de 2005 (esquerda), JJAS de 2010 (centro) e ONDJ de 2015 (direita).

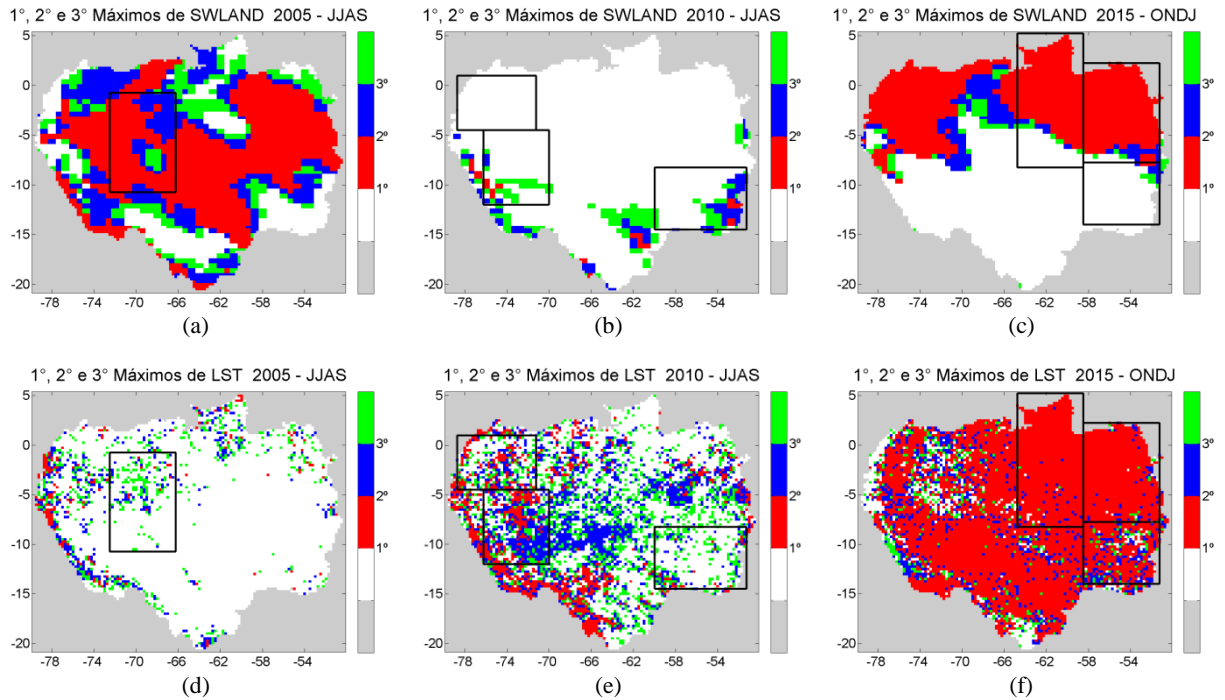


Figura 12 – Primeiros, segundos e terceiros máximos das variáveis meteorológicas Radiação Solar (a, b, c) e Temperatura da Superfície (d, e, f) durante JJAS de 2005 (esquerda), JJAS de 2010 (centro) e ONDJ de 2015 (direita).

Uma síntese dos resultados anteriores é apresentada na Tabela 4, que mostra a porcentagem da área da bacia Amazônica em que foram registrados primeiros, segundos ou terceiros máximos e mínimos nos compostos de cada variável meteorológica durante os quadrimestres de seca dos três anos em questão. Observa-se que, além do déficit de precipitação, a variável meteorológica com maior destaque durante a seca de 2005 foi a radiação solar: em 82,7% da área da bacia foram observados valores de radiação que corresponderam aos máximos observados em todo o período. A temperatura não teve grande influência nesta seca, com valores máximos ocorrendo em apenas 13,7% da área.

A área afetada por mínimos de precipitação apresentou um ligeiro aumento de 2005 (43,8%) para 2010 (49,4%). A grande diferença entre estes dois eventos está na temperatura, com máximos registrados em 51,5% da área. Diferentemente de outros anos, a LST também esteve muito acima do normal em FMAM, quando foram observados máximos em grande parte da região (não mostrado). A radiação solar não apresentou comportamento muito pronunciado durante 2010.

Se a seca de 2010 se diferenciou da de 2005 pelos altos valores de temperatura, a seca de 2015 destacou-se por apresentar valores ainda mais altos em uma área ainda maior do que em 2010. No evento mais recente de seca, máximos de LST foram observados em quase toda a bacia (92,4% da área) no quadrimestre de maior intensidade da seca (ONDJ), bem como no

anterior (não mostrado). Além disso, a área afetada por mínimos de precipitação também aumentou consideravelmente, de 49,4% em 2010 para 83,4% em 2015. Semelhantemente à seca de 2005, em 2015 a radiação solar apresentou-se acima da média, com valores máximos neste ano ocorrendo em 49,1% da área, um decréscimo em relação à área de máximos em 2005, mas ainda assim bastante superior à de 2010. Cabe ressaltar que todas as variáveis meteorológicas apresentaram fortes anomalias em 2015, o que é um indicativo da maior intensidade desta seca quando comparada às demais.

Tabela 4 – Porcentagem da área da bacia Amazônica em que foram registrados primeiros, segundos ou terceiros máximos e mínimos nos compostos das variáveis meteorológicas de JJAS 2005, JJAS 2010 e ONDJ 2015.

	JJAS 2005		JJAS 2010		ONDJ 2015	
	Máximos	Mínimos	Máximos	Mínimos	Máximos	Mínimos
LST	13,7%	4,9%	51,5%	0,9%	92,4%	0,2%
Precipitação	3,3%	43,8%	4,2%	49,4%	0,2%	83,4%
Radiação Solar	82,7%	0,0%	12,2%	19,0%	49,1%	1,1%

Conforme descrito anteriormente, além da precipitação, a temperatura da superfície e a radiação solar aparentam serem parâmetros cruciais para a compreensão das secas do século XXI na bacia Amazônica. Desta forma, procedeu-se à análise da evolução das anomalias padronizadas da LST (Figuras 13, 14 e 15) nos epicentros das secas, conforme apresentado anteriormente para a precipitação (Figuras 7, 8 e 9).

No epicentro de 2005 predominaram anomalias positivas de LST, porém fracas (abaixo de 1) e restritas ao quadrimestre JJAS. Em 2010, as temperaturas acima da média começaram em ONDJ do ano anterior nos epicentros 1 e 2 (noroeste e oeste da bacia), atingindo o pico em FMAM e voltando a condições aproximadamente neutras em ONDJ. No epicentro 3, as anomalias positivas se concentraram em FMAM e JJAS de 2010 apenas.

Em 2015, fracas anomalias positivas de LST foram observadas no epicentro 1 desde FMAM de 2014 (Figura 15), intensificando-se a partir de FMAM de 2015 e atingindo os maiores valores em ONDJ, acima de 2. Nos demais epicentros as anomalias tiveram início em JJAS de 2014, diminuindo em FMAM de 2015 e intensificando-se a partir de JJAS. Percebe-se que nos epicentros 1 e 2 as anomalias de LST continuaram extremamente altas em FMAM de 2016 (com medianas em torno de 2), e no epicentro 3 estiveram ainda maiores do que em ONDJ de 2015 (acima de 2). Nota-se também que, ao contrário da seca de 2005, que observou anomalias fracas, e da seca de 2010, em que as maiores anomalias foram registradas no

quadrimestre anterior àquele mais afetado pela seca, durante a seca de 2015 ambas a precipitação e a temperatura tiveram a sua atuação máxima em ONDJ, estação que apresentou os maiores valores de anomalia de LST dentre as três secas analisadas (da ordem de 2 desvios padrões), à exceção do epicentro 3 de 2015, conforme mencionado acima.

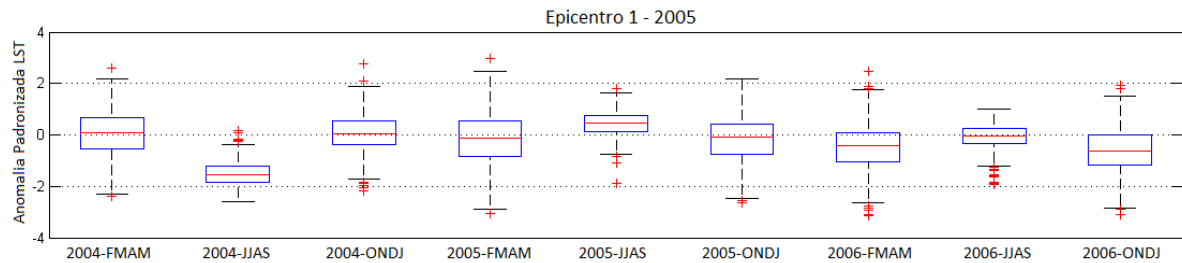


Figura 13 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da LST no epicentro da seca de 2005.

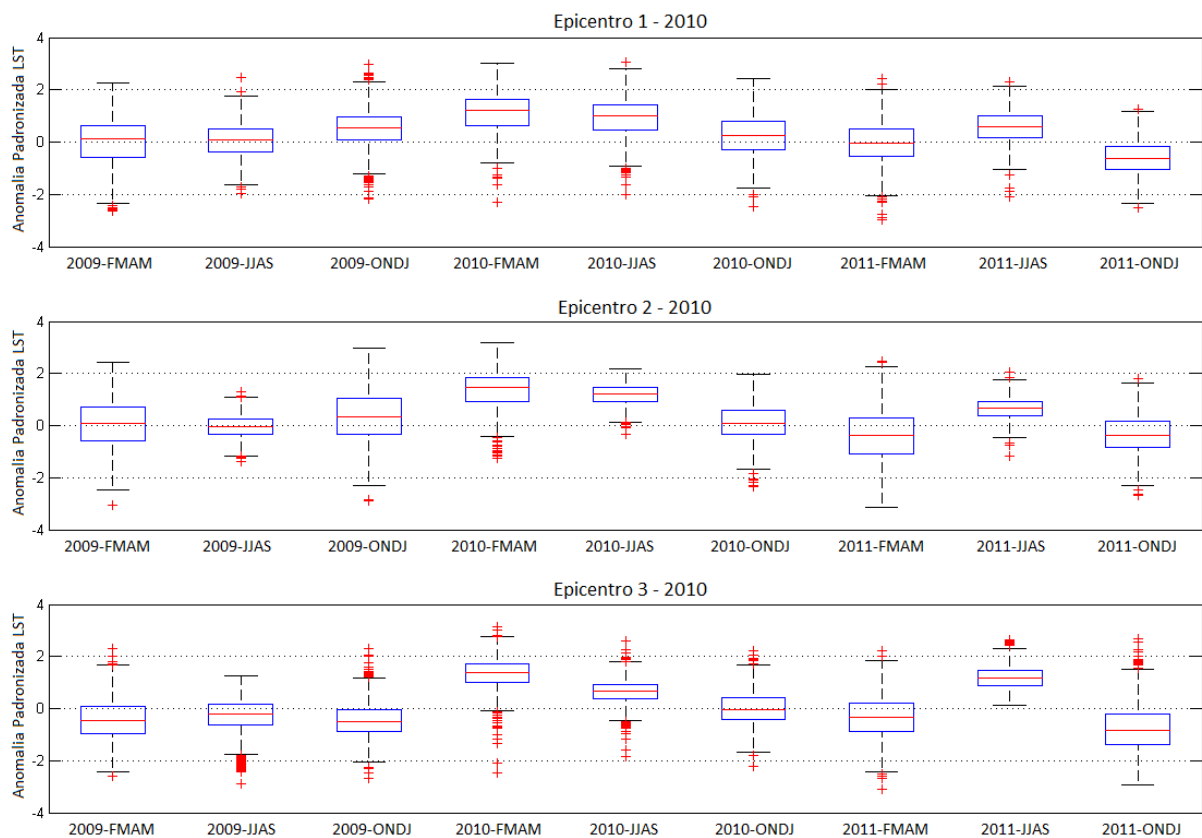


Figura 14 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da LST nos epicentros 1 (superior), 2 (centro) e 3 (inferior) da seca de 2010.

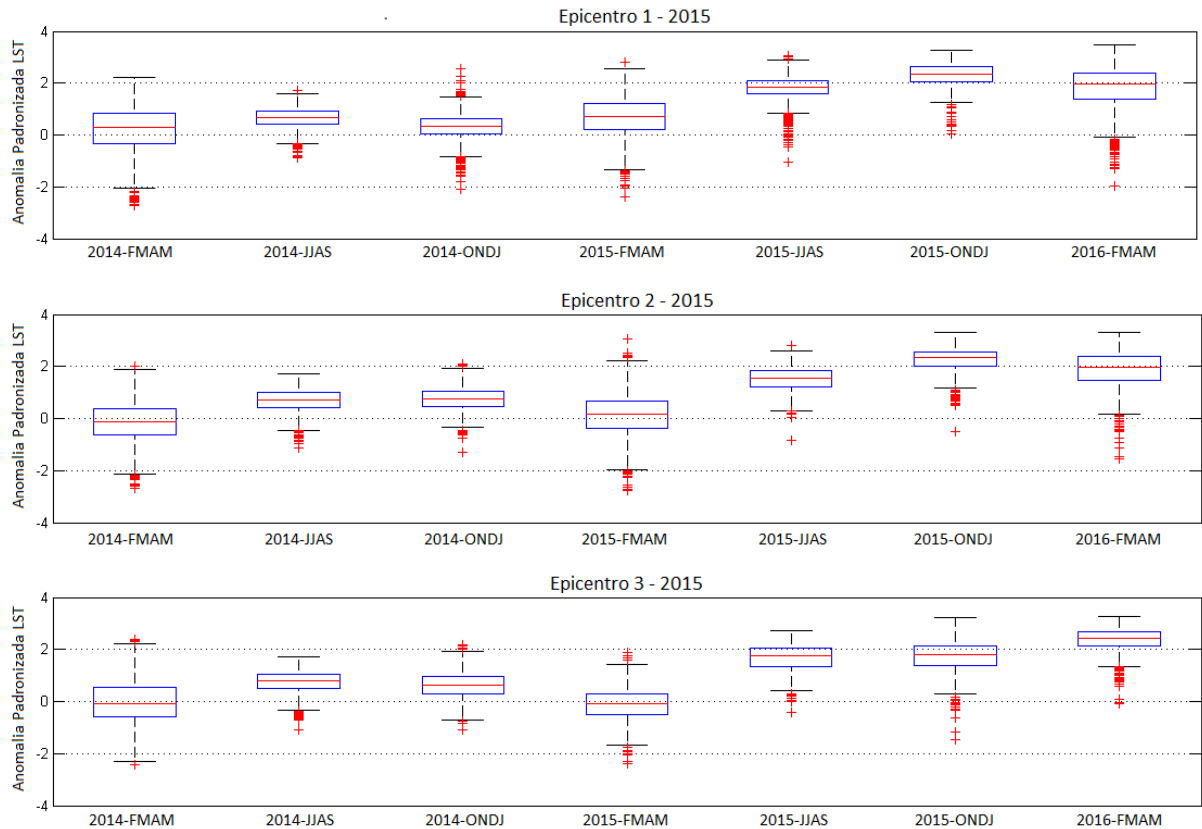


Figura 15 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da LST nos epicentros 1 (superior), 2 (centro) e 3 (inferior) da seca de 2015.

Procedendo a análise semelhante com a radiação solar, observa-se que a mesma apresentou anomalias positivas em todo o período entre FMAM de 2004 e ONDJ de 2006 no epicentro de 2005 (Figura 16), com as maiores anomalias sendo registradas em JJAS daquele ano. Em 2010, no entanto, cada epicentro se comportou de uma maneira, sendo no epicentro 1 registradas anomalias negativas em quase todo o período analisado. Nos epicentros 2 e 3, anomalias positivas foram observadas apenas em JJAS de 2010, ainda que no epicentro 2 elas tenham sido bastante fracas, com medianas em torno de 1 (Figura 17).

Conforme mencionado anteriormente, a seca de 2015 caracterizou-se por anomalias positivas de radiação, que começaram em FMAM de 2015 no epicentro 1 e em FMAM de 2014 no epicentro 2, alcançando valores máximos em ONDJ de 2015 em ambos os casos (Figura 18). O epicentro 3 foi o único a apresentar fracas anomalias negativas em todo o período entre JJAS de 2014 e ONDJ de 2015, em torno de -1.

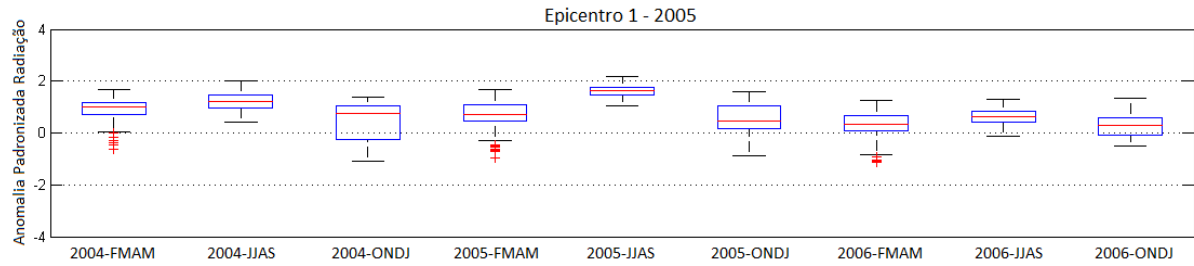


Figura 16 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da radiação solar no epicentro da seca de 2005.

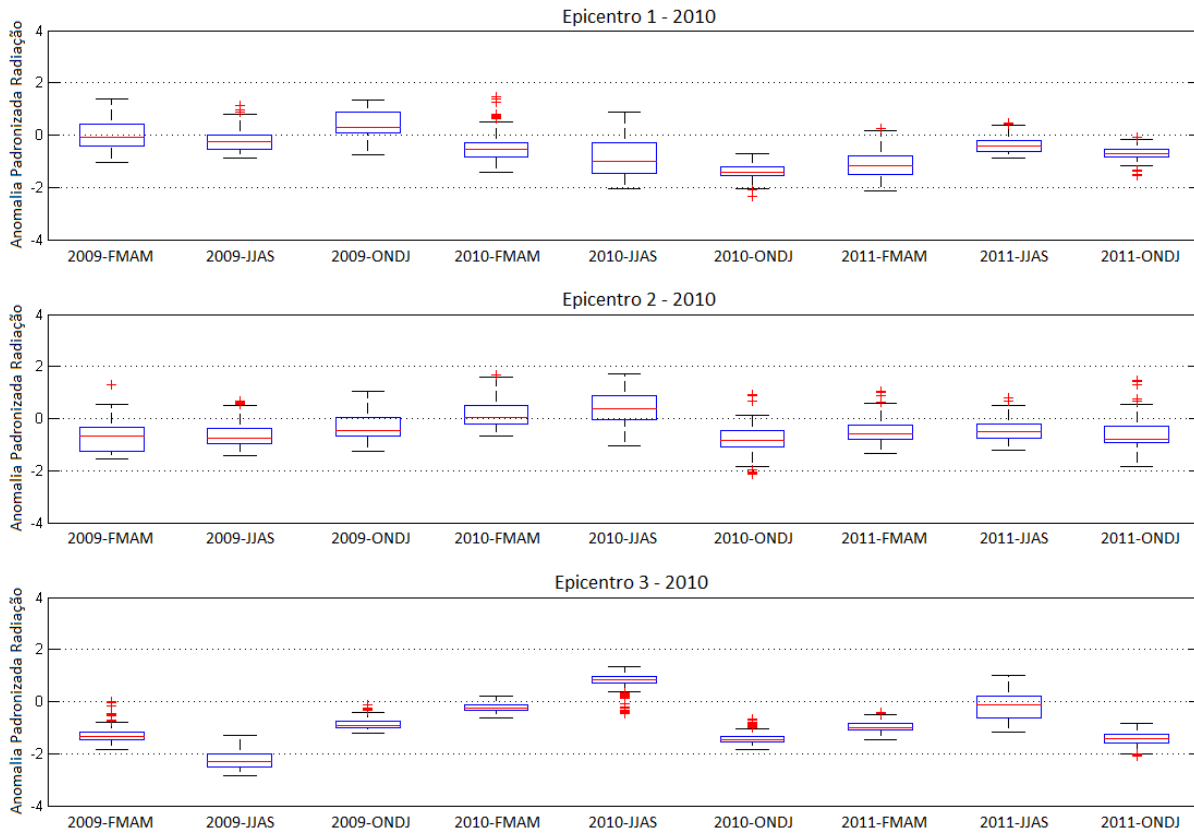


Figura 17 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da radiação solar nos epicentros 1 (superior), 2 (centro) e 3 (inferior) da seca de 2010.

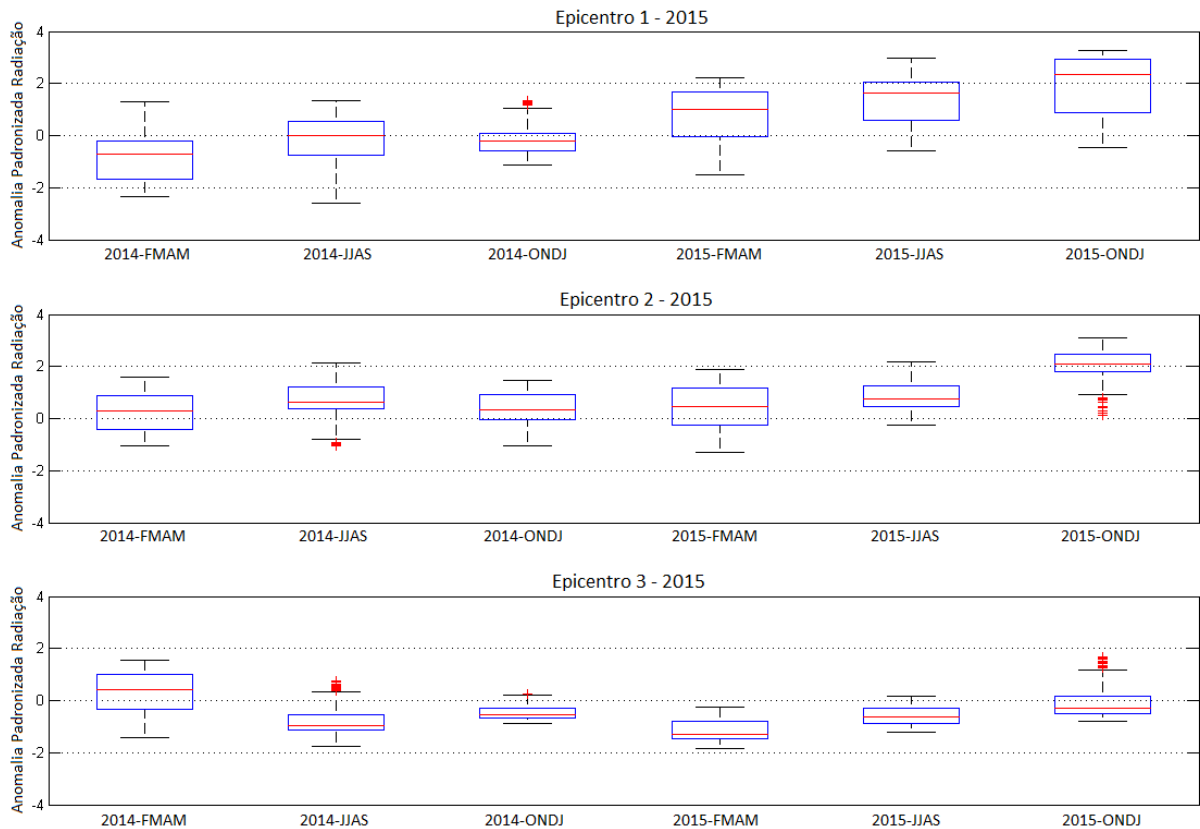
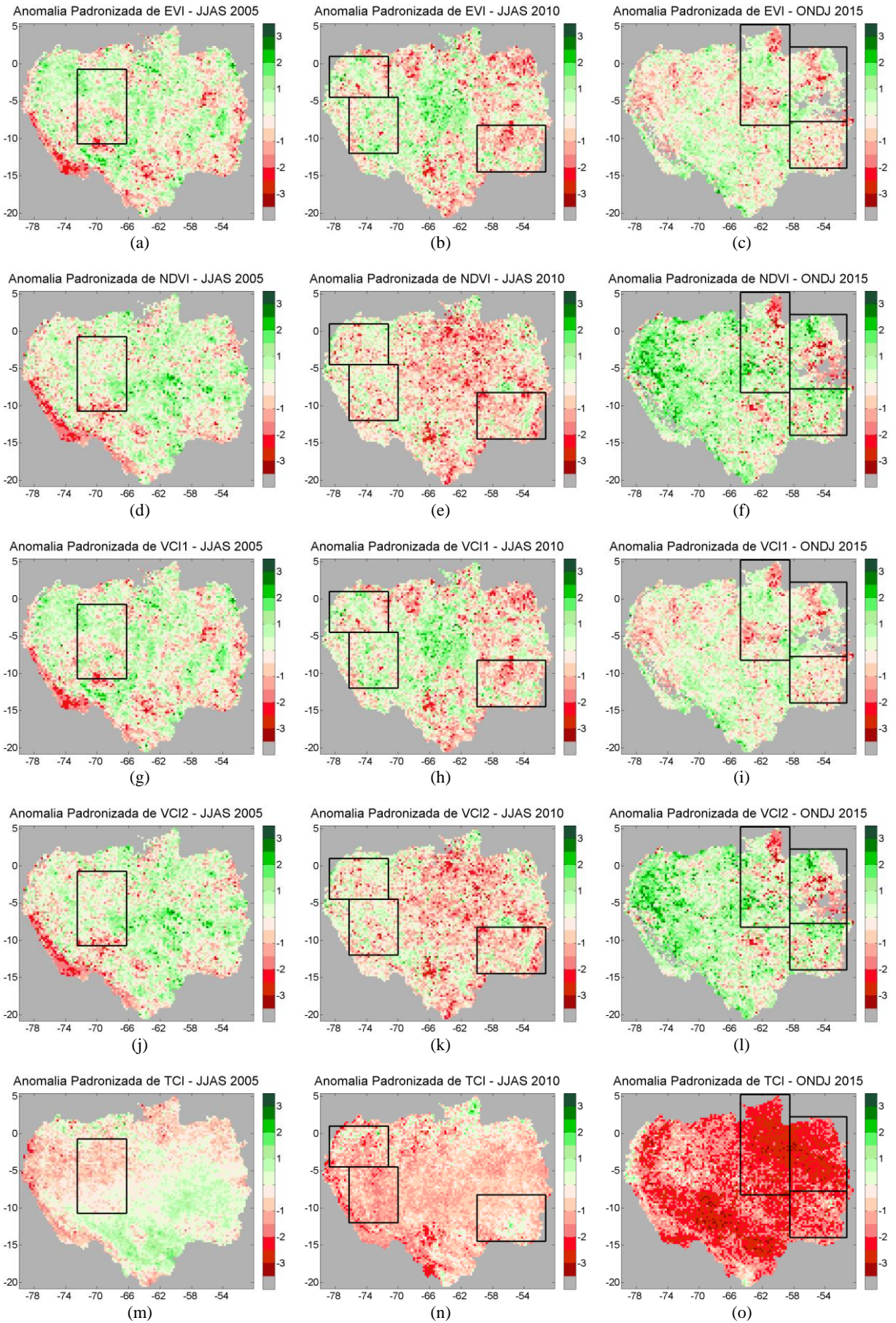


Figura 18 – Evolução dos *boxplots* das anomalias padronizadas da radiação solar nos epicentros 1 (superior), 2 (centro) e 3 (inferior) da seca de 2015.

3.3. Índices de Vegetação e de Seca

Na Figura 19 são apresentadas as anomalias padronizadas dos índices de vegetação/seca nos quadrimestres de maior atuação das secas (JJAS para 2005 e 2010 e ONDJ para 2015). A seca de 2005 apresentou tanto anomalias positivas quanto negativas de EVI e NDVI; já em 2010, o NDVI apresentou um padrão predominantemente de escurecimento da vegetação, mais intenso fora dos epicentros (no norte e nordeste da bacia), enquanto o EVI apresentou tanto anomalias positivas quanto negativas. Em 2015, novamente ambos os sinais de esverdeamento e escurecimento foram observados, no entanto a ausência de dados no leste da bacia devido à presença de nuvens e aerossóis dificulta a análise no epicentro 2 da seca. Os VCI apresentaram padrões semelhantes ao EVI/NDVI e o TCI (cujo comportamento é igual ao da LST, porém oposto) foi o principal responsável pelo escurecimento observado em ambos os VHI em 2010 e 2015.



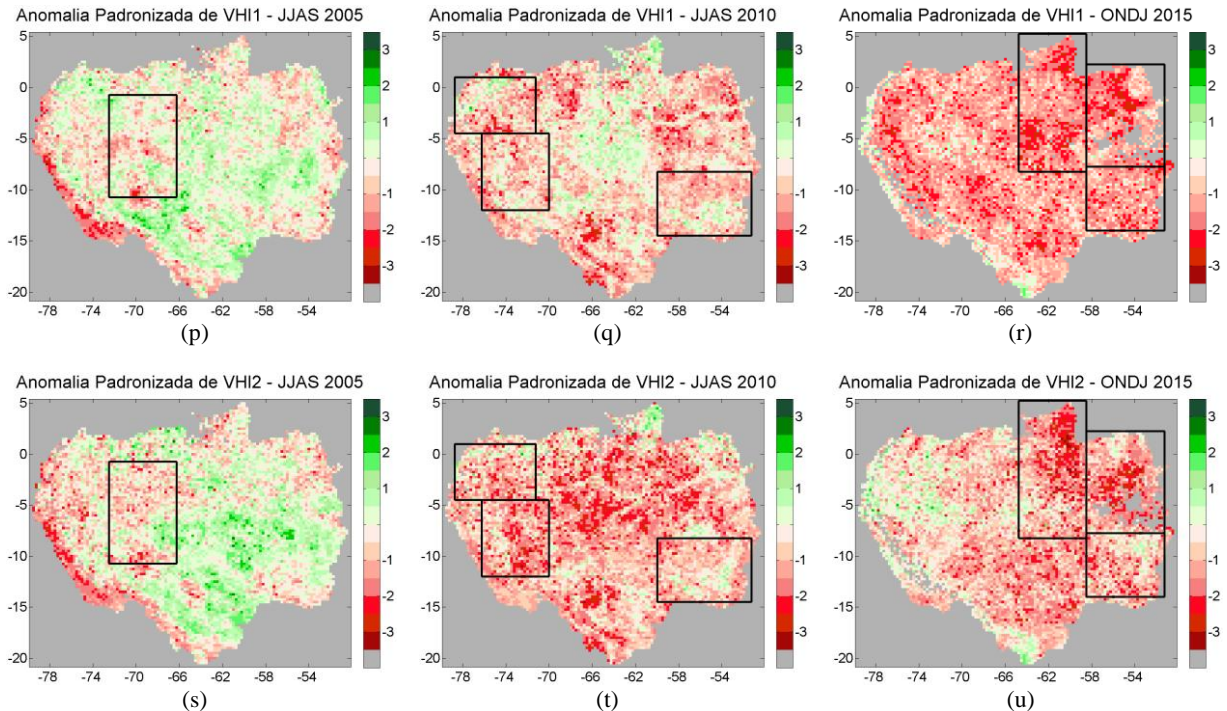


Figura 19 – Anomalias padronizadas de EVI (a, b, c), NDVI (d, e, f), VCI1 (g, h, i), VCI2 (j, k, l), TCI (m, n, o), VHI1(p, q, r) e VHI2 (s, t, u) durante JJAS de 2005 (esquerda), JJAS de 2010 (centro) e ONDJ de 2015 (direita) em toda a área de estudo.

A porcentagem da área da bacia em que foram detectados máximos e mínimos dos índices de vegetação/seca é mostrada na Tabela 5 e na Figura 20 são apresentados os mapas de mínimos referentes aos índices VCI2, TCI e VHI2. Percebe-se que os índices EVI e VCI1 não demonstraram um resultado esclarecedor sobre o esverdeamento/escurecimento da vegetação em nenhum dos três eventos, sendo registradas tanto anomalias positivas quanto negativas. Os índices NDVI e VCI2 também não apresentaram um comportamento homogêneo na seca de 2005, com máximos e mínimos ocorrendo na mesma proporção. Em JJAS de 2010 o NDVI/VCI2 registrou valores mínimos em grande parte (34,2%) da bacia, caracterizando assim um comportamento de escurecimento, enquanto em 2015, ao contrário, um esverdeamento pode ser notado, com máximos ocorrendo em 38,7% da região. Já o TCI, como esperado, registrou mínimos em grande parte da bacia em 2010 e em quase toda a bacia em 2015, não apresentando máximos nesses anos. Os índices de seca VHI1/VHI2, que são uma conjugação dos VCI e TCI e registraram mínimos em 2010 e 2015, aparentam representar de forma mais consistente a resposta da vegetação à seca, principalmente em secas caracterizadas não só pelo déficit de precipitação, mas também por valores altos e anômalos de LST.

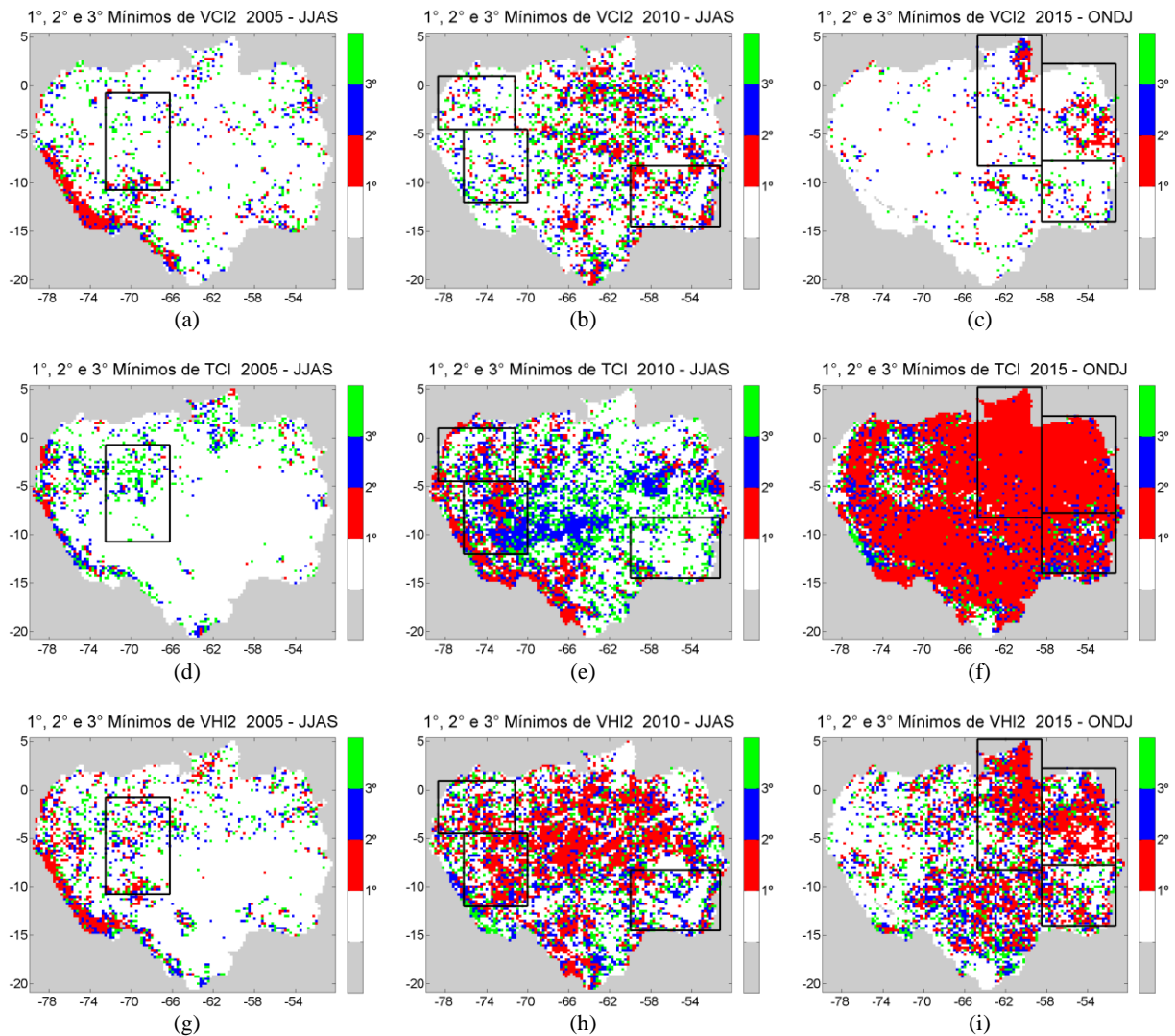


Figura 20 – Primeiros, segundos e terceiros mínimos de VCI2 (a, b, c), TCI (d, e, f) e VHI2 (g, h, i) durante JJAS de 2005 (esquerda), JJAS de 2010 (centro) e ONDJ de 2015 (direita) em toda a área de estudo.

Tabela 5 – Porcentagem de píxeis em que foram registrados primeiros, segundos ou terceiros máximos e mínimos nos compostos de cada índice em JJAS 2005, JJAS 2010 e ONDJ 2015.

	JJAS 2005		JJAS 2010		ONDJ 2015	
	Máximos	Mínimos	Máximos	Mínimos	Máximos	Mínimos
EVI/VCI1	19,7%	17,6%	17,3%	22,8%	13,5%	15,3%
VHI1	13,2%	18,1%	3,7%	40,5%	0,7%	70,9%
NDVI/VCI2	19,8%	16,4%	7,1%	34,2%	38,7%	11,4%
VHI2	16,1%	20,6%	2,0%	58,9%	2,4%	51,7%
TCI	4,9%	13,7%	0,9%	51,5%	0,2%	92,4%

A evolução da área de escurecimento (área em que as anomalias padronizadas dos índices de vegetação/seca são menores que -1) segundo os índices EVI e NDVI não apresentou o mesmo padrão daquela afetada pela seca segundo a precipitação, como pode ser visto nos gráficos de anomalias padronizadas da área afetada de acordo com estes índices

(Figura 21). Apenas no evento de 2010 ambos os índices experimentaram aumento na área afetada; em 2005 ambos os índices apresentaram queda na área de anomalias negativas e em JJAS de 2015 eles apresentaram comportamentos opostos, com o EVI aumentando a área afetada e o NDVI diminuindo. No quadrimestre ONDJ, o ano com maior área de escurecimento, segundo o EVI, foi 2007; de acordo com o NDVI, 2010. Ambos os índices não foram capazes de reproduzir em 2015 a área afetada pela seca meteorológica.

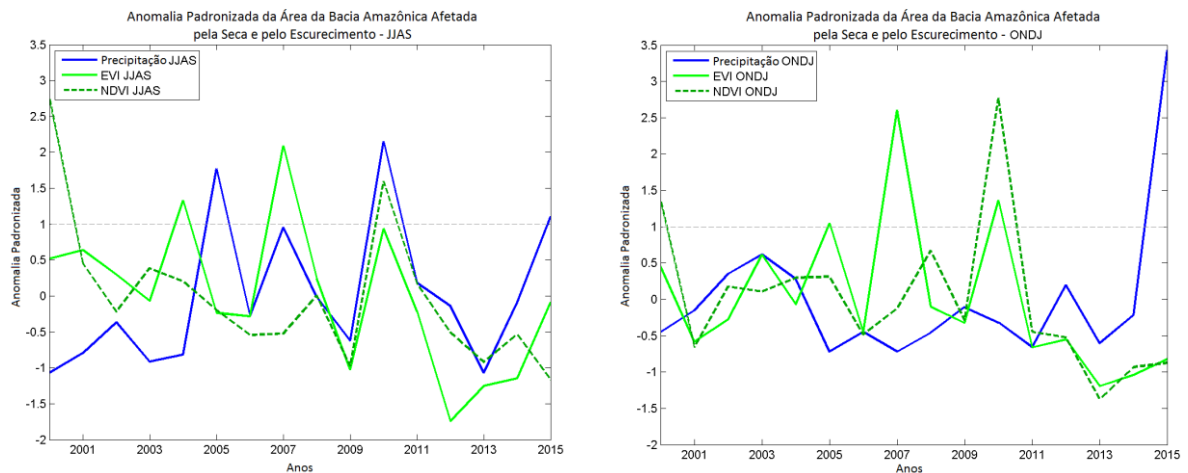


Figura 21 – Anomalias padronizadas da área afetada pela seca (linha azul) e pelo escurecimento entre os anos 2000 e 2015 em JJAS (esquerda) e ONDJ (direita), de acordo com o EVI (linha verde sólida) e o NDVI (linha verde pontilhada). As áreas afetadas pela seca (escurecimento) são definidas como aquelas em que a anomalia padronizada da precipitação (do índice de vegetação/seca) é menor do que -1.

A correspondência entre as áreas afetadas pela seca segundo a precipitação e o VHI1/VHI2 mostrou-se muito maior do que com os índices de vegetação (Figura 22). Em JJAS notam-se picos de anomalia de área afetada nos 3 anos das secas, além de anomalias positivas também nos anos de 2007 (VHI1), 2011, 2012 e 2014 (VHI1 e VHI2). O baixo valor de anomalia de área afetada em 2005, se comparado aos demais anos de secas, é compatível com o fato de em 2005 não terem sido registradas fortes anomalias de temperatura. A tendência, no entanto, seguiu a da precipitação: aumento em 2005 e diminuição no ano seguinte. Ambos os VHI também foram capazes de reproduzir o extensivo aumento de área afetada pela seca em ONDJ de 2015, único ano com anomalia de área afetada acima de 1,5 desvio padrão em toda a série de dados neste quadrimestre.

Os resultados apresentados são um indicativo do papel da LST na resposta da vegetação nas secas analisadas, demonstrando desta forma a real necessidade de se analisar a seca não só sob o aspecto do déficit de precipitação.

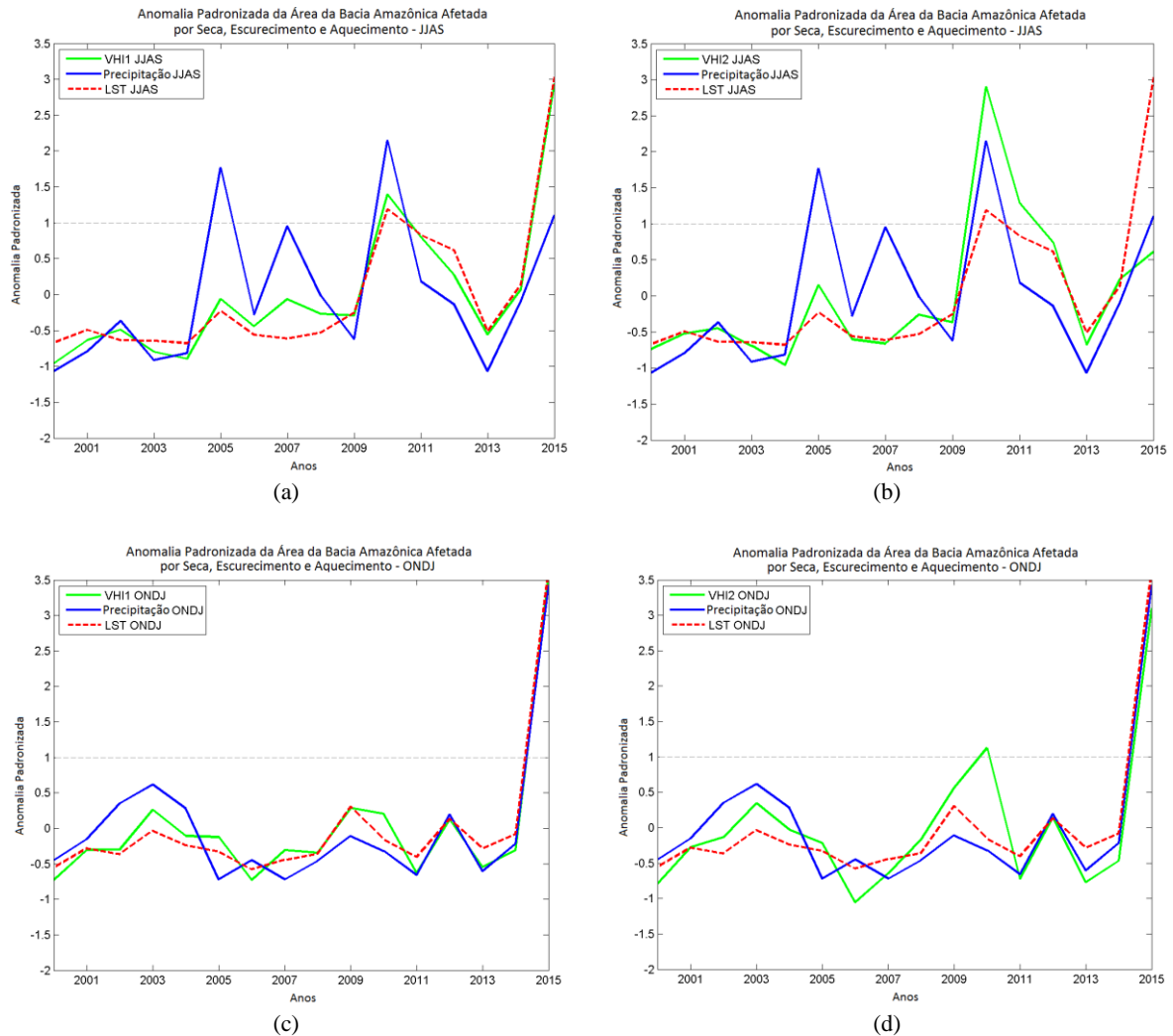


Figura 22 – Anomalias padronizadas da área afetada pela seca e pelo escurecimento entre os anos 2000 e 2015 em JJAS (painéis superiores) e ONDJ (painéis inferiores), de acordo com o VHI1 (a, c) e o VHI2 (b, d). Também são mostradas as anomalias padronizadas áreas afetadas por anomalias padronizadas de LST acima de +1. As áreas afetadas pela seca (escurecimento) são definidas como aquelas em que a anomalia padronizada da precipitação (do índice de vegetação/seca) é menor do que -1.

3.4. Comparação entre os eventos de seca de 2005, 2010 e 2015

Uma síntese do comportamento das variáveis meteorológicas e dos índices de vegetação/seca é apresentada nas Figuras 23, 24 e 25, para os quadrimestres de maior atuação de cada evento. Para os índices de vegetação/seca, são apresentados também os *boxplots* do quadrimestre seguinte, a fim de se avaliar se tais índices responderam à deficiência da precipitação com atraso. Nota-se que a seca de 2005 caracterizou-se por apresentar anomalias de LST e principalmente de radiação solar predominantemente positivas, além de, obviamente, anomalias negativas de precipitação. A precipitação e a radiação tiveram papéis igualmente importantes nesta seca, como pode ser visto nos valores quase equivalentes das medianas das suas anomalias, de -1,7 e +1,6, respectivamente. Com relação aos índices de

vegetação e de seca, foram observadas medianas em torno da normalidade (anomalia padronizada igual a zero) em ambos EVI e NDVI e seus respectivos VCI. Os VHI apresentaram anomalias ligeiramente negativas, um pouco menores que os demais índices devido à média com o TCI, porém apresentando valores maiores já no quadrimestre seguinte (Figura 23).

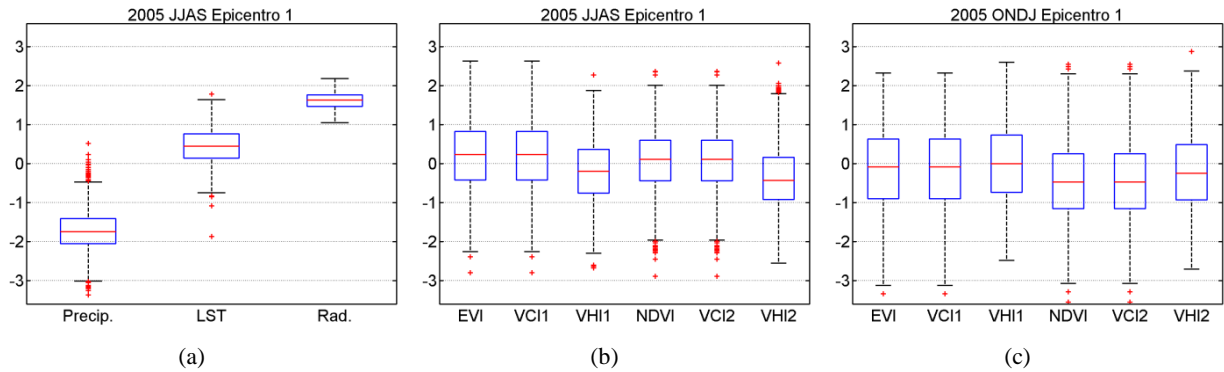


Figura 23 – *Boxplots* das anomalias padronizadas das variáveis meteorológicas de JJAS 2005 (esquerda) e dos índices de vegetação/seca de JJAS 2005 (centro) e de ONDJ 2005 (direita) no epicentro da seca de 2005.

Na seca de 2010, ao contrário da precipitação, a LST apresentou anomalias predominantemente positivas (Figura 24). A radiação solar, no entanto, apresentou anomalias negativas no epicentro 1 e positivas nos demais. Desta forma, a precipitação e a LST foram as variáveis meteorológicas de maior destaque nesta seca, com medianas de anomalias de -1,4, -1,3 e -1,3 (precipitação) e de +1,0, +1,2 e +0,7 (LST) contra medianas de -1,0, +0,4 e +0,8 da radiação nos epicentros 1, 2 e 3, respectivamente. Os indicadores de vegetação apresentaram valores próximos à média no epicentro 1, sendo de notar anomalias negativas nos índices de seca. No epicentro 2 os índices EVI/VCI1 não tiveram em média valores fora da normalidade, enquanto que NDVI/VCI2 e os demais índices de seca demonstraram anomalias negativas. No epicentro 3 todos os índices apresentaram em geral anomalias negativas. Nota-se que no quadrimestre seguinte todos os índices apresentaram valores maiores na maior parte dos epicentros, com exceção do NDVI/VCI2 nos epicentros 1 e 3.

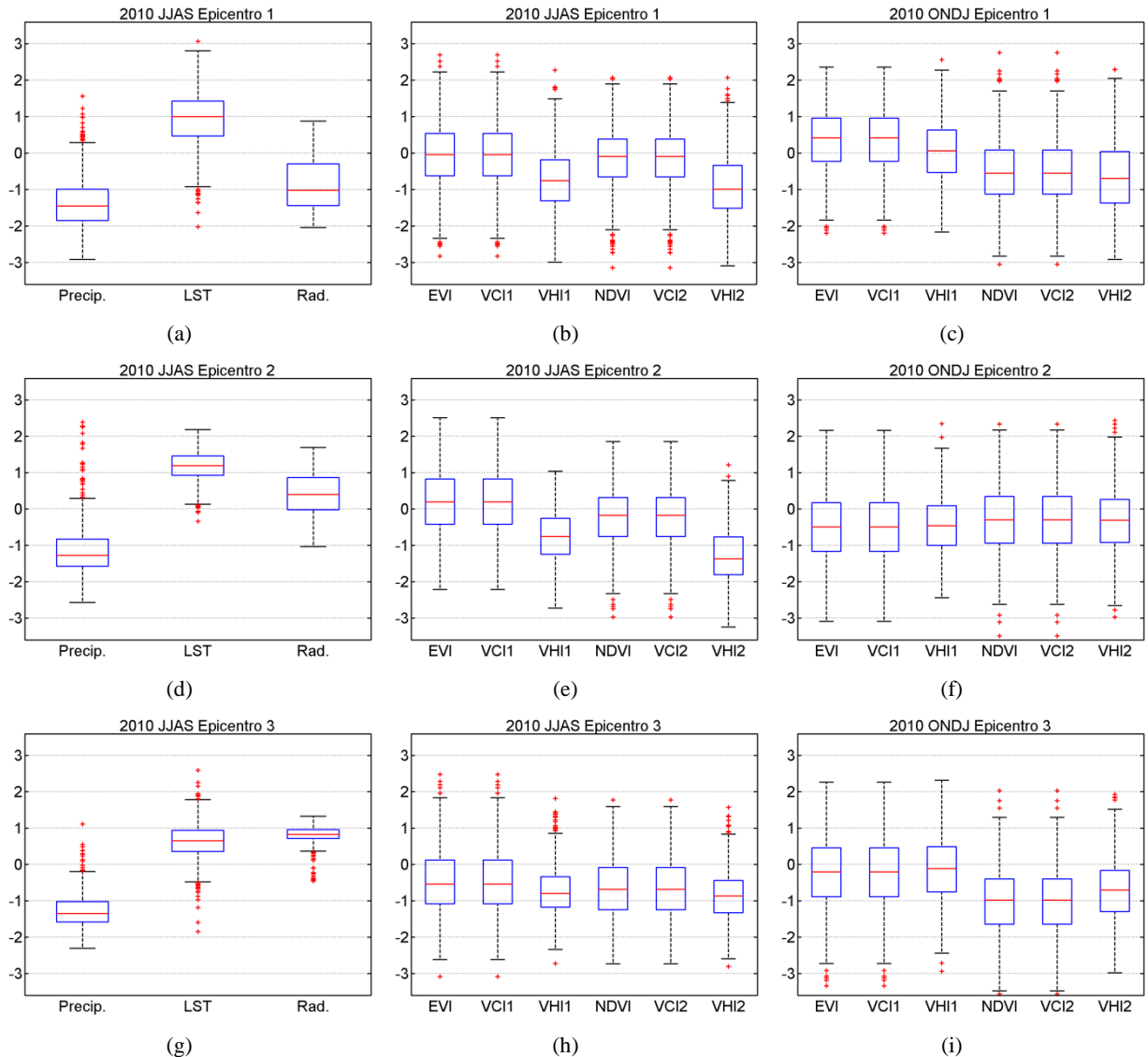


Figura 24 – *Boxplots* das anomalias padronizadas das variáveis meteorológicas de JJAS 2010 (painéis superiores), dos índices de vegetação/seca de JJAS 2010 (painéis centrais) e de ONDJ 2010 (painéis inferiores) em cada um dos três epicentros.

Durante a seca de 2015, as anomalias de precipitação caracterizaram-se por apresentarem valores muito baixos (medianas de -1,7, -2,0 e -1,8 nos epicentros 1, 2 e 3, respectivamente), enquanto as de LST apresentaram valores muito altos (medianas de +2,4, +2,3 e +1,8). Predominaram anomalias positivas de radiação solar nos epicentros 1 e 2, com medianas de +2,3 e +2,0, respectivamente, e anomalias negativas no epicentro 3 (-0,4). Sendo assim, pode-se afirmar que todas as variáveis meteorológicas tiveram papel de destaque na seca mais recente da bacia Amazônica, com a LST apresentando as anomalias mais intensas, juntamente com a radiação no epicentro 1 e com a precipitação no epicentro 3.

Adicionalmente, percebe-se que os valores extremamente altos de LST diminuíram consideravelmente os valores de ambos os VHI, os quais permaneceram negativos no

quadrimestre seguinte (Figura 25 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Desta forma, os resultados voltam a demonstrar que a resposta da vegetação à seca é mais aparente quando se utiliza um índice de seca, no caso o VHI.

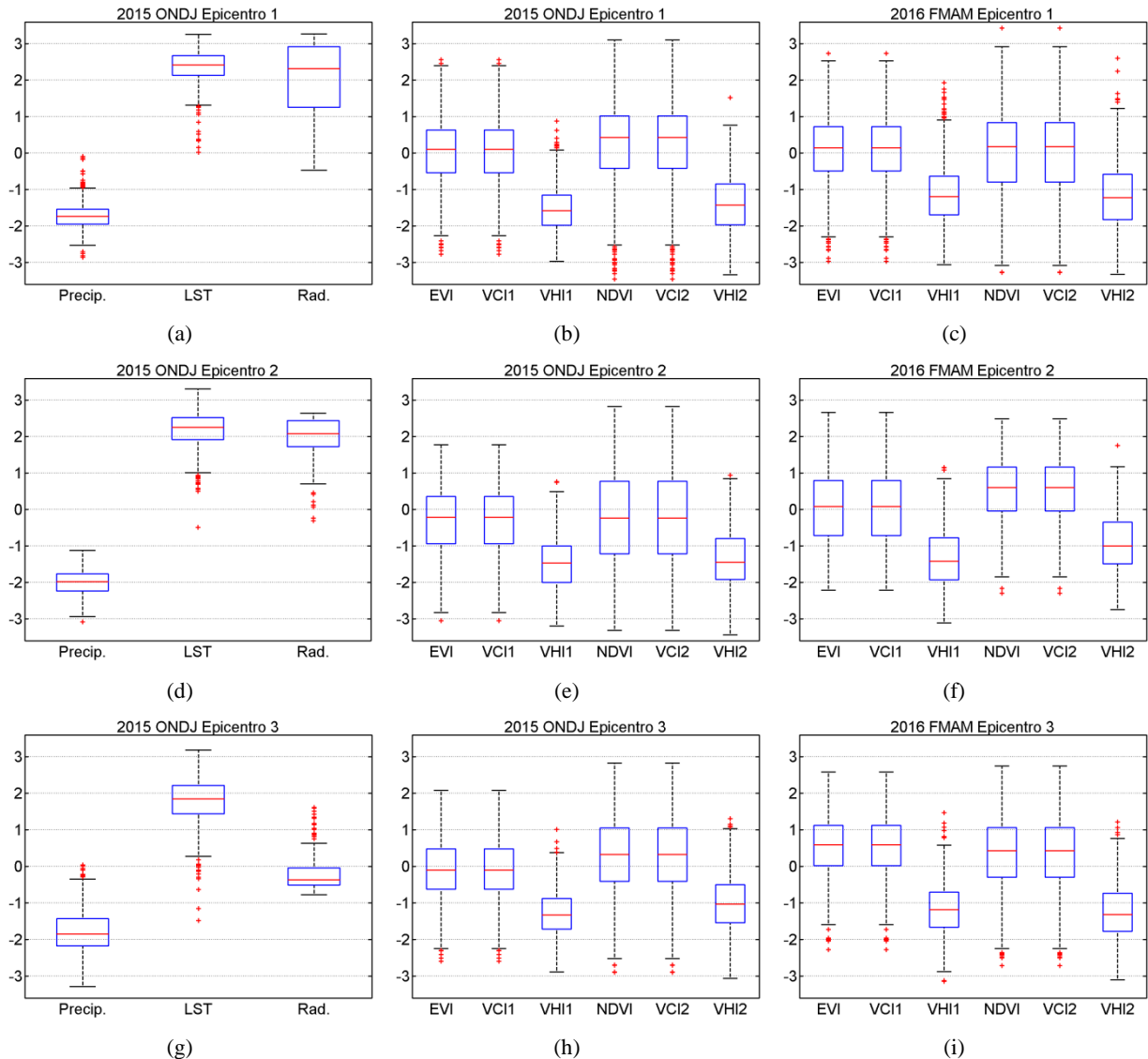


Figura 25 – *Boxplots* das anomalias padronizadas das variáveis meteorológicas de ONDJ 2015 (painéis superiores), dos índices de vegetação/seca de ONDJ 2015 (painéis centrais) e de FMAM 2016 (painéis inferiores) em cada um dos três epicentros.

Os anos de 2000 a 2015 foram agrupados em duas séries diferentes, de acordo com a precipitação. A primeira série é composta apenas pelos anos considerados “úmidos”, a saber: 2000, 2001, 2003, 2004, 2009 e 2013; e a segunda série compreende os anos “secos”: 2006, 2007, 2008, 2011, 2012 e 2014. A classificação dos anos como úmidos ou secos foi feita com base na anomalia padronizada da área afetada pela seca em cada ano (Figura 5), sendo os anos de 2005, 2010 e 2015 intencionalmente deixados de fora a fim de não contaminar as séries.

Na Figura 26 são apresentados os quartis das duas séries de dados de cada um dos índices de vegetação/seca EVI, NDVI, VHI1 e VHI2. Para os anos de 2005, 2010 e 2015 são apresentados os valores médios dos índices em cada epicentro, sendo possível desta forma avaliar se o ano em questão comportou-se de forma extrema de acordo com cada índice.

A variação entre os quartis dos anos secos e úmidos de EVI e NDVI se mostrou tão pequena, que se pode dizer que não há uma clara diferença no comportamento desses índices em anos de seca e de excesso de precipitação, visto que seus valores variam mais espacialmente do que de anos secos para úmidos. Estes resultados corroboram a ausência de padrão de resposta notada na Figura 19. Em anos de seca são encontrados tanto valores positivos quanto negativos de anomalias de EVI e NDVI.

Os índices VHI1 e VHI2, no entanto, seguiram o padrão esperado, isto é, no geral, os anos úmidos possuem valores ligeiramente superiores aos anos secos. Desvios deste comportamento são encontrados apenas nos epicentros 1 e 2 de 2015, onde os valores de VHI1/VHI2 nos anos considerados secos são superiores aos dos úmidos. Contudo, durante as secas de 2010 e 2015 estes índices apresentaram valores extremos em todos os epicentros, abaixo de 0,3. Apenas em 2005 o VHI1 manteve-se próximo à sua mediana de anos secos e o VHI2 próximo ao primeiro quartil, comportamento explicado pelo fato de a seca de 2005 não ter sido marcada por anomalias muito positivas de LST, conforme mencionado anteriormente.

P25(*), P50(°), P75(+). Azul (anos secos), Preto (anos úmidos), Vermelho (anos em questão)

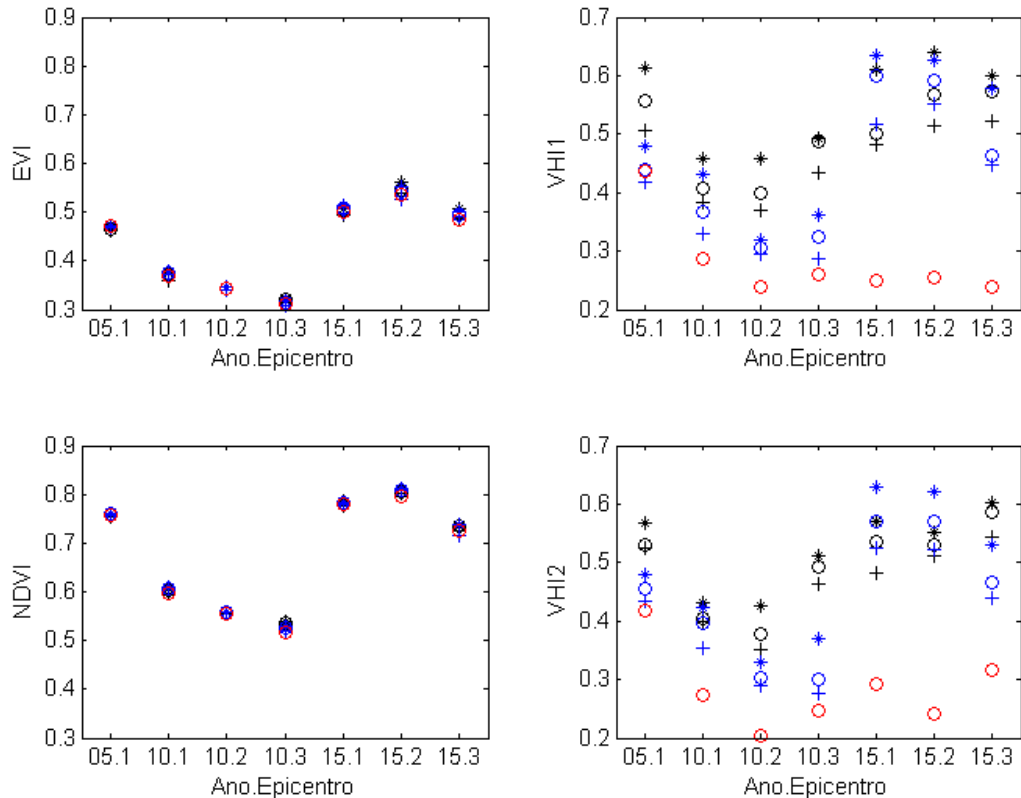


Figura 26 – Primeiros, segundos e terceiros quartis (percentis 25, 50 e 75) das séries temporais dos valores médios dos índices EVI, NDVI, VHI1 e VHI2 na área afetada pela seca em cada epicentro identificado na bacia Amazônica. Para os epicentros de 2005 e de 2010 foram utilizadas as séries temporais de JJAS, e para 2015, de ONDJ. A área afetada pela seca é definida como aquela em que a anomalia padronizada da precipitação é menor que -1.

Fazendo a mesma análise para as variáveis meteorológicas (Figura 27), percebe-se que a precipitação, conforme esperado, apresentou valores extremos nos anos de seca analisados. Com relação à LST, é interessante notar que em todos os epicentros os quartis em anos secos e úmidos não diferem muito (no máximo 0,5 °C), sendo, no entanto as temperaturas de anos secos ligeiramente superiores às de anos úmidos. De fato, os valores médios de LST durante as secas de 2005 e 2010 estiveram próximos aos valores esperados dos anos secos. Na seca de 2015, contudo, nos três epicentros o valor de LST naquele ano destacou-se por ser cerca de 1 °C acima do esperado. Ou seja, embora os três quartis dos anos secos e os três dos anos úmidos da série temporal de ONDJ em todos os epicentros de 2015 apresentem valores muito próximos uns dos outros, mostrando que a temperatura neste quadrimestre normalmente não apresenta grande variação, ainda assim os valores médios da LST foram cerca de 1 °C superiores a tais quartis, evidenciando-se assim quão extremas tais temperaturas foram.

Não é possível notar diferenças expressivas no comportamento da radiação solar em anos úmidos e secos. Apesar disso, nas secas de 2005 e 2015 (epicentros 1 e 2) o valor médio

desta variável esteve acima dos quartis de ambos os anos secos e úmidos. Nos demais epicentros não foi possível notar um padrão de comportamento definido.

P25(*), P50(°), P75(+). Azul (anos secos), Preto (anos úmidos), Vermelho (anos em questão)

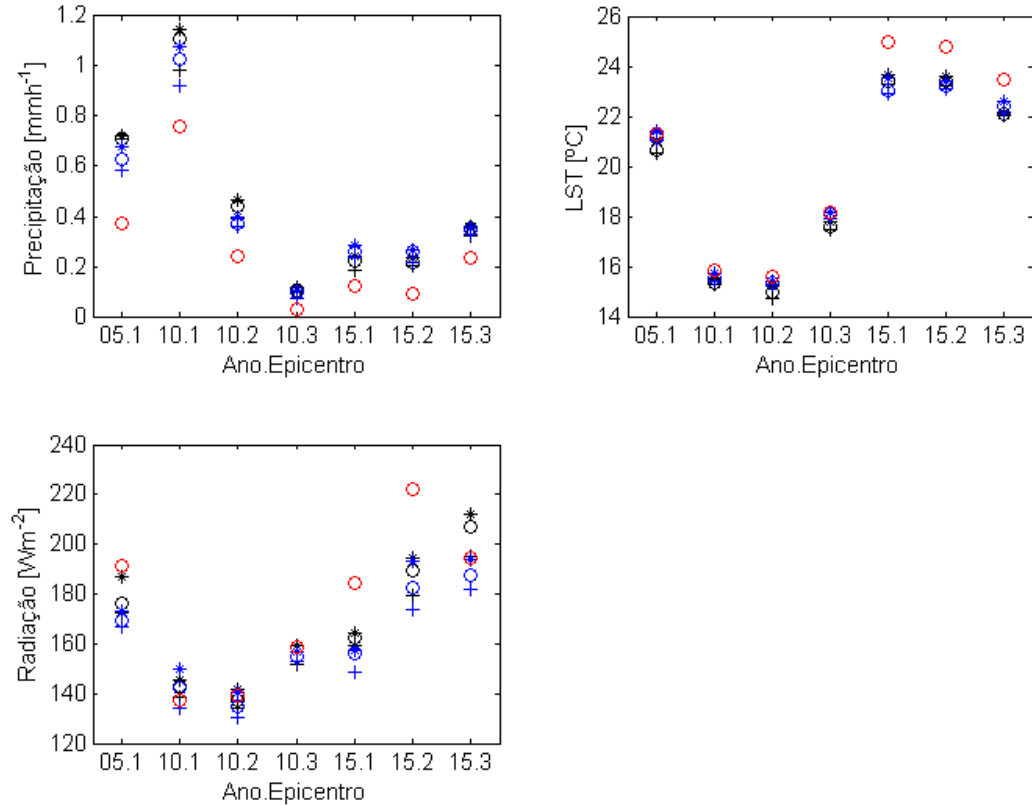


Figura 27 – Primeiros, segundos e terceiros quartis das séries temporais dos valores médios das variáveis meteorológicas Precipitação, LST e Radiação Solar na área afetada pela seca em cada epicentro identificado na Amazônia. Para os epicentros de 2005 e de 2010 foram utilizadas as séries temporais de JJAS, e para 2015, de ONDJ. A área afetada pela seca é definida como aquela em que a anomalia padronizada da precipitação é menor que -1.

4. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo principal analisar os eventos de secas na bacia Amazônica nos anos de 2005, 2010 e 2015 do ponto de vista do comportamento de algumas variáveis meteorológicas (precipitação, temperatura de superfície continental e radiação solar) e índices de vegetação baseados em dados de sensoriamento remoto.

Este trabalho é pioneiro em analisar a seca de 2015 na bacia Amazônica, permitindo assim a intercomparação com as duas secas extremas anteriores ocorridas no século XXI. Os resultados apresentados indicam que as três secas diferem entre si quanto à área, período de atuação, intensidade, localização e duração. O quadrimestre JJAS foi o mais afetado pelo déficit de precipitação tanto em 2005 quanto em 2010, enquanto que em 2015 as piores

condições foram observadas em ONDJ, com anomalias em torno de -2. Corroborando estudos anteriores (Coelho *et al.*, 2012; Espinoza *et al.*, 2011; Jiménez-Muñoz *et al.*, 2016; Lewis *et al.*, 2011; Marengo *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2011), os dados de precipitação mostram que em 2005 a área mais afetada foi o oeste da bacia Amazônica, o qual foi novamente afetado em 2010, juntamente com o noroeste e o sudeste da região. Em 2015 toda a bacia foi afetada, sendo as anomalias de precipitação mais intensas no leste da região, onde foram identificados três epicentros contíguos.

A seca de 2005, a qual afetou 38% da bacia Amazônica, teve duração de três quadrimestres. Na seca de 2010 foram observados aumentos tanto na área afetada como na duração do evento: 43% da bacia esteve sob condições de seca durante 7 quadrimestres no epicentro 1, 4 quadrimestres no epicentro 2 e 2 quadrimestres no epicentro 3. Em 2015 foram afetados 80% da bacia, em um evento que atuou durante pelo menos 3 quadrimestres nos epicentros 1 e 2 e 2 quadrimestres no epicentro 3, não sendo possível afirmar se sua atuação de fato já chegou ao fim.

O comportamento das variáveis meteorológicas analisadas neste estudo não foi o mesmo durante os três eventos de seca analisados. A precipitação e a radiação solar mostraram-se como os parâmetros de maior destaque durante a seca de 2005; em 2010 a precipitação e a LST se sobressaíram. Já em 2015 todas as três variáveis tiveram papel de destaque: LST e radiação no epicentro 1, LST no epicentro 2 e LST e precipitação no epicentro 3. Os resultados obtidos neste estudo indicam que a seca de 2015 foi o evento mais abrangente e intenso durante os primeiros anos do século XXI na bacia Amazônica, por apresentar as mais fortes anomalias de precipitação, radiação solar e principalmente LST dentre os eventos analisados (2005, 2010 e 2015). Estudos anteriores apontavam a seca de 2010 como a mais intensa do que a seca de 2005, a qual por sua vez, foi classificada como uma das mais intensas dos últimos 100 anos. Desta forma, pode-se analogamente afirmar, com base nos resultados obtidos neste trabalho que a seca de 2015 foi também uma das mais intensas dos últimos 100 anos, senão a mais intensa, embora se faça necessário analisar as secas ocorridas no último século a fim de se fazer tal afirmação.

O último relatório do IPCC (IPCC, 2014) indica que diferentes modelos de circulação global projetam um aumento tanto na frequência como na intensidade dos eventos de seca na região Amazônica, principalmente na região sul (Salazar, Nobre e Oyama, 2007), como consequência de emissões de gases de efeito estufa (Malhi *et al.*, 2008). A causa para tal

prognóstico se deve a duas razões: o aumento TSM no Pacífico, o que pode intensificar os eventos de El Niño e como consequência as secas periódicas Amazônicas associadas a estes eventos; e ainda um aumento na frequência de secas historicamente raras relacionadas com altos valores de TSM no Atlântico e um deslocamento na direção noroeste da ZCIT (Marengo *et al.*, 2008). A associação do aumento da frequência e intensidade de secas da Amazônia com eventuais mudanças climáticas está fora do escopo deste trabalho e requer estudos de significância estatística, com séries de dados maiores. Porém é evidente que, de fato, episódios extremos de seca na região têm ocorrido de forma quase regular nos últimos 15 anos (um episódio a cada 5 anos), com um aumento expressivo na intensidade e área de abrangência. Tal fato reforça a preocupação com alterações na dinâmica deste ecossistema que têm o potencial de transformar a floresta Amazônica de sumidouro para fonte de CO₂ para atmosfera.

Com relação à utilização de índices de vegetação com base em sensoriamento remoto, pode-se afirmar que ambos NDVI e EVI não forneceram evidências claras sobre a resposta da floresta à seca. Também não foram identificados neste estudo sinais evidentes de esverdeamento na seca de 2005 utilizando o EVI, conforme sugerido por Saleska *et al.* (2007). Tal resultado deve-se à utilização, nesta dissertação, da versão 6 dos dados de EVI e NDVI do MODIS, corroborando o estudo de (Bi *et al.*, 2016). O escurecimento encontrado em 2010 com o NDVI, apesar de condizente com os resultados de Xu *et al.* (2011), foi mais intenso em áreas não caracterizadas como pertencentes aos epicentros da seca. Desta forma, o presente estudo reforça os resultados de Atkinson, Dash e Jeganathan (2011), segundo os quais não é possível detectar a resposta da vegetação da Amazônia à seca utilizando índices de vegetação baseados em dados de sensoriamento remoto. Em primeiro lugar, porque ambos os sinais de esverdeamento e escurecimento foram detectados nos compostos de anomalias padronizadas de EVI e NDVI; e em segundo lugar, porque estes índices, além de não apresentarem correspondência com a área afetada pela seca meteorológica, registraram as maiores áreas afetadas em outros anos que não 2005, 2010 e 2015. O comportamento dos respectivos VCI se mostrou bastante semelhante ao dos índices de vegetação originais.

Os resultados demonstram que o índice híbrido VHI apresentou maior consistência sobre a resposta da vegetação aos eventos de seca. Como tal, o índice de seca VHI supera as deficiências dos índices de vegetação em termos de monitoramento de seca, por considerar em seu cálculo a LST. Desta forma, em eventos em que a LST foi anormalmente positiva, como em 2010 e 2015, o VHI captou o estresse sofrido pela vegetação; na seca de 2005, no

entanto, a qual não foi marcada por LST altas, o VHI não apresentou resultados tão expressivos, mas ainda assim melhores que os índices de vegetação, uma vez que foi capaz de identificar um aumento na área afetada pela seca. Além disso, o VHI2 aparenta resultados melhores que o VHI1, em grande parte porque o NDVI também apresenta maior sensibilidade do que o EVI. Tais resultados confirmam a teoria de que mesmo na versão 6 dos produtos de índices de vegetação do sensor MODIS ainda possam existir resíduos de contaminação atmosférica nos dados de EVI, conforme apontado por (Bi *et al.*, 2016). Conclui-se que o monitoramento orbital de secas através de índices híbridos que utilizam NDVI e LST é recomendável para a região Amazônica. De fato, estes resultados reforçam diversos estudos que sugerem o uso da LST em conjunto com índices de vegetação (por exemplo, o NDVI) para análises mais profundas sobre monitoramento de secas (Ghulam, Qin e Zhan, 2007; Kogan, 1995b; Lazzarini, Marpu e Ghedira, 2013; Park, Feddema e Egbert, 2004; Rhee, Im e Carbone, 2010; Wan, Wang e Li, 2004; Wu *et al.*, 2012)

Este estudo reforça a necessidade de analisar o papel de outras variáveis meteorológicas na resposta da vegetação aos eventos de seca na região. De fato, Nemani *et al.* (2003) apontam para a radiação como fator limitante ao crescimento da vegetação nas florestas tropicais, e os resultados do presente estudo confirmam que, em geral, a radiação solar e a temperatura da superfície são variáveis que apresentam anomalias expressivas nestes eventos de seca extrema. Entretanto, a complexa interação destas variáveis com a vegetação e a superfície em florestas tropicais (Vicente-Serrano *et al.*, 2013) evidencia a necessidade de mais estudos que possibilitem entender o diferente comportamento das variáveis meteorológicas e a resposta da vegetação aos eventos de seca na floresta Amazônica. A utilização de índices de vegetação/seca com base em sensoriamento remoto é promissora e possui diversas vantagens, porém a natureza complexa e diversa da vegetação na bacia Amazônica torna difícil fornecer evidências de que os índices de fato conseguem reproduzir a resposta da vegetação. Adicionalmente, a grande quantidade de nuvens e de aerossóis provenientes da queima de biomassa na Amazônia torna a tarefa de investigação da floresta através de sensores remotos mais delicada. Uma alternativa seria a utilização de dados de micro-ondas, porém estes apresentam a limitação de possuir uma menor base de dados. Estudos futuros que possibilitem o confronto de dados de sensoriamento remoto e dados *in situ* devem agregar conhecimentos necessários a esta complexa tarefa de monitorar e compreender os processos que ocorrem na Amazônia.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY COUNCIL. Drought - An Information Statement of the American Meteorological Society. n. September, 1997.
- ANDERSON, L. O.; MALHI, Y.; ARAGÃO, L. E. O.; LADLE, R.; ARAI, E.; BARBIER, N.; PHILLIPS, O. Remote sensing detection in Amazonian of droughts forest canopies. **New Phytologist**, v. 187, n. 3, p. 733–750, 2010.
- ANDREAE, M. O.; ROSENFELD, D.; ARTAXO, P.; COSTA, A. A.; FRANK, G. P.; LONGO, K. M.; SILVA-DIAS, M. A. F. Smoking rain clouds over the Amazon. **Science (New York, N.Y.)**, v. 303, n. FEBRUARY, p. 1337–1342, 2004.
- ANYAMBA, A.; TUCKER, C.; EASTMAN, J. NDVI anomaly patterns over Africa during the 1997/98 ENSO warm event. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 10, p. 1847–1859, 2001.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; ROMAN-CUESTA, R. M.; SAATCHI, S.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 7, p. 1–5, 2007.
- ASNER, G. P.; NEPSTAD, D.; CARDINOT, G.; RAY, D. Drought stress and carbon uptake in an Amazon forest measured with spaceborne imaging spectroscopy. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 101, n. 16, p. 6039–44, 2004.
- ATKINSON, P. M.; DASH, J.; JEGANATHAN, C. Amazon vegetation greenness as measured by satellite sensors over the last decade. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 19, p. 1–6, 2011.
- BANNARI, A.; MORIN, D.; BONN, F.; HUETE, A. R. A review of vegetation indices. **Remote Sensing Reviews**, v. 13, n. 1, p. 95–120, 1995.
- BI, J.; MYNENI, R.; LYAPUSTIN, A.; WANG, Y.; PARK, T.; CHI, C.; YAN, K.; KNYAZIKHIN, Y. Amazon forests' response to droughts: A perspective from the MAIAC product. **Remote Sensing**, v. 8, n. 4, p. 1–8, 2016.
- BUERMANN, W.; ANDERSON, B.; TUCKER, C. J.; DICKINSON, R. E.; LUCHT, W.; POTTER, C. S.; MYNENI, R. B. Interannual covariability in northern hemisphere air temperatures and greenness associated with El Niño-southern oscillation and the arctic oscillation. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. D13, p. 11–16, 2003.
- CHANG, F.-C.; WALLACE, J. M. **Meteorological Conditions during Heat Waves and Droughts in the United States Great Plains** *Monthly Weather Review*, 1987.
- CHURKINA, G.; RUNNING, S. W. Contrasting Climatic Controls on the Estimated Productivity of Global Terrestrial Biomes. **Ecosystems**, v. 1, n. 2, p. 206–215, 1998.
- COELHO, C. A. S.; CAVALCANTI, I. A. F.; COSTA, S. M. S.; FREITAS, S. R.; ITO, E. R.; LUZ, G.; SANTOS, A. F.; NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; PEZZA, A. B. Climate diagnostics of three major drought events in the Amazon and illustrations of their seasonal precipitation predictions. **Meteorological Applications**, v. 19, n. 2, p. 237–255, 2012.

COX, P. M.; BETTS, R. A.; COLLINS, M.; HARRIS, P. P.; HUNTINGFORD, C.; JONES, C. D. 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.

COX, P. M.; BETTS, R. A.; JONES, C. D.; SPALL, S. A.; TOTTERDELL, I. J. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model (vol 408, pg 184, 2000). **Nature**, v. 408, n. 6813, p. 750, 2000.

DIDAN, K. **MOD13C1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 0.05Deg CMG V006**. NASA EOSDIS Land Processes DAAC., , 2015.

DOUGHTY, C. E. *et al.* Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia. **Nature**, v. 519, n. 7541, p. 78–82, 2015.

ESPINOZA, J. C.; RONCHAIL, J.; GUYOT, J. L.; JUNQUAS, C.; VAUCHEL, P.; LAVADO, W.; DRAPEAU, G.; POMBOSA, R. Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 13, 2011.

FELDPAUSCH, T. R. *et al.* Global Biogeochemical Cycles. p. 1–19, 2016.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma Revisão Geral sobre o Clima da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 28, n. 2, p. 101–126, 1998.

FRIEDL, M. A.; SULLA-MENASHE, D.; TAN, B.; SCHNEIDER, A.; RAMANKUTTY, N.; SIBLEY, A.; HUANG, X. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 1, p. 168–182, 2010.

GHULAM, A.; QIN, Q.; ZHAN, Z. Designing of the perpendicular drought index. **Environmental Geology**, v. 52, n. 6, p. 1045–1052, 2007.

HEIM JR, R. R. A Review of Twentieth Century Drought Indices Used in the United States. **Bulletin of the American Meteorological Society**, n. August, p. 1149–1165, 2002.

HILKER, T.; LYAPUSTIN, A. I.; TUCKER, C. J.; HALL, F. G.; MYNENI, R. B.; WANG, Y.; BI, J.; MENDES DE MOURA, Y.; SELLERS, P. J. Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 45, p. 16041–16046, 2014.

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

HUETE, A.; JUSTICE, C.; LEEUWEN, W. . VAN. **MODIS VEGETATION INDEX ALGORITHM THEORETICAL BASIS**, 1999. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf>

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295–309, 1988.

HUETE, A. R.; JUSTICE, C.; LIU, H. Development of Vegetation and Soil Indexes for Modis-EOS. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, n. 3, p. 224–234, 1994.

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

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; WOLFF, D. B.; ADLER, R. F.; GU, G.; HONG, Y.; BOWMAN, K. P.; STOCKER, E. F. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 1, p. 38–55, 2007.

HUNTINGFORD, C. *et al.* Towards quantifying uncertainty in predictions of Amazon “dieback”. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1498, p. 1857–1864, 2008.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for policymakers. **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.**, p. 1–19, 2012.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** [s.l: s.n.].

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; MATTAR, C.; BARICHIVICH, J.; SANTAMARÍA-ARTIGAS, A.; TAKAHASHI, K.; MALHI, Y.; SOBRINO, J. A.; SCHRIER, G. VAN DER. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. **Scientific Reports**, v. 6, n. May, p. 33130, 2016.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; SOBRINO, J. A.; MATTAR, C.; MALHI, Y. Spatial and temporal patterns of the recent warming of the Amazon forest. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 118, n. 11, p. 5204–5215, 2013.

JULIEN, Y.; SOBRINO, J. A.; VERHOEF, W. Changes in land surface temperatures and NDVI values over Europe between 1982 and 1999. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, n. 1, p. 43–55, 2006.

KARNIELI, A.; AGAM, N.; PINKER, R. T.; ANDERSON, M.; IMHOFF, M. L.; GUTMAN, G. G.; PANOV, N.; GOLDBERG, A. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. **Journal of Climate**, v. 23, n. 3, p. 618–633, 2010.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 2, p. 261–270, 1992.

KOGAN, F. N. Droughts of the Late 1980s in the United States as Derived from NOAA Polar-Orbiting Satellite Data. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 76, n. 5, p. 655–668, 1995a.

_____. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. **Advances in Space Research**, v. 15, n. 11, p. 91–100, 1995b.

_____. Operational space technology for global vegetation assessment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, n. 9, p. 1949–1964, 2001.

- LAMBIN, E. F.; EHRLICH, D. The surface temperature-vegetation index space for land cover and land-cover change analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 3, 1996.
- LAZZARINI, M.; MARPU, P. R.; GHEDIRA, H. Temperature-land cover interactions: The inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas. **Remote Sensing of Environment**, v. 130, p. 136–152, 2013.
- LEWIS, S. L.; BRANDO, P. M.; PHILLIPS, O. L.; HEIJDEN, G. M. F. VAN DER; NEPSTAD, D. The 2010 Amazon drought. **Science (New York, N.Y.)**, v. 331, n. Ci, p. 554, 2011.
- LIU, K. N. **An Introduction to Atmospheric Radiation (Second Edition)**. [s.l: s.n.]. v. 84
- LIU, H. Q.; HUETE, A. Feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 2, p. 457–465, 1995.
- LYON, B. Southern Africa summer drought and heat waves: Observations and coupled model behavior. **Journal of Climate**, v. 22, n. 22, p. 6033–6046, 2009.
- MAEDA, E. E.; KIM, H.; ARAGÃO, L. E. O. C.; FAMIGLIETTI, J. S.; OKI, T. Disruption of hydroecological equilibrium in southwest Amazon mediated by drought. **Geophysical Research Letters**, v. 42, n. 18, p. 7546–7553, 2015.
- MAGRIN, G. O. *et al.* Central and South America In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, p. 1499–1566, 2014.
- MALHI, Y.; ROBERTS, J. T.; BETTS, R. A.; KILLEEN, T. J.; LI, W.; NOBRE, C. A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science (New York, N.Y.)**, v. 319, n. 5860, p. 169–72, 2008.
- MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033–1050, 2015.
- MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M. D.; OLIVEIRA, G. S. DE; OLIVEIRA, R. DE; CAMARGO, H.; ALVES, L. M.; BROWN, I. F. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21, n. 3, p. 495–516, 2008.
- MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 12, p. 1–5, 2011.
- MCVICAR, T. R.; BIERWIRTH, P. N. Rapidly assessing the 1997 drought in Papua New Guinea using composite AVHRR imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 11, p. 2109–2128, 2001.
- MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, v. 391, n. 1–2, p. 202–216, 2010.

- MORTON, D. C.; NAGOL, J.; CARABAJAL, C. C.; ROSETTE, J.; PALACE, M.; COOK, B. D.; VERMOTE, E. F.; HARDING, D. J.; NORTH, P. R. J. Amazon forests maintain consistent canopy structure and greenness during the dry season. **Nature**, v. 506, n. 7487, p. 1–16, 2014.
- MOURA, Y. M.; HILKER, T.; LYAPUSTIN, A. I.; GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. R. DOS; ANDERSON, L. O.; SOUSA, C. H. R. DE; ARAI, E. Seasonality and drought effects of Amazonian forests observed from multi-angle satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 171, p. 278–290, 2015.
- NEMANI, R. R.; KEELING, C. D.; HASHIMOTO, H.; JOLLY, W. M.; PIPER, S. C.; TUCKER, C. J.; MYNENI, R. B.; RUNNING, S. W. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. **Science (New York, N.Y.)**, v. 300, n. 5625, p. 1560–3, 2003.
- NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data. **Journal of Applied Meteorology**, v. 28, n. 4, 1989.
- PARIDA, B. R.; OINAM, B.; PATEL, N. R.; SHARMA, N.; KANDWAL, R.; HAZARIKA, M. K. Land surface temperature variation in relation to vegetation type using MODIS satellite data in Gujarat state of India. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 14, p. 4219–4235, 2008.
- PARK, S.; FEDDEMA, J. J.; EGBERT, S. L. Impacts of hydrologic soil properties on drought detection with MODIS thermal data. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, n. 1, p. 53–62, 2004.
- PETERS, A. J.; WALTERSHEA, E. A.; LEL JI, A. V.; HAYES, M.; SVOBODA, M. D. Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. **American Society for Photogrammetry and remote sensing**, v. 68, n. 1, p. 71–75, 2002.
- PHILLIPS, O. L. *et al.* Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. **Science**, v. 323, n. 5919, p. 1344–1347, 2009.
- RHEE, J.; IM, J.; CARBONE, G. J. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 12, p. 2875–2887, 2010.
- RIENECKER, M. M. *et al.* MERRA: NASA’s modern-era retrospective analysis for research and applications. **Journal of Climate**, v. 24, n. 14, p. 3624–3648, 2011.
- ROUSE JR, J.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTSNASA special publication**, 1974.
- RUNNING, S. W.; LOVELAND, T. R.; PIERCE, L. L.; NEMANI, R. R.; HUNT, E. R. A remote sensing based vegetation classification logic for global land cover analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n. 1, 1995.
- SALAZAR, L. F.; NOBRE, C. A.; OYAMA, M. D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 9, p. 2–7, 2007.

- SALESKA, S. R.; DIDAN, K.; HUETE, A. R.; ROCHA, H. R. DA. BREVIA Amazon Forests Green-Up During 2005 Drought. **Science**, v. 318, n. October, p. 2007–2007, 2007.
- SAMANTA, A.; GANGULY, S.; HASHIMOTO, H.; DEVADIGA, S.; VERMOTE, E.; KNYAZIKHIN, Y.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. Amazon forests did not green-up during the 2005 drought. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 5, p. 1–5, 2010.
- SUN, D.; KAFATOS, M. Note on the NDVI-LST relationship and the use of temperature-related drought indices over North America. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 24, p. 1–4, 2007.
- TOMASELLA, J.; BORMA, L. S.; MARENGO, J. A.; RODRIGUEZ, D. A.; CUARTAS, L. A.; NOBRE, C. A.; PRADO, M. C. R. The droughts of 1996-1997 and 2004-2005 in Amazonia: Hydrological response in the river main-stem. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 8, p. 1228–1242, 2010.
- TOOMEY, M.; ROBERTS, D. A.; STILL, C.; GOULDEN, M. L.; MCFADDEN, J. P. Remotely sensed heat anomalies linked with Amazonian forest biomass declines. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 19, p. 1–5, 2011.
- TUCKER, C. J.; SLAYBACK, D. A.; PINZON, J. E.; LOS, S. O.; MYNENI, R. B.; TAYLOR, M. G. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. **International Journal of Biometeorology**, v. 45, n. 4, p. 184–190, 2001.
- TUKEY, J. W. Exploratory data analysis. **Addison-Wesley Series in Behavioral Science: Quantitative Methods, Reading, Mass.: Addison-Wesley**, 1977.
- VERMOTE, E. F.; VERMEULEN, A. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). **ATBD version**, v. 4, n. April, p. 1–107, 1999.
- VICENTE-SERRANO, S. M. *et al.* Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 110, n. 1, p. 52–7, 2013.
- WAN, Z. New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 1, p. 59–74, 2008.
- WAN, Z.; WANG, P.; LI, X. Using MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. February 2015, p. 61–72, 2004.
- WILHITE, D. A. **Preparing for drought: A guidebook for developing countries**. [s.l.] Diane Publishing, 1994.
- WILKS, D. S. (DEPARTMENT OF E. AND A. S. C. U. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. [s.l: s.n.]. v. 14
- WMO. International Meteorological Vocabulary. **WMO Technical Publication No. 182**, p. 784, 1992.

WU, C.; CHEN, J. M.; DESAI, A. R.; HOLLINGER, D. Y.; ARAIN, M. A.; MARGOLIS, H. A.; GOUGH, C. M.; STAEBLER, R. M. Remote sensing of canopy light use efficiency in temperate and boreal forests of North America using MODIS imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 118, p. 60–72, 2012.

XU, L.; SAMANTA, A.; COSTA, M. H.; GANGULY, S.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 7, p. 2–5, 2011.

YOON, J. H.; ZENG, N. An Atlantic influence on Amazon rainfall. **Climate Dynamics**, v. 34, n. 2, p. 249–264, 2010.

ZARGAR, A.; SADIQ, R.; NASER, B.; KHAN, F. I. A review of drought indices. **Environmental Reviews**, v. 19, n. NA, p. 333–349, 2011.

ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. **Science**, v. 329, n. 5994, p. 940–943, 2010.