



EFEITO DA SECA NA VEGETAÇÃO COM SUPORTE DE SENSORIAMENTO  
REMOTO EM BIOMAS SITUADOS NO NORDESTE E NO SUDESTE DO BRASIL

Vitor Paiva Alcoforado Rebelo

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador(es): Otto Corrêa Rotunno Filho

Augusto César Vieira Getirana

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2019

EFEITO DA SECA NA VEGETAÇÃO COM SUPORTE DE  
SENSORIAMENTO REMOTO EM BIOMAS SITUADOS NO NORDESTE E NO  
SUDESTE DO BRASIL

Vitor Paiva Alcoforado Rebello

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho  
Augusto César Vieira Getirana

Aprovada por: Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho  
Dr. Augusto César Vieira Getirana  
Prof. Afonso Augusto Magalhães de Araujo  
Prof. Celso Bandeira de Melo Ribeiro  
Dr. Daniel Medeiros Moreira  
Prof. Daniel Andrés Rodriguez  
Prof. José Otavio Goulart Peclly

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
DEZEMBRO DE 2019

Rebello, Vitor Paiva Alcoforado

Efeito da Seca na Vegetação com Suporte de Sensoriamento Remoto em Biomas Situados no Nordeste e no Sudeste do Brasil/ Vitor Paiva Alcoforado Rebello. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XVII, 222p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Otto Corrêa Rotunno Filho

Augusto César Vieira Getirana

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 175-222.

1. Vegetação. 2. Seca. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Biomas do Brasil. I. Rotunno Filho, Otto Corrêa *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Aos meus pais,  
dedico.

## AGRADECIMENTOS

Expressar os agradecimentos por todos os responsáveis que tornaram a realização deste trabalho possível significa o meu mais profundo reconhecimento ao contingente de pessoas maravilhosas que pude encontrar ao longo da minha vida e que influenciaram direta ou indiretamente na construção do caminho que segui até o momento.

Gostaria de agradecer ao professor Otto Corrêa Rotunno Filho e ao Dr. Augusto César Vieira Getirana pela orientação, pelos conselhos e por mostrarem o caminho nos momentos em que parecia estar tudo perdido. Esses gestos foram essenciais para a realização desta pesquisa.

Gostaria de agradecer ao professor Dr. Venkat Lashimi pelo acolhimento da Universidade da Carolina do Sul, que me acolheu no período para realização de parte do programa de doutoramento no ano de 2016.

Torno público o meu muito obrigado a todos os funcionários, pesquisadores e professores do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Expresso minha gratidão a todos os profissionais de ensino, que mostraram ser diferenciados em suas carreiras, tanto no meu ensino de base quanto na minha vida acadêmica.

Agradeço extensivo é dirigido aos membros examinadores desta tese, que, com seus comentários e suas sugestões, contribuíram para o aperfeiçoamento do trabalho, tornando-o mais completo.

Agradeço especialmente aos meus colegas de laboratório, que compartilharam mais proximamente a jornada de elaboração desta tese. Quero deixar registrado, de forma extensiva, abrangente e calorosa, o profundo agradecimento aos meus amigos.

Agradecimento especial é dirigido ao CNPq, que proveu o suporte de uma bolsa de doutorado para a elaboração desta tese ao longo dos anos de 2013 a 2017, bem como apoio da CAPES – Código de Financiamento 001.

Agradecimentos extensivos são dirigidos às agências de fomento FAPERJ e CNPq, que, por meio de suporte aos projetos PEC/COPPE FAPERJ Edital 014/2010 (2010-2012) – Centro de Referência em Modelagem Ambiental Aplicado à Gestão de Bacias Hidrográficas Rurais e Urbanas – Apoio às instituições de pesquisa sediadas no estado do Rio de Janeiro, FAPERJ Cientista do Nosso Estado – Processo E-26/103.116/2011 (2012-2014) e FAPERJ – Pensa Rio – Edital 19/2011 (2012-2014) – E26/110.753/2012 e ao projeto FAPERJ – Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2021) – E-26/010.002980/2014, FAPERJ nº E\_12/2015 e FAPERJ nº E\_22/2016, bem como aos projetos CNPq Edital Universal No. 14/2013 – Processo 485136/2013-9, CNPq Edital Universal No. 28/2018 – Processo 435714/2018-0, CNPq Edital nº 12/2016 – Processo 306944/2016-2 e CNPq Edital nº 06/2019 – Processo 303846/2019-4, entre outros, que estimulam o avanço científico-tecnológico brasileiro na temática que abrange o escopo desta pesquisa.

A todos que, de forma indireta ou direta, contribuíram para a realização desta pesquisa.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

EFEITO DA SECA NA VEGETAÇÃO COM SUPORTE DE SENSORIAMENTO REMOTO EM BIOMAS SITUADOS NO NORDESTE E NO SUDESTE DO BRASIL

Vitor Paiva Alcoforado Rebello

Dezembro/2019

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho  
Augusto César Vieira Getirana

Programa: Engenharia Civil

O trabalho investiga o efeito da seca nas plantas via monitoramento da vegetação por sensoriamento remoto, envolvendo aspectos como sazonalidade, produtividade e fenologia. A região de estudo foi a porção leste do Brasil, onde se observou uma severa seca no período de 2013 a 2015, com enfoque sobretudo nos biomas de mata atlântica, cerrado, caatinga e porção da amazônia. O índice de vegetação NDVI, obtido do sensor MODIS, foi empregado no estudo do comportamento da vegetação. Adicionalmente, o estudo incorporou dados de modelos de superfície GLDAS, dados de reanálise, índices de seca e dados observados de redes de estação meteorológica para melhor compreensão do efeito climático sobre a vegetação. Análises mediante componentes principais e decomposição por valor singular apontaram para a capacidade preditiva de variáveis hidrológicas como precipitação, umidade do solo e evapotranspiração, nessa respectiva ordem, quanto a anomalias na vegetação. A caatinga mostrou-se como a região mais susceptível à seca e com maior potencial para predição de anomalias. Os parâmetros sazonais do NDVI, como amplitude, integral da curva, máximo anual e valor basal da curva do perfil de variação temporal do NDVI, foram sensíveis à severidade da seca, mas também dependente da duração total da seca e da sua persistência ao longo do tempo, mostrando que esses dois últimos fatores são relevantes na consideração do impacto do déficit hídrico na cobertura do solo.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DROUGHT EFFECTS ON VEGETATION WITH THE SUPPORT OF REMOTE SENSING IN SOME BIOMES IN NORTHEASTERN AND SOUTHEASTERN BRAZIL

Vitor Paiva Alcoforado Rebello

December/2019

Advisors: Otto Corrêa Rotunno Filho  
Augusto César Vieira Getirana

Department: Civil Engineering

The research work investigates the effect of drought on plants by monitoring vegetation based on remote sensing, involving aspects such as seasonality, productivity and phenology. The study region was the eastern portion of Brazil, where there was a severe drought from 2013 to 2015, mainly focusing on the biomes of atlantic forest, cerrado, caatinga and a portion of the Amazon forest. The vegetation index NDVI obtained with the MODIS sensor was employed. In addition, the study incorporated GLDAS surface model data, reanalysis data, drought indices and observed data from ground meteorological network of weather stations for improved comprehension with respect to climatic effect on vegetation. Evaluation by means of principal components and singular value decomposition pointed out to the impact of the behavior of hydrological variables such as precipitation, soil moisture and evapotranspiration, in that order, to predict vegetation anomalies. Caatinga revealed to be the most susceptible region to drought and with the highest potential for anomaly prediction. The NDVI seasonal parameters such as amplitude, integral curve, annual maximum and baseline profile curve of NDVI temporal variation were sensitive to drought severity, but also dependent on the total duration of drought and its temporal persistence, showing that these two last factors are relevant in considering the impact of water deficit on soil cover.

# SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Contexto e Justificativa da Pesquisa.....	3
1.3 Motivação.....	6
1.4 Objetivos.....	8
1.5 Estrutura do Texto.....	10
Capítulo 2 - Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica.....	13
2.1 Introdução.....	13
2.2 Tipos de Seca.....	18
2.2.1 Seca Meteorológica.....	18
2.2.2 Seca Agrícola.....	19
2.2.3 Seca Hidrológica.....	21
2.3 Índices de Seca.....	23
2.4 Sistemas de Monitoramento de Seca.....	26
2.5 Sensoriamento Remoto.....	29
2.5.1 Índices de Vegetação.....	35
2.5.2 MODIS ( <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i> ).....	37
2.5.3 Outros Produtos de Sensoriamento Remoto.....	42
2.6 Variabilidade Climática e a Dinâmica da Vegetação.....	44
2.6.1 Introdução.....	44
2.6.2 Influência de Fatores Climáticos na Vegetação.....	46
2.6.3 Influência da Fenologia da Vegetação no Clima.....	49
2.6.4 Monitoramento da Fenologia da Vegetação via Sensoriamento Remoto.....	51
2.6.4.1 Fenologia de Superfície.....	51
2.6.4.2 Métricas Fenológicas.....	52
2.7 Métodos de Avaliação de Seca.....	53
2.7.1 Curvas de Severidade-Frequência-Área.....	54
2.7.2 Persistência da Seca.....	58
Capítulo 3 – Metodologia.....	60
3.1 Considerações Gerais.....	60
3.2 Variabilidade Espaço-Temporal da Vegetação.....	62
3.2.1 Cálculo de Anomalias.....	63
3.2.2 Decomposição Matricial.....	63
3.3 Métricas Sazonais e Fenológicas da Vegetação.....	66
3.3.1 Filtro Savitzky-Golay.....	66
3.3.2 Função Logística Dupla.....	69
3.3.3 Extração das Métricas da Curva NDVI.....	71

3.4 Efeito da Disponibilidade Hídrica na Fenologia da Vegetação.....	74
3.4.1 Seleção de Pontos Amostrais NDVI.....	75
3.4.2 Classificação Climática.....	75
3.4.3 Alterações Fenológicas com Estatística Circular.....	77
3.4.3.1 Média Angular.....	77
3.4.3.2 Variância Angular.....	78
3.4.3.3 Teste de Rayleigh.....	78
3.4.3.4 Diferença Média Angular e Teste de Hipótese.....	79
3.4.3.5 Relação da Duração do Ciclo da Vegetação com o Clima.....	80
3.5 Efeito da Duração e Persistência da Seca na Sazonalidade da Vegetação.....	82
3.5.1 Duração da Seca.....	83
3.5.2 Persistência da Seca.....	84
Capítulo 4 - Região de Estudo – Nordeste e Sudeste do Brasil.....	86
4.1 Características das Regiões Nordeste e Sudeste.....	86
4.2 Biomas da Região.....	91
4.2.1 Caatinga.....	91
4.2.2 Mata Atlântica.....	92
4.2.3 Cerrado.....	94
4.2.4 Amazônia.....	96
4.3 Clima e as Secas na Região Leste do Brasil.....	97
4.3.1 Região Sudeste.....	97
4.3.2 Região Nordeste.....	100
Capítulo 5 - Banco de Dados – Nordeste e Sudeste do Brasil.....	103
5.1 Sensor MODIS.....	103
5.2 Forçantes Meteorológicas CRU.....	105
5.3 Modelo GLDAS-NOAH.....	105
5.4 Dados Temáticos do IBGE.....	106
5.5 Rede de Dados do INMET.....	106
Capítulo 6 – Variabilidade Espaço-Temporal e Sensibilidade Climática da Vegetação no Leste do Brasil.....	108
6.1 Introdução.....	109
6.2 Variação Espaço-Temporal da Vegetação no Leste do Brasil.....	112
6.3 Covariabilidade da Vegetação com Dados Hidrometeorológicos GLDAS.....	123
6.4 Considerações Finais.....	131
Capítulo 7 – Duração e Persistência da Seca e seus Efeitos na Vegetação na Região Semiárida do Brasil.....	133
7.1 Introdução.....	134
7.2 Efeito da Seca na Sazonalidade da Vegetação.....	136
7.3 Efeito da Persistência da Seca na Sazonalidade da Vegetação.....	150
7.4 Considerações Finais.....	154

Capítulo 8 – Fenologia da Vegetação e sua Relação com a Seca na Região da Caatinga.....	155
8.1 Introdução.....	156
8.2 Fenologia da Vegetação na Região da Caatinga.....	159
8.3 Variações Fenológicas em Função da Disponibilidade Hídrica.....	160
8.4 Influência Climática do Ciclo de Crescimento da Vegetação.....	164
8.5 Considerações Finais.....	167
Capítulo 9 - Conclusões e Recomendações.....	168
9.1 Conclusões.....	169
9.2 Recomendações.....	171
9.3 Síntese final.....	173
Referências Bibliográficas.....	175

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1</b>	Direção de propagação da radiação eletromagnética na forma de uma onda, em função das oscilações ortogonais dos campos magnético (M) e elétrico (E). Fonte: adaptado de Meneses e Almeida (2012)	<b>31</b>
<b>Figura 2.2</b>	Comportamento espectral de um alvo de vegetação e principais fatores que influenciam na reflectância (pigmentos foliares, estrutura celular, conteúdo de água), considerando as diferentes regiões espectrais do sensoriamento remoto passivo (visível, infravermelho próximo – NIR e infravermelho de ondas curtas – SWIR) entre 350 nm e 2.500 nm. Fonte: adaptado de Formaggio e Sanches (2017).	<b>33</b>
<b>Figura 2.3</b>	Imagem global NDVI do sensor MODIS a bordo do satélite Terra de dezembro de 2007. Uma maior intensidade da cor verde indica um aumento da densidade da cobertura vegetal, enquanto uma maior intensidade da cor bege indica uma maior exposição do solo.	<b>38</b>
<b>Figura 2.4</b>	Curvas severidade-frequência-área para cada período de retorno e para os anos de seca severa, 2012-2013, 2013-2014 e 2013-2014, para as regiões nordeste e sudeste e os índices SPI e SPEI.	<b>57</b>
<b>Figura 3.1</b>	Fluxograma geral da metodologia da tese.	<b>61</b>
<b>Figura 3.2</b>	Fluxograma de análise da variabilidade espaço temporal da vegetação usando NDVI e GLDAS por meio de análise de componentes principais (ACP) e decomposição matricial (DVS), incluindo procedimentos de cálculo de anomalia e testes de estacionaridade (Petit e Hubert).	<b>65</b>
<b>Figura 3.3</b>	Aplicação do filtro Savitzky-Golay (SG), janela temporal de 12 (doze) meses e grau de polinômio 2 (dois), para suavização e remoção de ruídos em uma amostra de série temporal NDVI do sensor MODIS para a região de estudo.	<b>68</b>
<b>Figura 3.4</b>	Ajuste da função logística dupla a um ciclo anual NDVI com erro médio quadrático de 0,0017.	<b>71</b>
<b>Figura 3.5</b>	Parâmetros da vegetação extraídos da curva NDVI; métricas fenológicas: (a) início do ciclo de crescimento; (b) fim do ciclo de crescimento; e (c) duração do ciclo de crescimento; métricas sazonais: (d) valor basal; (e) pico do ciclo de crescimento (f); amplitude (g); e (h) integral da curva NDVI. Fonte: Eklundh e Jönsson (2012).	<b>72</b>
<b>Figura 3.6</b>	Fluxograma da metodologia de extração de parâmetros sazonais e fenológicos das séries temporais NDVI.	<b>73</b>
<b>Figura 3.7</b>	Fluxograma da comparação de métricas fenológicas das séries NDVI e sua relação com o clima da região nordeste (NE).	<b>81</b>
<b>Figura 3.8</b>	Fluxograma da comparação de métricas sazonais NDVI e sua relação com a persistência da seca na região nordeste (NE).	<b>85</b>
<b>Figura 4.1</b>	Regiões administrativas e biomas na porção leste do Brasil de acordo com a classificação do IBGE.	<b>87</b>

<b>Figura 4.2</b>	Esquerda: região NE e delimitação de cada bioma. Direita: Índice de Aridez (IA) para a região NE. Região sub-húmida ( $IA > 0,65$ , região marrom), região sub-húmida ( $0,51 > IA > 0,65$ , região amarela) e semiárida ( $IA < 0,5$ , região azul) de acordo com Vieira et al. (2015).	<b>89</b>
<b>Figura 4.3</b>	Foto do bioma caatinga. Fonte: Cláudia Márcia Borges, distribuído sob a licença de Creative Commons; consultado no dia 7 de abril de 2020 em <a href="https://commons.wikimedia.org">https://commons.wikimedia.org</a> .	<b>92</b>
<b>Figura 4.4</b>	Foto do bioma mata atlântica. Fonte: Bjørn Christian Tørrissen, distribuído sob a licença de Creative Commons; consultado no dia 7 de abril de 2020 em <a href="https://commons.wikimedia.org">https://commons.wikimedia.org</a> .	<b>93</b>
<b>Figura 4.5</b>	Foto do bioma cerrado. Fonte: Jean Fábio Torres Rodrigues e distribuído sob a licença de Creative Commons; consultado no dia 7 de abril de 2020 em <a href="https://commons.wikimedia.org">https://commons.wikimedia.org</a> .	<b>95</b>
<b>Figura 4.6</b>	Foto do ecótono mata dos cocais. Fonte: Rafael Drake, distribuído sob a licença de Creative Commons; consultado o dia 7 de abril de 2020 em <a href="https://commons.wikimedia.org">https://commons.wikimedia.org</a> .	<b>96</b>
<b>Figura 5.1</b>	Localização e código das estações meteorológicas selecionadas da rede de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).	<b>107</b>
<b>Figura 6.1</b>	Distribuição espacial de NDVI e variáveis GLDAS - precipitação, umidade do solo e evapotranspiração.	<b>113</b>
<b>Figura 6.2</b>	Séries temporais de anomalias de NDVI e GLDAS - precipitação, umidade do solo e evapotranspiração nas regiões nordeste (NE) e sudeste (SE) do Brasil.	<b>114</b>
<b>Figura 6.3</b>	Variância explicada, em vermelho, e significância das componentes pelo teste Bartlett, em azul.	<b>118</b>
<b>Figura 6.4</b>	Primeiro e segundo modo FEO NDVI e seus respectivos coeficientes de expansão – período de 2000 a 2015.	<b>119</b>
<b>Figura 6.5</b>	Terceiro e quarto modo FEO NDVI e seus respectivos coeficientes de expansão bem como os resultados para os testes de Pettitt (verde) e Hubert (vermelho).	<b>120</b>
<b>Figura 6.6</b>	Peso de cada componente principal para NDVI, precipitação, umidade do solo e evapotranspiração para cada região; região de 1 a 4 – mata atlântica (1), caatinga (2), cerrado (3) e amazônia (4).	<b>124</b>
<b>Figura 6.7</b>	Primeiro, segundo e terceiro modo pelo modo DVS, com NDVI (esquerda) e precipitação (direita), e seus respectivos coeficientes de expansão.	<b>127</b>
<b>Figura 6.8</b>	Primeiro, segundo e terceiro modo pelo procedimento DVS, com NDVI (esquerda) e umidade do solo (direita), e seus respectivos coeficientes de expansão.	<b>128</b>
<b>Figura 6.9</b>	Primeiro, segundo e terceiro modo pelo procedimento DVS, com NDVI (esquerda) e evapotranspiração (direita), e seus respectivos coeficientes de expansão.	<b>129</b>
<b>Figura 7.1</b>	Séries temporais SPEI para cada bioma, com destaque para o período de seca (2011-2013).	<b>138</b>
<b>Figura 7.2</b>	Mapas acumulativos de SPEI para valores inferiores a -0,5 para 0 a 12 meses (período 2011-2015).	<b>139</b>

<b>Figura 7.3</b>	Mapas cumulativos anomalias de amplitude NDVI (AMP), valor base (BSV), valor máximo (MAX) e integração curta (SIN) para o período de 2011 a 2015.	<b>142</b>
<b>Figura 7.4</b>	Gráficos de dispersão para as anomalias de amplitude NDVI (AMP), valor base (BSV), valor máximo (MAX) e integração curta (SIN) nos biomas de mata atlântica (ATL), Amazônia (AMZ), caatinga (CAT) e cerrado (CRD) para o período de 2011 a 2015.	<b>144</b>
<b>Figura 7.5</b>	Correlação linear para AMP, BSV, MAX e SIN com SPEI cumulativo (linha superior) e valores de significância (linha inferior), $p < 0,1$ . O limite da região semiárida também é exibido no centro do mapa.	<b>145</b>
<b>Figura 7.6</b>	Transectos da latitude para os parâmetros sazonais AMP, BSV, MAX e SIN associados a cada bioma – ATL, CAT, CRD e AMZ no período de 2000 a 2015.	<b>148</b>
<b>Figura 7.7</b>	Transectos da longitude para os parâmetros sazonais AMP, BSV, MAX e SIN associados a cada bioma – ATL, CAT, CRD e AMZ no período de 2000 a 2015.	<b>149</b>
<b>Figura 7.8</b>	Mapas da classe de persistência, sem seca (SS), seca não persistente (SNP) e seca persistente (SP).	<b>152</b>
<b>Figura 7.9</b>	Valores médios de BSV, AMP, MAX e SIN para cada classe de persistência sem seca (SS), seca não persistente (SNP) e seca persistente (SP).	<b>152</b>
<b>Figura 8.1</b>	Média e variância angular (dias julianos) para o início do ciclo de crescimento (ICC), pico do ciclo de crescimento (PCC) e o final do ciclo de crescimento (FCC).	<b>160</b>
<b>Figura 8.2</b>	Diferença da média angular entre o período úmido e seco para cada fase fenológica da vegetação: início do ciclo de crescimento (ICC); pico do ciclo de crescimento (PCC) e fim do ciclo de crescimento (FCC).	<b>161</b>
<b>Figura 8.3</b>	Gráfico de dispersão da diferença da média angular e da diferença do desvio padrão entre o período seco e período úmido para cada fase fenológica da vegetação: início do ciclo de crescimento (ICC); pico do ciclo de crescimento (PCC) e fim do ciclo de crescimento (FCC).	<b>163</b>
<b>Figura 8.4</b>	Resultado do teste de Watson de homogeneidade para duas amostras para cada fase fenológica da vegetação: vermelho - não significativo; azul – $0,05 < p < 0,1$ ; verde – $0,01 < p < 0,05$ ; e amarelo - $0,001 < p < 0,01$ . Os pontos selecionados para correlação da fenologia com clima estão identificados no mapa por nível de identificação (NI) de 1 a 8.	<b>164</b>
<b>Figura 8.5</b>	Gráfico de dispersão entre precipitação (mm) e temperatura anual ( $^{\circ}\text{C}$ ) com a duração do ciclo de crescimento (DCC).	<b>166</b>

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 6.1</b>	Coeficiente angular de séries anuais de NDVI para as regiões nordeste (NE) e sudeste (SE) do Brasil.	<b>116</b>
<b>Tabela 7.1</b>	Percentual da área para cada classe de persistência, sem seca (SS), seca persistente (SP) e seca não persistente (SNP) para cada cobertura vegetal.	<b>153</b>

## Lista de Abreviaturas e Siglas

<b>AVHRR</b>	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
<b>ACP</b>	Análise de Componentes Principais
<b>AMZ</b>	Bioma amazônia
<b>ATL</b>	Bioma mata atlântica
<b>CAT</b>	Bioma caatinga
<b>CRD</b>	Bioma cerrado
<b>DVS</b>	Decomposição por Valor Singular
<b>DCC</b>	Duração do Ciclo de Crescimento
<b>FEO</b>	Funções Empíricas Ortogonais
<b>FCC</b>	Fim do Ciclo de Crescimento
<b>GLDAS</b>	<i>Global Land Data Assimilation System</i>
<b>GRACE</b>	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>
<b>IA</b>	Índice de Aridez
<b>IAF</b>	Índice de Área Foliar
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia Estatística
<b>ICC</b>	Índice do Ciclo de Crescimento
<b>IGBP</b>	<i>International Geosphere Biosphere Programme</i>
<b>INMET I</b>	Instituto Nacional de Meteorologia
<b>ISE</b>	Índice de Estresse Evaporativo
<b>NDVI</b>	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
<b>NE</b>	Região Nordeste
<b>PCC</b>	Pico do Ciclo de Crescimento
<b>PPL</b>	Produção Primária Líquida

<b>PPB</b>	Produção Primária Bruta
<b>SAF</b>	Curva de Severidade Área Frequência
<b>SE</b>	Região Sudeste
<b>SG</b>	Filtro <i>Savitzky-Golay</i>
<b>SPI</b>	<i>Standardized Precipitation Index</i>
<b>SPEI</b>	<i>Standardized Precipitation Evapotranspiration Index</i>
<b>TSM</b>	Temperatura da Superfície do Mar
<b>MODIS</b>	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>

# Capítulo 1 – Introdução

## 1.1 Considerações Iniciais

As mudanças climáticas ameaçam o funcionamento dos ecossistemas e alterações decorrentes terão grande impacto na nossa sociedade. As atividades humanas, por sua vez, contribuem com essas alterações pelas mudanças físicas na paisagem física as quais refletem no clima e nos mecanismos de interação entre a superfície terrestre e a atmosfera. A necessidade de incluir os processos biológicos em modelos climáticos é uma demanda recente e advém da necessidade de melhor representar as interações entre biosfera e clima e logo melhor prever os impactos da atividade humana na superfície terrestre, tanto ecológicos quanto climáticos (Heavens *et al.*, 2013). A cobertura vegetal e a sua distribuição são elementos-chaves para melhor compreender esse fenômeno e entender os impactos das mudanças climáticas. Aperfeiçoar a compreensão sobre os fatores responsáveis por essas mudanças é fundamental para aumentar a confiança dos modelos computacionais do sistema terrestre em projeções para futuro.

Com o suporte de revelações da comunidade científica, os desafios impostos à sociedade pelas mudanças, ou até mesmo por uma incerteza quanto à sua própria variabilidade, passa sobretudo pela tomada de decisão por atores sociais de diferentes setores em relação à alocação de recursos. Com um cenário de mudanças climáticas mais próximas e com evidências científicas mais robustas, a complexidade da tarefa tende a crescer, tornando a decisão pública ainda mais relevante. A vulnerabilidade dos ecossistemas naturais ao clima não é totalmente conhecida, e a influência antrópica nos processos naturais é, geralmente, mal valorada pela sociedade (Abbot *et al.*, 2019).

Os efeitos das mudanças climáticas sob os biomas terrestres já são parcialmente conhecidos (Pounds *et al.*, 1999; Parmesan e Yohe, 2003; Root *et al.*, 2003). Os sinais mais evidentes nos biomas afetados estão associados à funcionalidade do ecossistema em que ocorre alteração de processos tais como de produção e de decomposição dos fotoassimilados (Hooper *et al.*, 20012) Conseqüentemente, alterações na cobertura vegetal refletem-se nas interações entre a superfície e a atmosfera, como os fluxos de energia, água e carbono. Entretanto, no longo prazo, os efeitos persistentes das mudanças climáticas sugerem alterações graduais silenciosas nos biomas, os quais podem levar a alterações na distribuição das espécies, na sua abundância e até mesmo na sua extinção (Root *et al.*, 2003). Resultados de projeções do clima apoiados por modelos estatísticos revelam uma perda significativa de biodiversidade até no cenário de menor aquecimento global (Thomas *et al.*, 2004). Há pouco consenso a respeito da qualidade e do delineamento de experimentos que revelem respostas dos ecossistemas às mudanças climáticas (Rineau *et al.*, 2019). Um acompanhamento global das espécies nativas, apesar de crítico, é de difícil execução. Logo, para monitorar a distribuição e a abundância de espécies nos diferentes biomas terrestres com cobertura de extensas áreas, é necessário o desenvolvimento e a aplicação de ferramentas e tecnologias de sensoriamento remoto.

De acordo com o Stern e Easterling (1999), a sociedade organiza-se para minimizar os impactos do clima sob a perspectiva dos diferentes setores que a integram. No entanto, tendo em vista que as conseqüências das mudanças climática nos biomas não são fáceis de serem mensuradas, é necessário recorrer ao que o autor denomina de variável biofísica de interesse. Assim, o ponto de partida seria definir, para cada setor, a relação entre a variável climática em questão, ou o conjunto delas, e o impacto na variável biofísica de interesse social. O monitoramento remoto de ecossistemas

terrestres por imagens de satélite é feito há décadas e representa uma importante ferramenta da comunidade científica para mensurar as consequências de mudanças no clima. Na medida em que as séries temporais dessas imagens prolongam-se, é igualmente possível estimar o efeito das mudanças climáticas nas diferentes coberturas vegetais que recobrem o globo terrestre. Quando bem compreendidas, as relações de causa e efeito entre clima e ecossistemas permitem antecipar mudanças ecológicas por meio de simulações assim como possibilitam realizar previsões. Portanto, seguindo essa abordagem, um programa local de monitoramento de biomas por dados satelitais pode permitir prever a seleção das variáveis climáticas que melhor descrevam o comportamento das variáveis biofísicas de resposta, representadas pelos dados de sensoriamento remoto.

## **1.2 Contexto e Justificativa da Pesquisa**

A mudança climática sujeita os diferentes ecossistemas terrestres a perdas consideráveis e preocupa a comunidade científica em relação à funcionalidade de comunidades de plantas que, por sua vez, afetam a biodiversidade e a conservação das espécies. Um risco maior quanto a mudanças na biodiversidade é evidente devido à incapacidade de existir um sistema internacional de observação de mudanças na biodiversidade, o que dificulta um acompanhamento global de mudanças climáticas e seus efeitos nos ecossistemas terrestres. Tendo em vista essa deficiência, surge o conceito de variáveis essenciais para a biodiversidade apresentado por Pereira *et al.* (2013). A partir de um esforço internacional, foram categorizados potenciais indicadores para estudar, reportar e manejar mudanças na biodiversidade que pudessem ter uma abrangência global.

Dentre as variáveis apresentadas, duas delas em especial dependem da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto. São elas: (1) características ecossistêmicas funcionais, como a fenologia da vegetação; e (2) características ecossistêmicas estruturais, como a cobertura e a biomassa vegetal. No entanto, não é possível uma aplicação direta dos produtos de sensoriamento remoto no monitoramento das variáveis essenciais de biodiversidade. Para Pettorelli *et al.* (2016), deve-se considerar o potencial individual de cada produto para monitorar individualmente cada componentes da biodiversidade, bem como esse produto servirá como indicador de biodiversidade e, por fim, como esse bioindicador permitirá prever mudanças futuras na biodiversidade.

Apesar da pertinente definição de variáveis de biodiversidade essenciais em um contexto de mudanças climáticas, ainda há pouca clareza metodológica sobre quais variáveis climáticas exercem influência em mudanças de longo prazo, assim como incorporá-las em novos indicadores. Portanto, o desenvolvimento de novas tecnologias que integrem novos algoritmos ou técnicas computacionais associadas a uma ampla gama de sensores orbitais e dados climáticos observados e modelados é de grande contribuição para um entendimento global do efeito das mudanças climáticas na biosfera.

Uma das resultantes da variabilidade e da incerteza climática é a ocorrência de longos períodos de seca ameaçando o desenvolvimento e ciclo fenológico das plantas. Uma das preocupações em relação às secas, do ponto de vista ecológico, é que essas potencializam mudanças na composição e na estrutura dos ecossistemas vegetais ameaçando a diversidade de espécies em diferentes biomas (Choat *et al.*, 2012; Clark *et al.*, 2016). Secas no Brasil são frequentes e preocupam diversos setores nas mais variadas regiões. De modo geral, secas curtas e moderadas são abrangentes ao passo que

eventos de secas longas e severas são desuniformes no território nacional (Awange *et al.*, 2016). Portanto, há de se considerar o efeito dessa variabilidade espaço-temporal previamente aos estudos de inter-relação entre seca e funcionamento dos diferentes ecossistemas naturais brasileiros.

Em regiões tropicais, as quais abrangem grande parte do território nacional, o crescimento vegetal está, principalmente, mais sujeito a disponibilidade hídrica e menos em relação a restrições de origem energética, como a temperatura e a radiação solar, o que oferece maior protagonismo aos componentes do balanço hídrico para predizer as variações sazonais na vegetação decorrente de secas (Nemani *et al.*, 2003). Portanto, partindo da disponibilidade hídrica, pretende-se estabelecer os efeitos da seca em diferentes parâmetros da vegetação, que, seguindo os pontos abordados por Pereira *et al.* (2013), reflita os componentes de constituição da vegetação, que podem ser exemplificados pela biomassa, e os de caráter funcional, tal como a fenologia.

### 1.3 Motivação

De acordo com Byun e Wilhite (1999), os estudos de seca podem ser enquadrados em diferentes categorias, envolvendo os aspectos meteorológicos sobre as causas da seca, a compreensão acerca da frequência e da severidade da seca, a descrição dos impactos da seca na superfície terrestre ou as estratégias de mitigação e redução dos impactos associados à seca.

A categoria escolhida, para este trabalho, é aquela que se dedica a compreender os impactos da seca. Mais especificamente, optou-se por compreender os impactos da seca na cobertura vegetal da superfície terrestre. A importância de compreender esses efeitos deve-se, sobretudo, ao monitoramento da vegetação. Por exemplo, uma maneira eficiente de acompanhar o estado hídrico da vegetação é através de índices derivados de sensoriamento remoto, que permitem uma análise sobre diferentes biomas (Bailing *et al.*, 2018) e refletem uma medição indireta das reais condições de umidade do solo (Quiring e Ganesh 2010). Esses índices são importantes para permitir que tomadores de decisão acompanhem o estado atual da vegetação durante um evento de seca (El-Vilaly *et al.*, 2017).

Um dos efeitos de restrições hídricas na cobertura vegetal é a redução na produção de biomassa na superfície. A quantificação em larga escala da biomassa vegetal é mais eficiente e viável via modelos de superfície do que observações *in situ*. Entretanto, experimentos revelam que esses modelos tendem a subestimar a produção total de biomassa em resposta à seca (Powell *et al.*, 2013). Torna-se necessária a integração de dados modelados com observações adquiridas por sensoriamento remoto para correta quantificação e tendência da produção vegetal.

A seca, além dos seus impactos nos diferentes biomas que compõem a superfície terrestre, notadamente na produção de biomassa das plantas e nos ciclos biogeoquímicos, pode igualmente alterar o ciclo fenológico da vegetação o que produzirá reflexos no clima global (Dahlin *et al.*, 2017). A variabilidade da fenologia em ambientes áridos é induzida primordialmente pela precipitação e guarda forte correlação com índices climáticos. Os desvios na fenologia podem vir a superar o período de um mês (Broich *et al.*, 2014). Logo, a informação climática pode antecipar a duração e o início do ciclo de crescimento vegetativo onde a produção vegetal é mais sensível à seca (Brown *et al.*, 2010). Por outro lado, a heterogeneidade da composição de plantas, formada por plantas lenhosas e gramíneas, cada uma com um padrão fenológico distinto, impõem um desafio ao seu monitoramento e predição (Archibald e Scholes, 2007).

Pretende-se contribuir para essa categoria de estudo explorando os impactos diretos quantitativos e qualitativos da seca em uma parcela representativa da vegetação brasileira. Aprimorar essa linha de pesquisa pode auxiliar o desenvolvimento de estratégias de mitigação e redução dos impactos associados à seca bem como aprimorar os subsídios para a modelagem eco-hidrológica.

A inspiração inicial desta tese partiu da investigação de Getirana (2016). O autor quantificou o impacto em larga escala de uma seca que ocorreu sobre o leste do Brasil, tendo gerado uma perda severa de água na superfície entre 2012 e 2015. A análise espaço-temporal da seca foi conduzida utilizando anomalias no armazenamento de água terrestre derivadas da missão *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) (Tapley *et al.*, 2004) e de dados complementares do *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS) (Rodell *et al.*, 2004). Os resultados do autor revelaram que uma redução na precipitação foi o principal fator responsável pelo desencadeamento da seca

durante o período de 2012-2014, afetando, em especial, as regiões nordeste e sudeste do país, constatação confirmada pelos trabalhos de Campos (2015) e de Awange *et al.* (2016). Até 2015, o período mais drástico da seca foi observado no verão austral de 2014 na região sudeste do país, quando as taxas de precipitação ficaram entre 60 e 70% abaixo dos níveis normais, principalmente na região de São Paulo (Nobre *et al.*, 2016). A seca persistiu, mas com menor intensidade, até 2015, espalhando-se para a porção norte da região do sudeste. Já a seca na porção nordeste do país começou em 2012 e ocorreu ao mesmo tempo em que um evento de inundação na amazônia.

## **1.4 Objetivos**

A presente pesquisa tem como principal objetivo avaliar diferentes técnicas para quantificação e parametrização dos efeitos da seca na vegetação mediante o emprego de dados de sensoriamento remoto na área delimitada pelas regiões nordeste e sudeste do Brasil. Em um cenário de mudanças climáticas com maior ocorrência de secas, é vantajoso prever o efeito regional da seca envolvendo diferentes biomas a fim de classificá-los quanto à susceptibilidade no que concerne a tal fenômeno. Para tanto, coletaram-se dados do índice de vegetação por diferença normalizada NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) do sensor MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*). Foram divididos em dados diretos de NDVI e métricas derivadas dos sinais da variação do NDVI. Assim, informações acerca do estado da vegetação frente a eventos de seca e sobre a disponibilidade hídrica foram levantadas. Diferentes fontes de dados climáticos foram selecionadas para acompanhar as variações das séries temporais do NDVI em períodos de secas de diferentes intensidades.

Para alcançar o objetivo proposto, foram estabelecidas as seguintes etapas:

1. caracterizar a variabilidade espaço-temporal da vegetação por meio de séries temporais NDVI e de sua covariabilidade com séries temporais de dados hidrometeorológicos;
2. identificar a influência da duração e da persistência da seca em métricas sazonais das séries temporais NDVI;
3. analisar mudanças temporais em fases fenológicas por métricas derivadas de séries temporais NDVI em função da disponibilidade hídrica.

Diante do quadro de diretrizes para elaboração da tese, de forma a atender o objetivo geral e os desdobramentos em seus objetivos específicos, concebeu-se uma estrutura de abordagem metodológica que abrange o tratamento, para as regiões do leste do Brasil, aqui subdivididas no nordeste e no sudeste, de diferentes aspectos de diferenciação quanto ao comportamento da vegetação através do seu índice espectral NDVI. A revisão bibliográfica do tema apresenta o conceito de seca e seus efeitos na vegetação, bem como explora a diretriz temática proposta sob o prisma do monitoramento via dados de sensoriamento remoto. Cada tratamento aplicado ao índice de vegetação para detecção do impacto do déficit hídrico foi descrito, implementado e avaliado. Ao final, os resultados apresentam a especificidade da resposta de cada bioma na região nordeste e sudeste do Brasil quanto às características dos eventos de seca.

Na sequência do texto, apresenta-se o escopo do conteúdo tratado na pesquisa com o detalhamento de sua organização e estrutura.

## 1.5 Estrutura do Texto

O Capítulo 1 propõe a formulação do problema sobre o impacto da seca na vegetação das regiões nordeste e sudeste do Brasil, com a discussão sobre o contexto do tema no estado da arte da literatura nacional e internacional, mostrando a sua importância e delimitando os objetivos e metas da pesquisa.

No Capítulo 2, expõe-se, de maneira detalhada e ampliada, a fundamentação teórica e a revisão bibliográfica. Sob essa perspectiva, discutem-se assuntos relacionados com o conceito da seca, seus diferentes tipos e sua representação por meio de índices. É descrito o papel do sensoriamento remoto no monitoramento e no acompanhamento da seca, os seus princípios físicos e quais mecanismos permitem avaliar o estado hídrico da vegetação. Em seguida, é abordada a relação entre as variáveis biofísicas da vegetação e o clima, sobretudo o comportamento durante períodos de seca. As bases conceituais relacionadas à sazonalidade e à fenologia da vegetação, que serão empregadas na metodologia, são igualmente apresentadas. Busca-se, ainda, descrever a magnitude da seca de 2011 a 2015 que incidiu sobre a região leste do Brasil por meio de procedimento que examine as curvas de severidade-frequência-área (SFA). Na tese, o procedimento consiste no primeiro ensaio de apresentar o evento de seca, objeto de pesquisa do presente estudo, permitindo apresentar resultados do índice padronizado precipitação evapotranspiração potencial (*Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*) (SPEI), que vem a compor, portanto, parte da abordagem metodológica proposta para o desenvolvimento da pesquisa.

Mais especificamente, a metodologia proposta será objeto do Capítulo 3, iniciando-se por uma exposição da visão geral do estudo e dos blocos de análise e

desenvolvimento da pesquisa. A primeira parte explora os procedimentos a serem adotados para caracterização espaço-temporal da seca quanto aos padrões da vegetação e de variáveis hidroclimáticas tanto separadamente quanto em termos de suas inter-relações e covariabilidade. A segunda parte propõe-se a mostrar as etapas de análise da curva do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), que podem ser decompostas em (1) filtragem inicial dos dados, (2) ajuste de uma função à curva do índice de vegetação e (3) extração de parâmetros sazonais e de métricas fenológicas. Obtidos os parâmetros sazonais e fenológicos, perfaz-se a comparação com os diferentes padrões de seca.

A caracterização da região de estudo consta do Capítulo 4. A região de estudo, com suas regiões administrativas, biomas e regimes climáticos, é apresentada por meio de mapas na introdução do capítulo. Após essa introdução, uma breve descrição socioeconômica de cada região é apresentada. Então, cada um dos biomas presente na região, incluindo suas respectivas peculiaridades, é descrito. Ao final do capítulo, há uma sucinta descrição do clima e dos principais mecanismos de formação de chuva para cada região.

A lista dos dados empregados, nesta tese, é encontrada no Capítulo 5. Nesse capítulo, será especificada a natureza do dado, resolução temporal e espacial, instituição originária e período amostrado. Quanto à sua natureza, empregaram-se dados de sensores ópticos, dados observados e de reanálise e modelos hidrometeorológicos.

Os três capítulos subsequentes dedicam-se a expor com detalhes os resultados encontrados na presente tese. No Capítulo 6, são ilustrados e discutidos os padrões espaço-temporais da vegetação e de sua covariabilidade com dados hidroclimáticos para a região leste do Brasil durante a seca de 2011 a 2015. Os resultados são confrontados

com pesquisas anteriores envolvendo o clima da região e cada um de seus biomas. No Capítulo 7, volta-se a atenção para a região nordeste e para o período crítico da referida seca. O padrão espacial da duração e da persistência da seca é comparado com parâmetros sazonais do índice de vegetação. No Capítulo 8, o padrão fenológico do índice de vegetação é correlacionado com o clima da região nordeste. Nesse capítulo, em particular, além de se avaliar o padrão de variação fenológica em anos secos e úmidos, empregaram-se técnicas de estatística circular para identificar sítios com possíveis alterações no padrão fenológico da vegetação.

Por fim, o Capítulo 9 sumariza as conclusões fundamentadas na pesquisa desenvolvida, apontando recomendações para futuras pesquisas. Encerra-se o documento com a discriminação das referências bibliográficas empregadas no trabalho.

## Capítulo 2 - Fundamentação Teórica e Revisão

### Bibliográfica

#### 2.1 Introdução

A seca é considerada um desastre natural que afeta a maioria das pessoas ao redor do globo. É um evento climático extremo recorrente que afeta desde regiões úmidas sub-húmidas ao redor do globo. Estudos recentes alertam para o aumento da frequência de seca pelos efeitos das mudanças climáticas observando-se diferentes variáveis hidrometeorológicas em várias regiões do globo (Mishra e Singh, 2011). Esse quadro posto, trabalhos sobre o tema devem focar os impactos da seca levando-se em conta múltiplos fatores climáticos.

A seca é intrinsecamente um fenômeno complexo, implicando considerar múltiplas variáveis e escalas. Na ausência de uma definição precisa e objetiva, torna-se uma tarefa difícil quantificar seu impacto social e conseqüente mitigação (Wilhite, 1993). No entanto, em um sentido amplo, pode-se afirmar que a seca está associada à escassez de água em relação a diferentes demandas hídricas. Portanto, considerando o contexto da oferta e da demanda hídrica, a seca é tradicionalmente classificada em seca meteorológica, hidrológica ou agrícola (Dracup *et al.*, 1980).

O início da seca ocorre logo após um período de déficit de precipitação em relação às normais climatológicas. Pela classificação acima, esse é o principal foco da seca meteorológica. Para esse tipo de seca, tem-se que definir um limiar para assumir uma ocorrência de seca quando os níveis mais baixos são registrados. A seca agrícola,

por sua vez, como está atrelada à produção vegetal, associa-se ao déficit no teor de umidade do solo mínimo exigido para suportar plenamente o desenvolvimento das culturas durante um determinado mês. A seca hidrológica é aquela que reflete as anomalias negativas das águas superficiais, notadamente quanto ao armazenamento de superfície e quanto ao fluxo de água em rios. Há, ainda, um quarto tipo de seca, a seca sociológica, cujo conceito é mais amplo e difuso. Resulta dos efeitos das secas meteorológicas, agrícolas e hidrológicas no que tange às demandas de água humana e ecológica.

Além da tradicional classificação examinada previamente, pode-se analisar a seca observando-se o ciclo hidrológico e o seu efeito acumulativo nos componentes do ciclo. Mais precisamente, são eles: a precipitação, a umidade do solo e os fluxos de água atmosféricos e superficiais. Os componentes estão fortemente correlacionados entre si, e, quando ocorre a seca, seus efeitos proporcionam um desdobramento em cadeia (Dracup *et al.*, 1980). Primeiro, o déficit na precipitação é o passo inicial que desencadeia o início da seca. As mudanças na precipitação podem reduzir, atrasar ou mudar o início do período úmido. Esses desvios são, muitas vezes, relacionados a sistemas meteorológicos de larga escala, como as interações entre a circulação atmosférica e a temperatura da superfície do mar, sobretudo responsáveis pelas secas em regiões tropicais (Lyon, 2004). Em seguida, a umidade do solo correspondente à zona vadosa é a próxima variável de estado do sistema a ser afetado. A zona não saturada atua como reservatório de água na zona superficial do solo, permitindo explicar as trocas de água entre a superfície e a atmosfera através da evapotranspiração. A capacidade de retenção de água no solo é fortemente influenciada por condições de umidade antecedentes, de modo que o esgotamento da água no solo afetará fortemente a disponibilidade de água para as plantas. Como os períodos secos são frequentemente

associados a altas temperaturas, a evapotranspiração potencial também aumenta nessas condições, o que, por sua vez, provoca uma maior evapotranspiração da superfície terrestre. Por último, o fluxo de água superficial, que é a saída de água do sistema, refletirá o efeito integrado da seca por meio das interações de componentes hidrológicos em toda a bacia hidrográfica.

Em relação à temporalidade da seca, percebe-se que esse fator tem maior destaque do que em outros fenômenos naturais. O ponto de partida de um estudo de seca envolve identificar e classificar os episódios de seca quanto ao seu início, intensidade, duração, magnitude. Logo, a escala temporal adotada poderá produzir diferentes resultados. A associação entre a variabilidade intra-anual e sazonal para secas meteorológicas em grandes áreas como anomalias climáticas depende da resolução temporal adotada para descrever o evento de seca (Özger *et al.*, 2009; Sheffield *et al.*, 2009; Kam *et al.*, 2014).

A escala temporal a ser adotada depende igualmente do uso da água sob o risco de seca (McKee *et al.*, 1993). O acúmulo de um déficit de precipitação será sentido em uma escala temporal mais curta em uma seca agrícola, como, por exemplo, no início da emergência de uma grande cultura, enquanto será notado em uma escala temporal mais longa no caso de uma seca hidrológica, que pode ser exemplificada pela redução da vazão de um curso de água.

Dependendo da variável observada do ciclo hidrológico, padrões distintos de variabilidade temporal são encontrados (Wu *et al.*, 2002). Dados mensais de precipitação são coerentes para várias aplicações, porém dados de umidade do solo superficial não são coerentes em uma escala que não seja no mínimo semanal em secas agrícolas (Narasimhan e Srinivasan, 2005), enquanto a evapotranspiração em escala trimestral é razoável, por exemplo, para estudos de depleção de águas subterrâneas

(Wada *et al.*, 2010). Mesmo no que concerne a um único tipo de seca, diferentes escalas temporais podem ser adotadas. A título de ilustração, com base em um índice de seca de precipitação, Vicente-Serrano *et al.* (2004) observaram que escalas temporais inferiores a seis (6) meses são representativas no estudo de fluxos de superfície, enquanto, para armazenamento de reservatórios, o valor de referência para a escala temporal pode ultrapassar o período de um (1) ano.

Outra finalidade dos estudos de seca é avaliar a sua extensão espacial, com vistas de mensurar o alcance do seu impacto (Hannaford *et al.*, 2011), constituindo-se a resolução espacial em variável essencial para avaliar esse atributo da seca. A seca pode atingir extensões territoriais que superam outros desastres naturais como inundações, deslizamentos de terra, incêndios florestais, entre outros. O conjunto de dados deve permitir identificar, de acordo com a escala espacial adotada, se regional, continental ou global, a correspondente tendência temporal, que pode ser diferente em cada uma delas (Ganguli e Ganguly, 2016). A escala espacial dependerá muito da fonte empregada de dados. Atualmente, registra-se um acervo histórico de imagens de satélite que recobre a superfície terrestre em resoluções temporais que variam de local a planetária (Anderson *et al.*, 2011).

A representação da informação, além de poder ser distribuída espacialmente, como no caso das imagens orbitais, pode, também, ser discreta, como no caso de estações meteorológicas. Nesse caso, a resolução espacial dependerá da densidade espacial de estações e dos métodos de interpolação para gerar superfícies com dados hidroclimáticos. Além da resolução do dado hidroclimático em si, a riqueza de detalhes espaciais das características físicas do terreno, como declividade, rugosidade, tipo de vegetação e tipo de solo, varia conforme a resolução espacial. Portanto, mudanças na

representatividade das características da superfície alteram a resposta hidrológica em uma bacia hidrográfica, sobretudo em períodos de seca (Van Lanen *et al.*, 2013).

## 2.2 Tipos de Seca

### 2.2.1 Seca Meteorológica

A seca meteorológica é aquela definida pela ausência de precipitação por um longo período de tempo ou sua redução abaixo dos níveis normais. Conseqüentemente, a seca pode estar, também, associada ao aumento de temperatura devido a menor ocorrência de nuvens. Como dito previamente, a seca tem caráter propagador no ciclo hidrológico, e, em especial, a seca meteorológica, por ser a precursora de outras secas, necessita de uma explicação quanto aos mecanismos atmosféricos que determinam a sua origem e o desenvolvimento de método para sua predição (Hao e Singh, 2013). Secas meteorológicas são impulsionadas por uma persistência de anomalias em padrões atmosféricos de larga escala, centros de alta pressão, as quais são, geralmente, inicializadas por anomalias associadas aos diferentes modos de interação oceano-atmosfera (Dai *et al.*, 2011). A ocorrência de uma seca não se origina de um fator único, mas da interação e da sinergia entre fatores globais com fatores locais. As próprias condições de seca podem favorecer a perpetuação da seca por meio de uma sinergia positiva entre a superfície terrestre e a atmosfera, sendo que ambos os sistemas intensificam os padrões atmosféricos que a sustentam (Hong e Kalnay, 2000). Um desses mecanismos é o que ocorre quando uma intensa anomalia negativa de umidade do solo provoca a diminuição na evapotranspiração, aumentando a proporção de fluxo de calor sensível em relação ao fluxo de calor latente, produzindo uma camada limite mais profunda e misturada, desfavorecendo, então, a formação de chuvas por convecção.

### 2.2.2 Seca Agrícola

A antecipação dos eventos de seca é feita por sistemas de monitoramento e previsão que fornecem informações para preparação e avaliação dos seus impactos em tempo real na escala global e regional. Esses sistemas podem contar com modelos meteorológicos integrados a modelos de superfície a fim de prever a duração e a extensão de secas hidrológicas e agrícolas (Luo e Wood, 2007; Yuan, 2013).

Em relação ao ciclo hidrológico, a seca agrícola está associada à hidrologia superficial, ou seja, ao balanço hídrico nas primeiras camadas do solo. A seca agrícola tem início quando um período crítico de déficit de umidade no solo ameaça a produção agrícola final (Hounam *et al.*, 1975). A natureza dessa deficiência ocorre por um suprimento de água insuficiente, devido a uma menor precipitação, ou por maior demanda de água, aumento na temperatura do ar e consequente evapotranspiração (Ciais *et al.*, 2005). Em secas agrícolas, os desvios temporais do ciclo úmido são tão importantes quanto a disponibilidade hídrica total para as plantas. Atrasos ou interrupções no início do ciclo chuvoso, por exemplo, podem comprometer a produção de culturas anuais e perenes (Pereira *et al.*, 2018).

A umidade do solo pode ser obtida por várias fontes, tanto por dados gerados pela modelagem hidrológica distribuída (Narasimhan e Srinivasan, 2005) quanto gerados por satélite com sensores exclusivos para o monitoramento da umidade do solo (Martínez-Fernandez, 2016). Resultados satisfatórios de predição da seca agrícola são encontrados pelo monitoramento das condições de umidade superficial do solo, sobretudo em grandes extensões territoriais (Sepulcre-Canto, 2002; Mishra e Singh, 2010; Shukla, 2014). Mas nem sempre anomalias de umidade do solo durante o ciclo da

cultura refletem a produção agrícola final. Os modelos agronômicos conseguem acompanhar o crescimento da espécie agrícola em função da resposta fisiológica às condições climáticas. A dificuldade do seu emprego, entretanto, consiste em seu elevado número de parâmetros, a especificidade de cada cultura agrícola, a dependência de calibração e a resolução temporal dos dados climáticos (Yu *et al.*, 2014), restringindo-os, muitas vezes, ao emprego no nível de campo.

As estimativas da produtividade agrícola tanto por modelo quanto por dados de satélite nem sempre são coerentes com os dados observados (Peña-Gallardo *et al.*, 2019). Para comprovar o efetivo impacto da seca na agricultura, geralmente, faz-se necessária a comparação de dados de amostragem da produção agrícola via pesquisas censitárias no nível de campo (Dias *et al.*, 2016) com dados orbitais (Bhuiyan *et al.*, 2017) e via modelos. Devido à heterogeneidade dos cultivos agrícolas na superfície terrestre, é necessário estabelecer qual é a escala temporal do índice de seca que melhor explica as flutuações na produtividade agrícola.

Além disso, monitorar a seca agrícola pode ser uma tarefa complexa. Deve-se considerar, por exemplo, que cerca de um terço da variação da produção mundial de alimentos não corresponde à variabilidade climática (Ray *et al.*, 2015) e que a resposta das culturas agrícolas à severidade da seca não é linear (Leng e Hall, 2019). Esse fato deve-se, em parte, a estratégias agronômicas no nível de campo que podem superar as adversidades climáticas (Bodner *et al.*, 2015) ou por não se considerarem os múltiplos fatores que afetam a produção de biomassa e a produtividade das plantas (Sun *et al.*, 2012).

A assimilação de dados de sensoriamento remoto pode ser uma ferramenta adequada para o monitoramento agrícola. A umidade do solo é uma importante variável

a ser assimilada nos modelos hidrológicos por melhor representar a disponibilidade de água na faixa das raízes (Kumar *et al.* 2014). Han *et al.* (2014) propuseram a assimilação de dados satelitais de umidade do solo em modelos hidrológicos para o monitoramento agrícola. Esse estudo empregou a covariabilidade entre o NDVI e a umidade do solo para prever futuros impactos da seca em regiões agrícolas.

### **2.2.3 Seca Hidrológica**

A seca hidrológica impacta a demanda hídrica para armazenamento, abastecimento e consumo humano de água. Embora o início da seca hidrológica esteja associado à redução da precipitação, o seu desenvolvimento é fortemente dominado por outros mecanismos, como os atributos físicos da bacia hidrográfica e as condições iniciais de umidade do solo (Van Lanen *et al.*, 2013).

Em última análise, o foco principal da quantificação da seca hidrológica é avaliar a redução da vazão proporcionada pela menor taxa de precipitação. Porém, efeitos de outras variáveis meteorológicas, como a temperatura, também alteram a resposta a secas. Um aumento da temperatura provoca maior evapotranspiração em climas tropicais, enquanto temperaturas mais baixas prolongam o congelamento em regiões temperadas (Mishra e Singh, 2010).

Apesar das alterações na vazão de longo prazo serem, principalmente, devidas ao clima, as propriedades físicas da bacia atuam como elementos de segunda ordem (Kingston, 2013). Os atributos relativos à superfície da bacia hidrográfica, como elevação e permeabilidade do solo, guardam, por exemplo, significativa sinergia com fatores climáticos tanto globais como regionais (Laizé e Hannah 2010). Os atributos físicos relativos aos componentes subterrâneos da bacia, como as áreas de carga e

recarga na bacia, também exercem influência na dinâmica da seca e estão diretamente associados à sua variabilidade espacial na bacia (Tallaksen *et al.*, 2009).

A adequada caracterização da seca hidrológica depende da representação dos seus componentes no processo de modelagem hidrológica. A representatividade dos fluxos de umidade do solo, escoamento superficial, recarga de água subterrânea e evapotranspiração definirão a exata duração, ocorrência e extensão espacial de secas (Van Loon *et al.*, 2012 ). Esse fato, em parte, explica a divergência da frequência de eventos de seca observados por diferentes modelos de larga escala (Huijgevoort *et al.*, 2014).

A seca hidrológica desenvolve-se em uma temporalidade distinta da seca meteorológica, que é, geralmente, mais lenta e persistente, em função do alto nível de elasticidade dos componentes do ciclo hidrológico, concentrada na área delimitada fisicamente pela bacia hidrográfica. A propagação da seca hidrológica é determinada por diversos fatores que influenciam na propagação do sinal da seca na medida em que se move por cada um dos seus componentes, um efeito semelhante ao de um filtro passa-baixa (Van Loon, 2015). A dimensão do armazenamento dos reservatórios superiores e inferiores determinam a propagação da seca no ciclo hidrológico. Os reservatórios superiores, modulados pela profundidade do solo, controlam a taxa de recarga dos reservatórios mais profundos e, por consequência, afetam a temporalidade da seca nos reservatórios subterrâneos (Domenico *et al.*, 2010). Além disso, a defasagem temporal da seca hidrológica nos componentes do ciclo hidrológico pode ser compreendida por meio de índices de seca específicos. Thomas *et al.* (2017) isolou o efeito do nível de águas subterrâneas dos demais componentes do ciclo hidrológico e dos possíveis efeitos de atividades antrópicas.

## 2.3 Índices de Seca

Para quantificar numericamente a intensidade da seca e sua extensão espacial, é necessário converter o valor da variável em questão, como precipitação, umidade do solo e evapotranspiração, em um índice para sua posterior interpretação. O índice, geralmente, é normalizado em uma escala em que zero representa o valor esperado da variável, tendo em vista as normais climatológicas, enquanto os valores positivos e negativos são os desvios em torno do valor esperado, ou seja, a intensidade dos períodos úmidos e secos, respectivamente. O uso de índices permite, também, avaliar a intensidade de um período seco ou úmido para dois pontos em locais distintos, com regimes climáticos diferentes, pois, para cada ponto, a escala adotada será a mesma. Esse tipo de informação é especialmente importante para a distribuição espacial dos valores de índices de seca. Um único índice, entretanto, não pode ser aplicado a todas as situações. Assim, surge uma grande variedade de índices que são propostos para abordar especificidade de cada tipo de seca. O cálculo pode ser feito para diferentes escalas temporais, variando anualmente, especialmente para análises globais ou grandes áreas, e mensalmente, que são mais adequadas para escalas regionais (Mishra e Singh, 2010).

Um dos primeiros índices de seca apresentados à comunidade científica foi o índice de severidade de seca de Palmer (PDSI - *Palmer Drought Severity Index*), que já foi empregado em diversos estudos, baseado em anomalias da equação do balanço hídrico. O PDSI usa um modelo de solo de duas camadas para quantificar o balanço hídrico por entrada mensal de água via precipitação e mensura as saídas via escoamento superficial e evaporação, considerando o estado anterior de umidade do solo. Os dados são, então, padronizados para que diferentes valores de localização possam ser comparados.

Para o monitoramento da agricultura, o uso do índice de umidade de cultura (CMI - *Crop Moisture Index*) é mais adequado, uma vez que se baseia em uma escala temporal semanal, para avaliar o estresse da planta sob a condição de seca. O CMI é calculado a partir da precipitação e do déficit de umidade superficial, em vez da relação entre evapotranspiração real e potencial (Palmer, 1968). Embora adequado para a agricultura, o índice falha ao avaliar mudanças no longo prazo por não se basear no balanço hídrico para suas estimativas de déficit hídrico.

O índice de precipitação padronizado (SPI - *Standardized Precipitation Index*) utiliza a precipitação como única variável, tornando-o de mais simples obtenção em relação aos demais. Um atributo inovador do índice é que ele pode ser calculado em diferentes escalas de tempo. Inicialmente, a série de tempo de precipitação é ajustada para uma distribuição gama e depois transformada em uma distribuição normal com o valor zero de média. Os valores abaixo de zero são indicativos de anomalias negativas dos valores de precipitação (Hayes *et al.*, 1999).

O índice de precipitação e evapotranspiração padronizado (SPEI - *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*) foi proposto por Vicente-Serrano *et al.* (2010b) e inclui dados de temperatura e de precipitação com formulação baseada no SPI, provendo similarmente dados em diferentes escalas temporais. O índice SPEI caracteriza a seca como a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial. Por ser baseado no balanço hídrico climatológico, o índice é igualmente comparável ao PDSI (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). Em termos de dados globais, o SPEI melhor representa um amplo espectro de secas. Em particular, quando comparado ao SPI, permite melhor descrever a seca durante o verão (Vicente-Serrano *et al.*, 2012), estação do ano em que a seca tem efeitos mais deletérios em condições tropicais. A relação entre as diferentes escalas temporais do SPEI e índices espectrais de vegetação mostrou que o

índice de seca é capaz de representar o efeito da seca em uma ampla variedade de coberturas vegetais (Vicente-Serrano *et al.*, 2013), destacando-se, em especial, a eficiência do índice em ambiente semiárido para escalas temporais que variam em torno de seis (6) meses (Gouveia *et al.*, 2016).

Apesar do SPEI incorporar duas variáveis, calcula-se a diferença entre elas, não sendo, de fato, um índice multivariável. Um outro grupo de índices de seca diz respeito àqueles baseados em estatísticas multivariadas cuja composição podem levar em conta duas e até três variáveis hidrometeorológicas, permitindo, assim, ampliar o conjunto de aplicações (Keyantash e Dracup, 2002). As abordagens podem ser as mais diversas, como combinação linear de variáveis, distribuição de probabilidade conjunta de forma empírica ou por meio de função denominada de cópulas ou ainda por análise de componentes principais (Hao e Singh, 2015). Uma dessas iniciativas propôs o índice de seca multivariado (MDSI - *Multivariable Drought Severity Index*), como o objetivo de agregar o índice SPI, baseado em precipitação, e o índice de umidade do solo (SMI – *Soil Moisture Index*), baseado em umidade do solo, para satisfazer aplicações tanto hidrológicas quanto de agricultura, usando uma abordagem paramétrica em sua primeira versão, Hao e Singh (2013) empregaram a função cópula em sua versão não paramétrica, enquanto Hao e Singh (2015) empregaram uma função multivariável empírica. Agregando as informações de precipitação e de umidade do solo, o objetivo do MDSI é de melhor representar a duração e a persistência da seca (AghaKouchak *et al.*, 2015).

## 2.4 Sistemas de Monitoramento de Seca

Sistemas de monitoramento de secas são arcabouços concebidos para prever, identificar e mitigar eventos de seca, informando, à população e aos tomadores de decisão, a evolução espaço-temporal da seca. Operando desde 1999, o monitor de seca americano (*North American Drought Monitor*) foi criado para acompanhar a seca e disponibilizar o nível de sua magnitude e extensão espacial em tempo real, permitindo classificar a seca em quatro (4) categorias de severidade, observando-se que há, ainda, uma quinta categoria de maior risco denominada de condição de seca anômala (Svoboda *et al.*, 2002). O monitor de seca alemão (*German Drought Monitor*) utiliza dados meteorológicos observados diários, que são interpolados e, em seguida, empregados em um modelo hidrológico. Os dados de alta resolução espacial permitem a avaliação da seca por meio de um índice de umidade do solo calculado pelos dados modelados de umidade do solo diária para a zona das raízes (Zink *et al.*, 2016). Em vez de dados observados, é possível que os modelos hidrológicos sejam alimentados por dados previstos de precipitação, como as saídas de um modelo meteorológico. Exemplos desses sistemas foram feitos para os EUA (Luo e Wood, 2007), África (Yuan *et al.*, 2013) e Índia (Shah e Mishra 2015). Apesar do grau de previsibilidade variar entre os sistemas, essa configuração tem a vantagem de reproduzir os principais fatores climáticos atuantes em cada região. Outra forma de reduzir a incerteza nos sistemas de monitoramento da seca é pela integração de múltiplos modelos e observações de sensoriamento remoto, como sugerida por Nijssen *et al.* (2014) e Hao *et al.* (2014), uma vez que esses sistemas aumentam a predição de secas, principalmente, no curto prazo.

Os sistemas de monitoramento de seca podem incluir esquemas de assimilação de dados para melhor representar o fenômeno da seca (Mo *et al.*, 2012). A assimilação

de dados em modelos visa superar o acúmulo de erros e incertezas observadas a cada espaço de tempo em que o modelo é executado (Cosgrove *et al.*, 2003). As incertezas decorrem da qualidade dos dados de entrada, também referidos como forçantes meteorológicas, ou do real valor dos parâmetros do modelo (Reichle *et al.*, 2008). Os sistemas de assimilação de dados globais incorporam dados de sensores remotos e observações terrestres, através de técnicas assimilação de dados em diferentes classes de modelos de superfície e modelos hidrológicos (Rodell *et al.*, 2004). Nas aplicações para tratar a seca, a assimilação de dados é voltada, sobretudo, para dados de umidade do solo. Alguns exemplos são uma maior acurácia da modelagem da umidade do solo após a assimilação de dados do sensor AMSR-E (Brocca *et al.*, 2010) ou um aumento na predição do escoamento superficial pela assimilação de dados do sensor ASCAT (Bolten *et al.*, 2010).

A obtenção dos fluxos terrestres por meio de modelos é uma importante fonte de dados para monitoramento da seca e substituição dos índices de seca tradicionais baseados no balanço hídrico do solo (Mo e Chelliah, 2006). A sua principal limitação, no entanto, é a qualidade dos dados de precipitação e a correta parametrização dos fluxos terrestres, como os fluxos de umidade do solo, de escoamento superficial e de evapotranspiração (Trenberth *et al.*, 2014; Spennemann e Saulo, 2015). As bases de dados com maior acurácia espaço-temporal de dados de precipitação são capazes de prover informações mais precisas sobre a seca (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). Mesmo com a notória relevância da precipitação, a influência das propriedades do solo é extremamente relevante na propagação da seca, uma vez que modulam, principalmente, a variabilidade temporal do fenômeno (Dutra *et al.*, 2008).

A modelagem da seca pode ser feita conjuntamente com dados de sensoriamento remoto. Por exemplo, o emprego de dados de radiação solar adquiridos pelo sensor

MODIS e das demais variáveis oriundas dos dados de reanálise NCEP foi feito mediante arranjo que resultou na formulação um índice baseado na diferença entre evapotranspiração potencial e real (Yao *et al.*, 2010). O armazenamento total de água no solo, obtido a partir de dados da missão GRACE e de modelos do GLDAS, evidencia a convergência de resultados, mostrando um padrão espaço-temporal similar para o armazenamento total de água no solo por meio dos satélites. Devido à natureza dos dados de reanálise, foi possível, inclusive, evidenciar a influência de cada um dos componentes, como evapotranspiração e umidade do solo, no armazenamento de água em cada faixa latitudinal (Syed *et al.*, 2008).

A parametrização dos modelos passa pela representação da vegetação. Hamill (2013) mostrou que um aumento do escoamento superficial, que, inesperadamente, ocorreu acompanhado de uma queda na taxa de precipitação, foi consequência, na verdade, de uma perda significativa de uma parcela da vegetação nativa. A formulação mais sofisticada da umidade do solo no perfil do solo em modelos do tipo LSM permite uma simulação mais realística quando comparada a resultados produzidos por modelos que empregam o simples balanço hídrico. Crow *et al.* (2012) observaram que dados de umidade do solo, para a faixa de profundidade das raízes, gerados por meio de arranjos multimodelos, são capazes de antecipar dados NDVI, funcionando como importante ferramenta para monitoramento agrícola. A modelagem dos fluxos de superfície sob condições de seca sofre influência do clima da região. Esses efeitos são subestimados, por exemplo, em regiões geográficas mais áridas em relação a climas mais úmidos, devido, sobretudo, aos diferentes grupos de vegetação nesses locais (De Kauwe *et al.*, 2015).

## 2.5 Sensoriamento Remoto

Para monitorar a seca e desenvolver indicadores que acompanhem a sua evolução, outras fontes de dados que não se restrinjam aos tradicionais indicadores oriundos de estações meteorológicas ou fruto de reanálise devem ser incorporados. Diversos sensores orbitais atuantes fornecem dados capazes de descrever o estado da superfície terrestre. Nessa categoria, enquadram-se os sensores orbitais ópticos, termais, micro-ondas e gravimétricos, que coletam dados de reflectância, emissividade, retroespalhamento e gravimetria, respectivamente. A partir desses dados brutos, é possível, com grau de acurácia satisfatória, estimar importantes parâmetros da superfície, tais como índices de vegetação e área foliar, albedo, temperatura terrestre, radiação fotossinteticamente ativa, evapotranspiração e umidade do solo, entre outros. Todas essas informações terrestres discriminadas são sensíveis a secas, podendo funcionar como potenciais indicadores, evitando, assim, dispendiosas campanhas de campo e fornecendo valiosas informações. Portanto, o sensoriamento remoto pode desempenhar papel crucial nos avanços globais contra a seca, permitindo a sua adequada identificação, caracterização e mitigação.

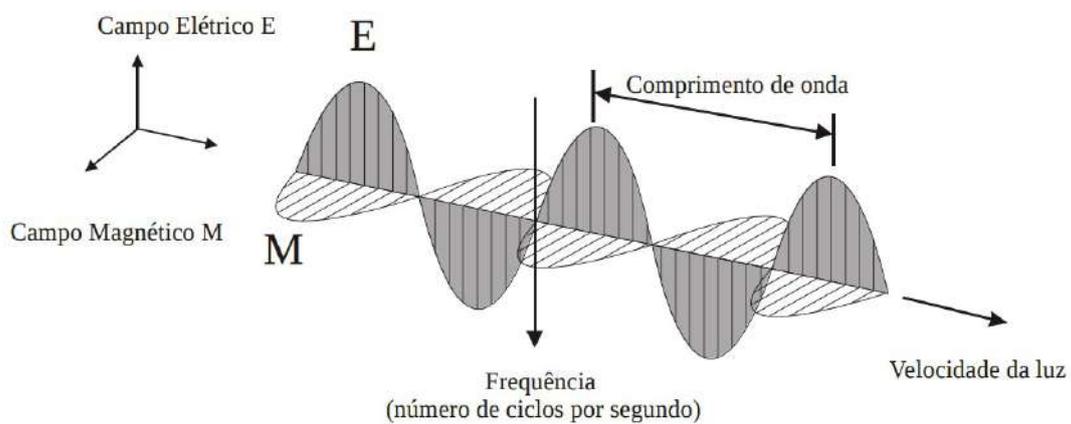
A detecção remota é a técnica de aquisição de informações de uma área, de um objeto ou de um fenômeno através de um sensor instalado em um local remoto. Vários satélites orbitam a Terra e registram informações através de diferentes abordagens físicas, como energia elétrica e magnética, incluindo reflectância, emissão e retroespalhamento, ondas acústicas ou campo gravimétrico, via apropriação por mecanismo remoto. Uma das principais classificações de detecção remota é a fonte de energia provida ao sensor, que pode ser identificada mediante um sistema de aquisição

passivo, dependente da radiação solar, ou mediante um sistema ativo, que emite energia própria e registra o seu retorno. Os sistemas passivos podem ser subdivididos em três (3) grupos. O primeiro detecta a radiação refletida pelo Sol no visível e no infravermelho próximo. Os dois grupos seguintes registram a emissão termal da Terra, parte da chamada região infravermelha do espectro eletromagnético e parte na região do espectro associada a comprimentos de onda mais longos denominada de micro-ondas (Rees, 2013).

De uma maneira mais geral, o sensoriamento remoto é definido como uma técnica de obtenção de dados da superfície terrestre sem contato físico entre o sensor e o objeto. Pode-se incluir, nessa definição, o requisito de ausência de matéria entre o sensor e o objeto para que a informação seja transportada por radiação eletromagnética. Assim, tem-se a definição de sensoriamento mais usual em ciências exatas e da terra, áreas de conhecimento que abrangem a delimitação desta tese.

Como fonte de informação do sensoriamento remoto, a radiação eletromagnética tem um comportamento dual, ou seja, propaga-se em forma de onda e de energia, com formulação dada ora por modelo de natureza ondulatória e ora por modelo baseado em teoria corpuscular ou de pacote discreto de energia na forma denominada de *quantum*. As ondas eletromagnéticas são fruto de perturbações no campo elétrico e magnético causadas por vibração de partículas, que oscilam ortogonalmente entre si e em relação à direção de propagação, possuindo amplitudes conforme a Figura 2.1. Pelo modelo de onda, as ondas eletromagnéticas propagam-se no vácuo na velocidade da luz. Na terminologia do sensoriamento remoto, são comumente caracterizadas pelo seu comprimento de onda, que é a medida de distância entre dois picos sucessivos. Considerando-se a velocidade constante, ondas com comprimentos de ondas menores tem frequências maiores. Logo, um maior número de ondas passa pelo ponto de

referência num dado tempo, e a relação inversa ocorre para os comprimentos de onda maiores. Essa definição é importante para conceituar a interação macroscópica da onda eletromagnética com a superfície terrestre, pois a intensidade com que um objeto reflete a radiação eletromagnética é função do tamanho da onda e da textura da superfície do objeto (Jensen, 2007).

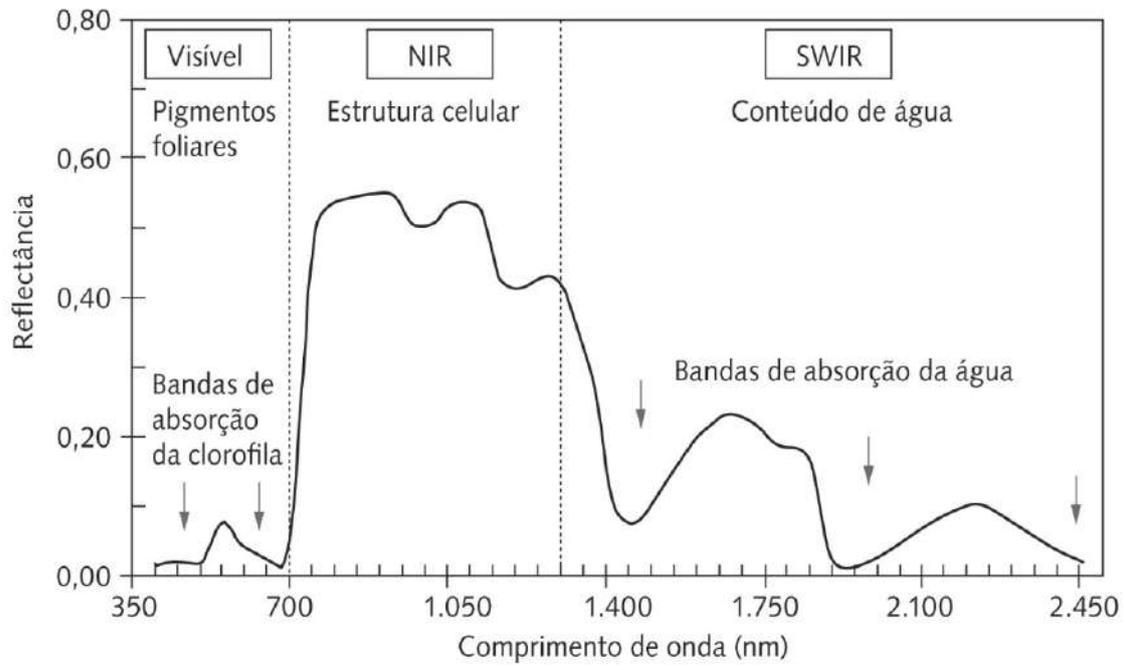


**Figura 2.1:** Direção de propagação da radiação eletromagnética na forma de uma onda, em função das oscilações ortogonais dos campos magnético (M) e elétrico (E).  
Fonte: adaptado de Meneses e Almeida (2012).

Por outro lado, de acordo com o modelo corpuscular, define-se que a radiação eletromagnética é uma forma dinâmica de energia que se manifesta por suas interações com a matéria. e essa quantidade de energia é diretamente proporcional à frequência, ou ao comprimento de onda, dessa radiação. A troca de energia entre a radiação eletromagnética ocorre apenas quando a quantidade de energia contida for exatamente igual àquela necessária para promover uma mudança nos níveis de energia dos átomos ou moléculas, ou seja, discreta. Essa interação é dita microscópica, pois depende exclusivamente da constituição química do material. O fato é de extrema relevância para a caracterização do alvo na superfície terrestre, pois materiais de composições químicas diferentes têm absorção e reflectância distintas, resultando em imagens com diferentes padrões de tons de cinza (Jensen, 2007).

A radiação eletromagnética pode assumir diferentes comprimentos de onda, formando um espectro contínuo. Para melhor compreensão, o espectro foi arbitrariamente dividido em intervalos de comprimentos de onda com base nos mecanismos físicos geradores da energia eletromagnética e nos mecanismos físicos de sua detecção, formando o chamado espectro eletromagnético. Essa informação é crucial para os usuários de dados de sensoriamento remoto, uma vez que cada sensor orbital detecta a reflectância ou a emitância da superfície para intervalos específicos de comprimento de onda, denominando-se cada intervalo de banda espectral, que está associada, por sua vez, a uma dada imagem (Meneses e Almeida, 2012).

Devido ao comportamento quântico, a interação entre energia e matéria é específica para cada comprimento de onda. Portanto, a quantidade de energia absorvida, ou refletida, por um material ao longo do espectro eletromagnético terá uma feição própria, denominada de assinatura espectral do objeto. A Figura 2.2 ilustra o comportamento espectral da vegetação na faixa do visível e do infravermelho próximo.



**Figura 2.2:** Comportamento espectral de um alvo de vegetação e principais fatores que influenciam na reflectância (pigmentos foliares, estrutura celular, conteúdo de água), considerando as diferentes regiões espectrais do sensoriamento remoto passivo (visível, infravermelho próximo – NIR e infravermelho de ondas curtas – SWIR) entre 350 nm e 2.500 nm. Fonte: adaptado de Formaggio e Sanches (2017).

O teor de clorofila nas folhas é a principal característica da vegetação que lhe confere propriedades de reflectância, permitindo a sua identificação em imagens de satélite. Observando o espectro de reflectância da vegetação na faixa do visível, pode-se identificar três (3) faixas. No espectro do visível, entre 400 nm a 700 nm, que abrange do azul ao vermelho, a reflectância é muito baixa, ocorrendo um único pico em 550 nm, inserido na faixa do verde. A reflectância aumenta subitamente na região do infravermelho próximo, de 700 nm a 1300 nm, ocorrendo, portanto, uma baixa absorção pela clorofila. Nessa faixa, ocorre o espalhamento devido à estrutura interna da anatomia foliar. Já na região seguinte ao infravermelho próximo (Near-Infrared - NIR), denominada de infravermelho de ondas curtas (*Short Wave Infrared – SWIR*), a reflectância da vegetação verde que ocorre aproximadamente em 1.400 nm, em 1.900 nm e em 2.700 nm, sendo inversamente relacionada com a quantidade total de água presente nas folhas.

Variações no teor de clorofila nas folhas promovem alterações na forma da curva de reflectância da vegetação, sobretudo na faixa do visível e do infravermelho próximo. Conforme as folhas crescem, a reflectância no visível diminui, e a reflectância no infravermelho próximo aumenta. Em contrapartida, na medida em que as folhas envelhecem, configurando o processo denominado senescência, observa-se um efeito oposto, ou seja, a reflectância no visível aumenta e a reflectância no infravermelho diminui. As mudanças nos teores de clorofila não estão apenas associadas ao crescimento e à morte do tecido foliar, mas igualmente com possíveis estresses ambientais, tais como a seca, sendo possível observar alterações das propriedades ópticas das folhas, como sua menor absorção de energia, o que gera aumento na reflectância do visível.

## 2.5.1 Índices de Vegetação

Índices de vegetação são resultantes de operações de transformações espectrais envolvendo duas ou mais bandas para melhorar a representação de superfícies cobertas por vegetação. Esses índices permitem monitorar as variações sazonais, anuais e de longo prazo da vegetação, bem como avaliar desde parâmetros fenológicos e biofísicos até propriedades estruturais dos dosséis (Huete *et al.*, 2002). Um dos índices de vegetação mais bem empregados em pesquisas científicas é o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), função da diferença entre a reflectância na faixa do infravermelho próximo (INF), que reflete mudanças no mesófilo esponjoso, e do vermelho do espectro eletromagnético (VER), radiação que interage com o teor de clorofila (Gu *et al.*, 2007), dado por

$$NDVI = \frac{INF - VER}{INF + VER} \quad (2.1)$$

O índice NDVI tem amplitude entre -1 e 1, sendo que os valores negativos correspondem a espelhos de água, e os valores positivos correspondem às superfícies terrestres. A faixa de valores entre 0 e 0,3 corresponde a superfícies com solo exposto ou com vegetação esparsa. A faixa de valores entre 0,3 e 0,9 corresponde à área vegetada, de fato, e, a partir de 0,9, os valores de NDVI costumam atingir o nível de saturação, não correspondendo às reais variações na superfície foliar. Apesar da sua simplicidade, o índice tem alta aplicabilidade. Algumas limitações persistem no desempenho do índice, além da saturação em dosséis de copas fechadas, como a sensibilidade a aerossóis atmosféricos e à contribuição espectral de fundo do solo (Anderson *et al.*, 2011). O índice de vegetação aperfeiçoado (*Enhanced Vegetation Index* - EVI) propõe melhorias ao NDVI, incluindo a reflectância na banda azul para minimizar o fundo do dossel e a influência do aerossol (Huete *et al.*, 2002). O índice de

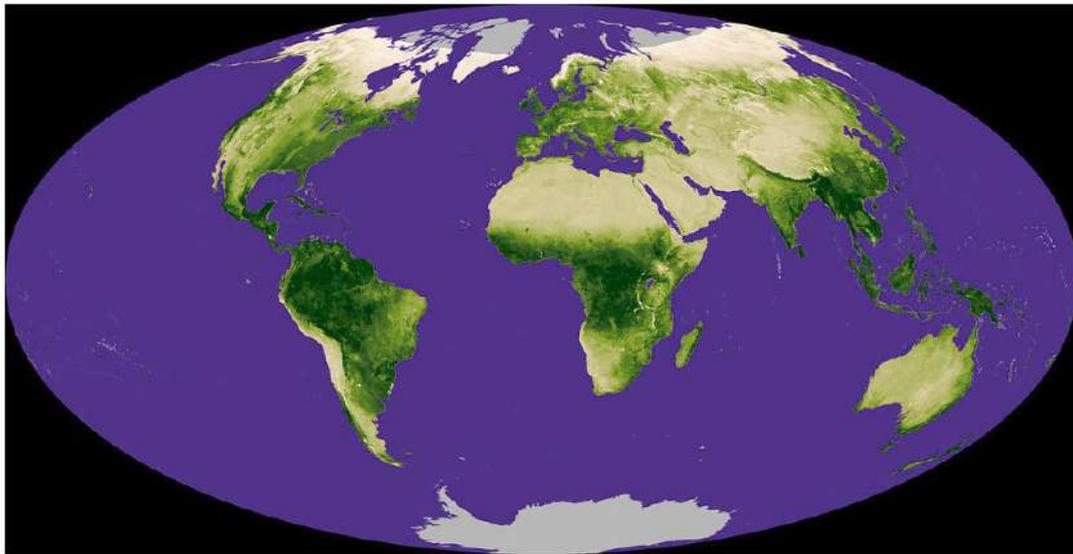
vegetação ajustado ao solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI) visa limitar a contribuição do solo ao índice de vegetação através da adição de um fator que varia em função da densidade da cobertura da vegetação. O índice de água por diferença normalizada (*Normalized Difference Water Index* - NDWI) foi proposto após o NDVI, de tal forma que esse novo indicador usa canais do infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR), sendo que o primeiro canal é sensível à estrutura interna da folha e à sua massa seca, mas não é sensível ao conteúdo de água, enquanto a reflectância do segundo responde ao conteúdo de água e à estrutura interna de composição foliar, conforme expõe Ceccato *et al.* (2001), o que tornaria esse novo índice mais sensível ao monitoramento da seca (Ceccato *et al.*, 2002; Gu *et al.*, 2007).

Outra variável incorporada aos índices de vegetação é a temperatura da superfície terrestre (TST). As mesmas plataformas que operam com sensores ópticos medem a emissividade da Terra na faixa do termal, que, a partir de algoritmos adequados, são convertidos em dados de temperatura. A temperatura da superfície está diretamente relacionada com o teor de água do dossel (Yao *et al.*, 2010), e, em alguns casos, como em regiões secas, é mais sensível à condição de umidade (Singh *et al.*, 2003). Por essa razão, um índice que incorpore ambas as informações, tanto por meio do NDVI quanto da TST, pode proporcionar uma melhor caracterização da seca (Kogan, 1995). Além disso, a relação de variação inversa ou correlação negativa entre píxeis NDVI e TST pode ser interpretada como uma aproximação para explicar o comportamento da variação da umidade do solo, uma vez que áreas mais secas (úmidas), devido à inércia termal, apresentam temperaturas maiores (menores), que, por sua vez, terão valores de NDVI menores (maiores). Essa relação foi observada e verificada em campo por vários autores (Sun e Kafatos, 2007; Gu *et al.*, 2007; Brown *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2015). O diagrama de dispersão de imagens NDVI e TST possui

uma forma triangular, e uma análise gráfica permite separar píxeis secos e úmidos (Carlson *et al.*, 1995; Sandholt *et al.*, 2002). Uma revisão detalhada e completa do método é dada por (Petropoulos *et al.*, 2009).

### **2.5.2 MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*)**

O espectro-radiômetro imageador de moderada resolução (MODIS – *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um instrumento a bordo do satélite *Terra* lançado em 1999 e do satélite *Aqua* lançado em 2002. A missão foi projetada para fornecer informações confiáveis para atmosfera, oceano e demais geociências que se beneficiassem de produtos espectrais de elevada qualidade e alta resolução temporal. O sensor MODIS é composto de 36 bandas espectrais de resolução radiométrica de 12 bits e adquire dados em três resoluções espaciais: 250 m, 500 m e 1000 m (Justice *et al.*, 2002). As primeiras sete (7) bandas são projetadas para estudos da superfície, notando-se que a banda 1 (vermelho, 620-670 nm) e a banda 2 (infravermelho próximo, 841-876 nm) possuem resoluções espaciais de 250 m, enquanto a banda 3 (azul, 459-479 nm), a banda 4 (verde, 545-565 nm), e as bandas 5, 6, 7 (1230-1250 nm, 1628-1652 nm, 2105-2155 nm) têm resoluções espaciais de 500 m. Também são cruciais, para os estudos de superfície terrestre, as bandas do MODIS situadas no espectro do infravermelho (3000-15000 nm). Dentre elas, sete (7) são utilizadas como entrada para a temperatura da superfície e produtos de estimativa da emissividade terrestre. Uma amostra de uma imagem NDVI do sensor MODIS é mostrada na Figura 2.3.



**Figura 2.3:** Imagem global NDVI do sensor MODIS a bordo do satélite Terra de dezembro de 2007. Uma maior intensidade da cor verde indica um aumento da densidade da cobertura vegetal, enquanto uma maior intensidade da cor bege indica uma maior exposição do solo.

Fonte: [https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image\\_feature\\_1056.html](https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_1056.html)

Os dados são distribuídos em diferentes níveis. O nível 2 baseia-se em variáveis geofísicas derivadas na mesma resolução e localização em que são gerados os dados de origem do nível 1. O nível 3 inclui variáveis de grade em resoluções espaciais e temporais derivadas. O nível 4 é o resultado de modelo ou resultante das análises de dados. O enfoque, nesta tese, será na família de produtos *MODLAND*, um conjunto de produtos terrestres globais de especial interesse para estudos de seca, incluindo índices de vegetação espectral, temperatura de superfície e outras variáveis biofísicas dos ciclos globais de carbono e hidrologia.

O produto de reflectância de superfície padrão MODIS é MOD09, com base em estimativas para as bandas de 1 a 7, é distribuído como imagens compostas diárias e de oito (8) dias. O algoritmo corrige os efeitos atmosféricos e aqueles oriundos pela interferência dos aerossóis bem como a função de distribuição de reflectância bidirecional (BRDF) (Vermote e Vermeulen, 1999). O MOD 13 fornece dois índices de vegetação, o NDVI e o EVI, com resolução espacial de 16 dias, e uma imagem auxiliar

com valores de qualidade de cada píxel. Esse é um produto de nível 3 gerado pelo produto MOD09, com resolução espacial de 250 m, 500 m, 1 km e 25 km, sendo que esse último consiste em uma versão voltada para a modelagem climática (Justice *et al.*, 2002). O produto MOD11 fornece dados de TST com uma resolução espacial de 1 km e uma resolução temporal diária de oito (8) dias. Outros produtos da família MODLAND de importância para estudos de seca são MOD16 para evapotranspiração real e potencial (Mu *et al.*, 2011), MOD17 para produção primária bruta (PPB) e produção primária líquida (PPL) (Running *et al.*, 2004) e o MOD15 para o índice de área foliar (LAI) e para a radiação fotossinteticamente ativa fracionada (REAF) (Privette *et al.*, 2002).

A seca afeta a fisiologia da planta e, em uma escala maior, a estrutura da vegetação e ecossistemas inteiros, reduzindo a absorção de CO<sub>2</sub> e aumentando a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera (AghaKouchak *et al.*, 2015). A PPB é a quantificação da troca líquida de CO<sub>2</sub>, entre a atmosfera e a biomassa da planta, enquanto a PPL é a quantidade de absorção de carbono pela fotossíntese diária. As técnicas de sensoriamento remoto permitem estimar ambas as variáveis em toda uma região, portanto, em escalas ecossistêmicas. A radiação solar incidente e a temperatura do ar são fatores limitantes da PPB. No entanto, a disponibilidade de água parece ser o fator que mais limita a PPL em todo o mundo (Running *et al.*, 2004), embora produza uma das respostas de atraso mais consideráveis entre o momento que se estabelece o estresse hídrico e a correspondente resposta do ecossistema.

A adoção da métrica de eficiência do uso da chuva, que é a taxa de PPB anual por precipitação, pode explicar melhor as trocas de CO<sub>2</sub> dos biomas entre os anos seco e úmido (Zhang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2014). Outro resultado direto da redução da precipitação é a diminuição da evapotranspiração, que também está ligada à absorção de carbono pelas plantas. A eficiência do uso da água dividida pela evapotranspiração, que

mede a quantidade de carbono fixada por unidade de água transpirada, é mais sensível à eficiência do uso da água, porque cada tipo de vegetação tem diferentes padrões de evapotranspiração como afirmado por Liu *et al.* (2015). Suas descobertas mostraram que diferentes regiões da China respondem positivamente ou negativamente a secas leves ou severas.

A evapotranspiração é um dos principais componentes do ciclo hidrológico, constituindo-se no elo de conexão entre o balanço de água e o balanço de energia no sistema solo-água-vegetação. Nos últimos anos, várias tentativas concentraram-se em estimar a evapotranspiração distribuída a partir de dados de sensoriamento remoto. Alguns métodos são baseados em modelos físicos que calculam a evapotranspiração a partir do resíduo de energia balanceada, usando a banda de infravermelho termal, índices de vegetação e dados meteorológicos auxiliares (Anderson *et al.*, 1997; Bastiaanssen *et al.*, 1998; Su, 2002; Allen *et al.*, 2007).

O conceito de evaporação potencial é a quantidade de água que evapotranspiraria se a água fosse abundante para um conjunto de condições meteorológicas, como temperatura, radiação, vento e umidade relativa do ar. Pode também ser interpretada como a demanda atmosférica para extrair água da superfície. Assim, pode-se considerar um equilíbrio entre a precipitação como entrada e a evapotranspiração potencial como resultado. Essa é a ideia básica do índice de detecção de seca (*Reconnaissance Drought Index - RDI*), proposto por Tsakiris e Vangelis (2005), que é a relação agregada entre duas variáveis, notadamente de precipitação e de evapotranspiração potencial. O RDI é um índice de base física e pode ser aplicado à seca hidrológica e à seca agrícola, sendo mais sensível quando comparado ao SPI (Tsakiris *et al.*, 2007).

A intensidade da seca pode ser acentuada quando a precipitação abaixo do normal combina-se com ondas de calor, ventos fortes e dias ensolarados, que aumentam o estresse evaporativo da vegetação (Otkin *et al.*, 2014). O índice de estresse evaporativo (*Evaporative Stress Index* - ESI) quantifica anomalias na relação entre evaporação real e evaporação potencial usando dados de sensoriamento remoto ou modelados mediante o emprego de banda termal (Yao *et al.*, 2011 e Mu *et al.*, 2013). Usando dados orbitais, o ESI pode fornecer uma resolução espacial mais fina em comparação com os índices derivados da precipitação. Anderson *et al.* (2011) demonstraram que o ESI tem uma resposta de seca rápida e concorda bem com o sistema norte-americano de monitoramento de secas (*United States Drought Monitor* - USDM) em comparação com outros índices de seca de detecção remota. Um estudo avaliou o ESI como indicador da seca agrícola no Brasil para o período 2003-2013 (Anderson *et al.*, 2016). O ESI, a precipitação obtida via missão de medições de chuva tropical (*Tropical Rainfall Measuring Mission* - TRMM) e o IAF do sensor MODIS foram comparados com a produtividade das culturas no nível estadual e no nível municipal. Em geral, todas as métricas proporcionaram correlação espacial e temporal semelhante com as estatísticas agrícolas nas regiões sudeste e nordeste, embora, no nível municipal, de resolução mais detalhada, o ESI não apresentou relação com o rendimento anual de produção agrícola. Especificamente na região seca do Nordeste, o ESI enfatiza melhor os eventos de seca instantânea em comparação com outras informações derivadas de satélite.

### 2.5.3 Outros Produtos de Sensoriamento Remoto

#### *Sensores Radiômetros e Radares*

Os radiômetros de micro-ondas passivos, diferentemente dos sensores ópticos, medem a emissão natural de energia na faixa de micro-ondas e a correspondente temperatura de brilho das superfícies terrestres. Alguns exemplos de radiômetros são, entre outros, *Special Sensor Microwave* (SSM/I), TRMM, *Advanced Microwave Scanning Radiometer* - EOS (AMSR-E) e *Soil Moisture Ocean Salinity* (SMOS). Os sensores ativos, por outro lado, incluindo o radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* - SAR) e os dispersores, transmitem sinais para uma área de superfície-alvo e medem o retorno do espalhamento. Os sensores na faixa de micro-ondas identificam comportamentos distintos de objetos de acordo com a sua frequência de operação e banda correspondente.

Em especial, o sistema de micro-ondas tem uma vantagem em relação a sensores ópticos devido à sua relativa transparência em relação à atmosfera e quanto à sua particular sensibilidade no que concerne à variação da umidade do solo (Behari, 2005), o que confere um espaço de uso complementar ao emprego de sensores ópticos para identificação de padrões de variação hídrico-ambiental na natureza.

Registre-se que, na faixa do espectro da gama de frequências de micro-ondas, a constante dielétrica do solo tem uma notável dependência do teor de água do solo (Huffman *et al.*, 2007), tornando esses sistemas mais propensos a monitorar a umidade do solo globalmente. Algumas limitações atuais dos sistemas de micro-ondas incluem medidas de umidade do solo, que são restritas, no caso, à medição limitada da umidade superficial do solo e perturbada pela alta relação ruído-sinal em áreas com elevada

densidade de vegetação. No caso de sistemas passivos, outra restrição adicional está associada à baixa resolução espacial.

## *GRACE*

A missão satelital experimental de obtenção da gravidade terrestre e de informações de natureza climática (*Gravity Recovery and Climate Experiment - GRACE*) é uma missão conjunta efetuada pelos os Estados Unidos da América (EUA) e pela Alemanha, lançada em março de 2002, com o objetivo de detectar a variação espaço-temporal do campo gravitacional da Terra. O GRACE é composto por dois satélites geminados que orbitam o globo terrestre distanciados entre si em 250 km. A variação da massa de água em grandes áreas tem potencial gravitacional forte o suficiente para alterar a órbita de satélites, que, por sua vez, podem alterar a distância entre ambos os satélites. Essa distância é medida usando sistemas de rastreamento de micro-ondas a bordo e, dessa forma, pode ser usada para quantificar o armazenamento de água terrestre (Rodell *et al.*, 2012). Conseqüentemente, variações de massa na Terra incluirão mudanças no armazenamento total de água ao longo da profundidade da coluna definida a partir da superfície terrestre devido a alterações na sua quantidade de água armazenada do solo, incluindo a umidade do solo, massas superficiais de água de por causa de neve, e lagos e rios, umidade do solo, aquíferos, bem como outras massas de água contendo biomassa (Rodell *et al.*, 2012).

O produto para fins hidrológicos do GRACE é o Armazenamento Total de Água (ATA) ou mais comumente chamado internacionalmente de TWS (*Total Water Storage*). As anomalias terrestres dessa variável são importantes elementos nos estudos globais de identificação e severidade de seca (Tapley *et al.*, 2004; Rodell *et al.*, 2009; Famiglietti

e Rodell, 2013; Thomas *et al.*, 2014). O ATA (ou TWS) é uma estimativa agregada, incluindo reservatórios de água de superfície (rios, áreas úmidas e lagos), de subsuperfície (umidade do solo) e de águas subterrâneas (umidade do solo e águas subterrâneas), juntamente com a água contida na vegetação e a neve. Dados GRACE foram utilizados para determinar a evapotranspiração sobre a superfície terrestre (Ramillien *et al.*, 2006; Rodell *et al.*, 2011), mudança de armazenamento de água subterrânea e depleção (Rodell *et al.*, 2009), impactos de inundações severas no armazenamento de água (Espinoza *et al.*, 2013), detecção de seca (Famiglietti e Rodell, 2013) e sua caracterização (Thomas *et al.*, 2014). As estimativas GRACE do ATA (TWS) também foram usadas em esquemas de assimilação de dados (Zaitchik *et al.*, 2008) e na calibração (Werth *et al.*, 2009) e avaliação (Getirana *et al.*, 2016) de modelos hidrológicos.

## **2.6 Variabilidade Climática e a Dinâmica da Vegetação**

### **2.6.1 Introdução**

A fotossíntese constitui um dos principais processos do ciclo global do carbono e a sua dinâmica temporal é de profunda importância, incluindo a influência climática (Ryu *et al.*, 2019). Através da atividade fotossintética a planta realiza a transformação dos recursos ambientais em fotoassimilados pela fixação de CO<sub>2</sub> atmosférico com consumo de energia e de água. O processo ocorre, principalmente, na folha e depende da condutância estomática. Ao abrir, o estômato permite o fluxo de CO<sub>2</sub> para o interior da folha, pois sua concentração na cavidade estomática é menor devido ao consumo foliar interno. Em contrapartida, a abertura estomática estimula a evapotranspiração (Bonan, 2015), pois, devido à umidade do tecido vegetal, o vapor de água, em maior

concentração na cavidade estomática, flui para fora da folha. Simultaneamente, ao processo fotossintético, ocorre, na planta, o processo respiração. O metabolismo celular demanda energia e assim consome parte dos fotoassimilados produzidos na fotossíntese, liberando CO<sub>2</sub>. O balanço de carbono na planta, ou produção primária líquida (PPL), será, portanto, a assimilação total de carbono pela planta através da fotossíntese, consistindo na produção primária bruta (PPB) subtraído do consumo de fotoassimilados pela respiração (Boisvenue e Running, 2006).

A PPL, sendo positiva, resultará em ganho de biomassa vegetal, logo com crescimento da planta, enquanto a PPL negativa implicará perda de biomassa vegetal, logo senescência (morte do tecido vegetal) e abscisão (destacamento e queda do órgão vegetal). No entanto, a produção de fotoassimilados não ocorre de maneira uniforme na planta. Alguns tecidos são superavitários em assimilados (regiões produtoras) e contribuem para tecidos que são deficitários em fotoassimilados (regiões drenos). Esse processo denomina-se alocação de fotoassimilados (Savage *et al.*, 2016). A taxa da alocação dos fotoassimilados definirá a produção de novas folhas e, naturalmente, o aumento do índice de área foliar (IAF) da planta. A periodicidade da alocação dos fotoassimilados, definirá a emergência e a abscisão foliar, respectivamente, e conseqüentemente o ciclo fenológico da planta. A taxa e a periodicidade da alocação dos fotoassimilados, que abrange o IAF e a fenologia, são condicionados tanto pela genética da planta quanto por fatores ambientais, como precipitação, temperatura, fotoperíodo e radiação solar, fazendo com que a planta seja um componente dinâmico da superfície terrestre (Arora, 2002).

## 2.6.2 Influência de Fatores Climáticos na Vegetação

A dinâmica da vegetação dos diferentes ecossistemas terrestres está sujeita à variabilidade climática que por sua vez influenciará na intensidade da sua capacidade de troca de água, de energia e de momento com a atmosfera. De um modo geral, a maior parte da vegetação na superfície do globo está sujeita, notadamente, à umidade no solo disponível, temperatura e radiação (Churkina e Running, 1998; Nemani *et al.*, 2003). Em locais de clima tropical, por exemplo, o crescimento vegetal será limitado pela disponibilidade hídrica anual, uma vez que a temperatura e a radiação são fatores menos limitantes no decorrer do ano (Bonan, 2015). Mesmo em florestas tropicais, em que o crescimento vegetal é limitado pela radiação devido ao excesso de nebulosidade (Huete *et al.*, 2006), durante períodos mais secos, ocorre uma queda na produção primária nessas regiões (Zhao e Running, 2010). A vegetação localizada em clima temperado, em maiores latitudes, é principalmente limitada pela temperatura, apesar da produção de biomassa ser sensível a reduções na quantidade precipitada (Potter *et al.*, 2008). Na medida em que ocorre os deslocamentos em direção a latitudes progressivamente maiores, observa-se um efeito combinado com a disponibilidade hídrica ou a radiação fotossinteticamente ativa, limitando o crescimento vegetal (Churkina e Running, 1998).

No entanto, em regiões de baixa densidade vegetal, como as regiões semiáridas, nem sempre é possível estabelecer uma relação direta entre a cobertura vegetal e os fatores climáticos. Esse fato acontece por diferentes motivos, desde questões envolvendo a eficácia dos sensores em mapeamento da cobertura vegetal (Fensholt e Proud, 2012; Mbow *et al.*, 2013) quanto pela pressão da ocupação antrópica sobre a vegetação nessas regiões (Pierre *et al.*, 2016). Em regiões semiáridas, a variabilidade intra-anual da produção vegetal é condicionada a um regime climático altamente sazonal (Hickler *et al.*, 2005), onde, não raramente, a vegetação responde por eventos

chuvosos isolados, ou pulsos de precipitação. Todavia, em muitos casos, a variabilidade da precipitação é incapaz de explicar a variabilidade observada da vegetação (Houérou *et al.*, 1988; Paruelo *et al.*, 1998), pois os modelos não conseguem reproduzir fielmente a complexidade do ciclo hidrológico e sua relação com a vegetação (Knapp e Smith, 2001; Choler *et al.*, 2001). Em alguns casos, por exemplo, uma possível sinergia entre temperatura e precipitação aumentaria a eficiência desses modelos (Fensholt e Proud, 2012).

Um dos índices que representa essa variabilidade climática intra-anual é o *El Niño Southern Oscillation* (ENSO). A fase positiva do ENSO está associada ao evento *El Niño*, quando a temperatura da superfície do oceano no Pacífico Leste está acima do normal, enquanto a ausência do fenômeno constitui o *La Niña*, quando o ENSO está na sua fase negativa. A variabilidade climática induzida pelo ENSO tem impactos diretos na distribuição global de temperatura e precipitação, alterando sensivelmente as condições ambientais da dinâmica da vegetação (Li e Kafatos, 2000; Dessay *et al.*, 2004; Snyder *et al.*, 2004; Hashimoto *et al.*, 2004; Oliveira *et al.*, 2010). A superfície terrestre contribui com grandes fluxos de CO<sub>2</sub> para atmosfera durante eventos de seca (Potter *et al.*, 2008). As secas associadas a fases positivas do ENSO aumentam a variabilidade da produção primária (Hashimoto *et al.*, 2004), promovendo uma menor produção da vegetação no nível global (Zhao e Running, 2010), sendo esse efeito mais intenso em regiões tropicais (Los *et al.*, 2001). Além disso, a interação de altas temperaturas com menor disponibilidade hídrica contribui com uma maior taxa de emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (Zhao e Running, 2010).

Outros fatores podem igualmente interferir e ocultar os efeitos climáticos da precipitação e da temperatura, como o nível de CO<sub>2</sub> atmosférico ou mudanças nos níveis de decomposição do nitrogênio (Schut *et al.*, 2015) e até mesmo atividade antrópica

efetuada na cobertura e uso do solo, como intensificação do uso da terra, fertilização, irrigação e pastoreio (Sarmah *et al.*, 2019), contribui no comportamento da dinâmica da vegetação (Jong *et al.*, 2013). Diferentes causas geram distúrbios nos ecossistemas, como os vistos acima, o que aumentam o risco de alteração na correspondente composição ou densidade de espécies e logo em sua funcionalidade, alterando o padrão de trocas de água, de energia e de *momentum* entre a superfície terrestre e a atmosfera.

A variabilidade climática intra-anual, além dos seus efeitos na produção vegetal, tem repercussão também no curso do ciclo de vida da planta, ou seja, nas datas esperadas das fases fenológicas da vegetação (Zeng *et al.*, 2013; Eastman *et al.*, 2013; Jong *et al.*, 2013). A fenologia estuda a ocorrência de eventos biológicos, vegetativos e reprodutivos, e sua relação com mudanças no meio biótico e abiótico. Tradicionalmente, estudos fenológicos são realizados a partir de observações em campo sobre o ciclo individual de cada espécie, mais especificamente sobre emergência, crescimento, emissão de folhas, senescência, florescimento, frutificação e dispersão (Morellato *et al.*, 2000). A partir de observações por satélite, é possível obter métricas derivadas dos dados de reflectância e associá-las às mudanças fenológicas das fases vegetativas em superfícies homogêneas com vegetação, como em florestas nativas, pastagens e cultivos agrícolas (Zhang *et al.*, 2003). Além disso, o que se registra por sensoriamento remoto não é o comportamento do indivíduo, mas sim o comportamento de uma dada superfície. A fase vegetativa é dividida em uma fase de crescimento ou de produção de biomassa, iniciada pela emergência foliar, e uma fase de baixa atividade metabólica ou senescência, a qual é iniciada pela abscisão foliar. A partir de séries temporais de dados espectrais é possível identificar pela forma da curva os padrões temporais de acréscimo e decréscimo de biomassa ao longo do ano.

Logo, partindo de uma série temporal NDVI, é possível extrapolar dois tipos de métricas biofísicas, ou seja, os de produtividade da vegetação, associados à área e à forma da curva e ao NDVI, e o temporal, associados ao início, duração e fim da curva do perfil temporal. Doravante serão utilizadas as nomenclaturas de métricas sazonais e de métricas fenológicas para designar cada uma delas.

### **2.6.3 Influência da Fenologia da Vegetação no Clima**

Distúrbios nos ecossistemas têm efeito imediato na estrutura física da vegetação, ou seja, na copa da vegetação ou no dossel florestal os quais resultarão em mudanças no balanço de água e de energia na superfície (Peñuelas e Filella, 2009). Como explicado acima, um desses distúrbios é a seca, que impacta, principalmente, a produção vegetal, porém, a redução na quantidade de água disponível para as plantas diminui o potencial de água na folha e conseqüentemente altera a taxa do seu metabolismo causando desvios fenológicos (Reich e Borchert, 1984; Borchert *et al.*, 2002). Os desvios na duração do período vegetativo, como a queda precoce das folhas (Wright e Cornejo, 1990) ou emissão tardia de brotos foliares, são os efeitos mais diretos da seca na fenologia da vegetação (Wright, 1991).

O índice de área foliar (IAF) é um dos principais parâmetros biofísicos que alimenta os modelos climáticos quanto ao estado da copa da vegetação e seus valores são adotados na parametrização dos processos de superfície, tais como albedo, trocas de calor sensível e latente e turbulência. A emergência foliar e a longevidade foliar na planta são atributos fenológicos com alto potencial de influência no clima, pois é pela folha que ocorrem as principais trocas gasosas da planta. Por exemplo, o período do ano de maior densidade foliar coincide com o período de queda do albedo na superfície e reduz, portanto, a temperatura da superfície terrestre (Rechid *et al.*, 2009). Pode-se

afirmar que um atraso no início do ciclo vegetativo, como propiciado por um menor volume de chuvas no início do ciclo vegetativo, poderá ter consequências climáticas principalmente em regiões de baixa densidade vegetal e que naturalmente produzem elevado albedo. Outra consequência de uma redução no volume de folhas é uma menor condutância do dossel da qual resultará um menor fluxo de calor latente e maior fluxo de calor sensível, podendo levar a uma camada limite atmosférica mais quente, mais seca e mais profunda (Bonan, 2015).

A duração total do ciclo vegetativo tem um papel relevante também no particionamento do fluxo de água na superfície terrestre. Quanto mais persistente for o IAF durante a fase vegetativa, maior será a fração da transpiração no total da evapotranspiração e, por sua vez, menor a fração de água evaporada diretamente pelo solo. Como os fluxos de água no solo e na planta são diferentes, incertezas no particionamento da evapotranspiração podem gerar consequências no total de água evapotranspirada no longo prazo. A quantidade de água interceptada pelo dossel durante a precipitação é também função do IAF. Um IAF menor, além de significar menos água evaporada diretamente do dossel (Davies-Barnard, 2014), significará uma maior taxa de água da chuva atravessando o dossel (Brando *et al.*, 2006) e atingindo o solo e, portanto, uma maior umidade superficial. Cabe lembrar que o estado de umidade superficial é uma importante variável no particionamento entre infiltração da água da chuva e escoamento superficial. Nas regiões com densa vegetação, outros efeitos climáticos podem superar os efeitos na umidade do solo, pois a parcela de água que evapora diretamente do dossel será significativamente menor (Richardson *et al.*, 2013).

## **2.6.4 Monitoramento da Fenologia da Vegetação via Sensoriamento Remoto**

### **2.6.4.1 Fenologia de Superfície**

O sensoriamento remoto é uma das formas de monitorar a fenologia da vegetação em uma ampla região, garantindo a abrangência de todo um ecossistema. Por meio de índices de vegetação obtidos por sensores óticos na faixa do visível e infravermelho próximo, é possível, com segurança, acompanhar a variabilidade sazonal de uma superfície vegetada (Reed *et al.*, 1994). Assim, ao se analisar a variabilidade anual da curva do perfil temporal e um índice espectral, pode-se identificar os períodos correspondentes à senescência e à emergência foliar, que estariam mais próximos daqueles obtidos em levantamento de campo (White *et al.*, 2009). Do acompanhamento fenológico por sensoriamento, derivou-se o termo fenologia de superfície, e, desde então, são inúmeros os trabalhos que relacionam mudanças na fenologia e sua inter-relação com o clima (Schwartz *et al.*, 2006; Brown *et al.*, 2010; Dragoni e Rahman, 2012).

Devido a uma forte relação entre temperatura e fenologia da vegetação observada em altas latitudes no hemisfério norte nas últimas décadas (Zhou e Lau, 2001; Menzel *et al.*, 2006; Jeong *et al.*, 2011), a dinâmica da vegetação nessas localidades representa importante indicador das mudanças globais em ecossistemas terrestres (Cleland *et al.*, 2007; de Beurs e Henebry, 2010). De forma geral, observou-se um aumento na atividade fotossintética como resposta a uma tendência positiva do aumento da temperatura no início da primavera e, em decorrência desse fato, o início do ciclo de crescimento é antecipado (Ivits *et al.*, 2012; Ge *et al.*, 2015). Alterações no final do ciclo da vegetação, durante o outono, são menos notórias quando observadas no

seu início, mas, quando presentes, têm efeito na duração total do ciclo de crescimento ou podem até mesmo causar um deslocamento temporal (Piao *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2012; Garonna *et al.*, 2014). Em ambiente tropical, especialmente em climas secos, a tendência da fenologia é apresentar uma maior dependência do regime de precipitação local e menor influência da temperatura e do fotoperíodo, ou seja, do total de luminosidade diária (Sanchez-Azofeifa *et al.*, 2003).

#### **2.6.4.2 Métricas Fenológicas**

As métricas fenológicas obtidas por sensoriamento remoto são importantes indicadores da variabilidade da produção vegetal na superfície terrestre devida aos fenômenos climáticos de larga escala (Brown *et al.*, 2010). Vários modelos climáticos falham ao representar com acurácia a fenologia e a sazonalidade da vegetação (Richardson *et al.*, 2013), comprometendo o papel da vegetação sobre o clima (Migliavacca *et al.*, 2012), uma deficiência que pode ser superada pelo advento do sensoriamento remoto. Desde o lançamento de sensores orbitais com imageamento global e resolução temporal diária, como as missões AVHRR e MODIS, foi possível ampliar as pesquisas que correlacionam a fenologia da superfície com o clima nos níveis continental e global. A partir de então, surgiram produtos globais associados e técnicas para extração de métricas fenológicas em séries temporais de índices de vegetação (Henebry e de Beurs, 2013). As técnicas empregam uma ampla gama de categorias derivadas, como delimitação por limiares, e taxas de variação, médias móveis, decomposição por *Fourier* e análise de componentes principais (de Beurs e Henebry, 2010). Uma outra categoria para extração de tais métricas é pelo ajuste de funções à curva do perfil temporal, funções exponenciais, gaussianas e logísticas, tendo

como vantagem, versatilidade a diferentes tipos de vegetação por se adaptarem individualmente a cada píxel e, logo, com maior potencial para a aplicações no nível global (Paruelo e Lauenroth, 1998; Tucker *et al.*, 2001; Jonsson e Eklundh, 2002; Jonsson e Eklundh, 2002; Zhang *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2006; Chu *et al.*, 2016).

## **2.7 Métodos de Avaliação de Seca**

A representação da seca pode se dar de diferentes formas. A informação temporal do fenômeno é o principal ponto de partida para estabelecer a sua variabilidade para determinado local. Se os dados de precipitação forem conhecidos em vários pontos, mapas de contorno podem ser estabelecidos. Determinada a variação espaço-temporal da seca, essa pode ser confrontada com dados de sensoriamento remoto, dados de modelo e de reanálise para confecção de mapas de anomalias climáticas e seu emprego em determinada região.

Um conceito intuitivo para a seca, e para os recursos hídricos de uma forma geral, é o de excesso e déficit de água. Corresponderia a uma expectativa acima do esperado, no caso de excesso de água como em um ano chuvoso, e a uma expectativa abaixo do esperado, no caso de déficit como em um ano de pouca chuva. Para discriminar essas duas categorias, oferta em excesso e déficit, é necessário estabelecer um limiar que pode tanto se adotar um valor arbitrário quanto uma média de longo prazo para identificar, os valores positivos e negativos de um índice de seca quanto empregar uma abordagem de natureza estatística e estocástica como implicaria o uso de quantis de probabilidade.

A partir desse ponto, a série temporal poderá ser avaliada com três métricas de fácil obtenção, nomeadamente a duração, intensidade e severidade da seca. A duração

da seca é o tempo ao longo do qual a mesma ocorre abaixo de um determinado limiar. A intensidade da seca, geralmente chamada de magnitude, é o valor médio abaixo do nível crítico. A severidade corresponde ao déficit acumulado acima do nível crítico, ou simplesmente a multiplicação entre duração e intensidade. A Figura 2.4 exemplifica a aplicação dessa técnica em uma série temporal.

### **2.7.1 Curvas de Severidade-Frequência-Área**

A avaliação de séries temporais em recursos hídricos por meio da análise da sua severidade e duração apenas não é suficiente para dimensionar a sua complexidade. Para essa finalidade, a curva de severidade-frequência-área (SFA) é empregada, permitindo descrever a relação entre a severidade da seca e a área afetada, tendo em vista um determinado período de retorno, caracterizando assim os padrões espaciais e de recorrência das secas.

Essa técnica vem sendo amplamente empregada na avaliação de secas, seja em áreas continentais, bacias hidrográficas ou regiões agrícolas (Kim *et al.*, 2002; Mishra e Singh, 2010). Comparando curvas SFA em diferentes escalas temporais, como o índice SPI para 3, 6 ou 12 meses na escala temporal, é possível estabelecer quais regiões são mais susceptíveis quanto à severidade de secas em função do seu tempo de exposição e, conseqüentemente, a que tipo de seca tal região é mais vulnerável, sejam secas agrícolas, hidrológicas ou socioeconômicas (Zhang *et al.*, 2012; Papaioannou *et al.*, 2017). Em séries históricas de longo prazo, o emprego de curvas SFA permite identificar possíveis tendências nos índices de seca, como por exemplo, se a severidade associada a uma determinada área aumenta ou decresce no longo prazo (Mishra e Singh, 2010). O emprego de curvas SFA é igualmente útil quando se deseja comparar secas observadas com secas projetadas em diferentes cenários de mudanças climáticas, o que

permite melhor conceber ou adaptar o uso do espaço em diferentes regiões de estudo (Mishra e Singh, 2010; Rajsekhar *et al.*, 2009).

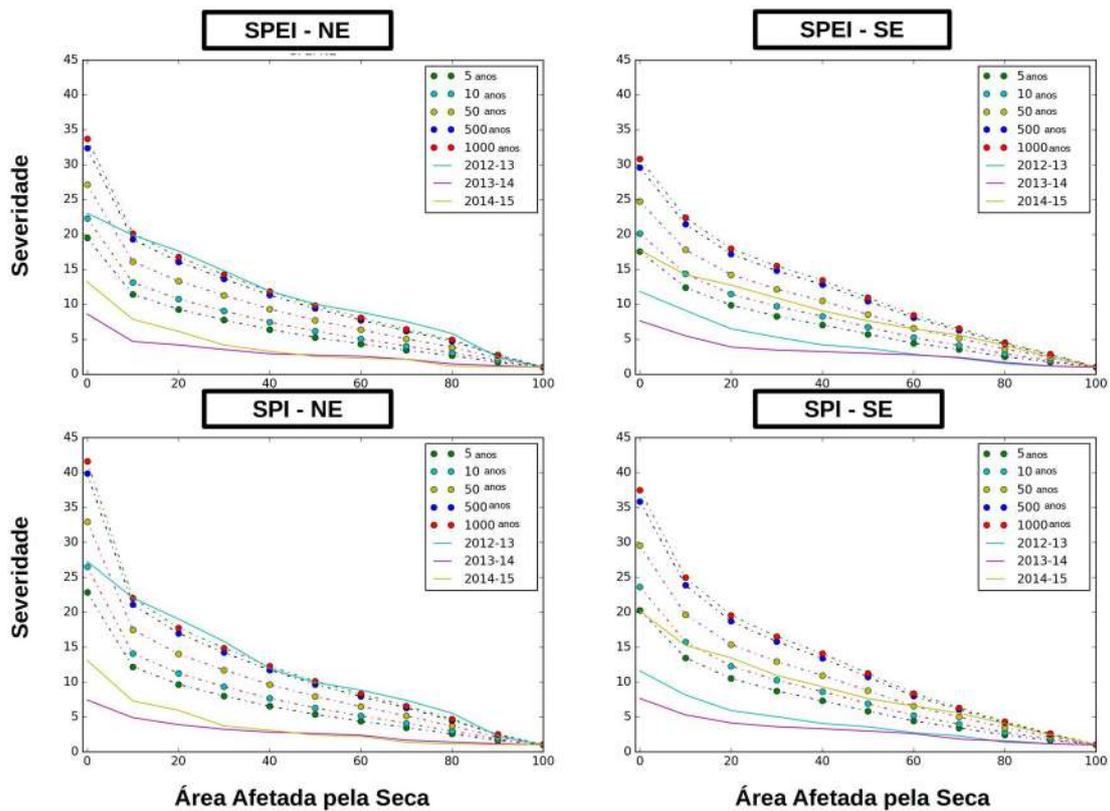
O primeiro passo para o método consiste no cálculo da severidade da seca por meio de um determinado índice, em uma determinada escala temporal e em certa região para cada ano, obtendo-se como resultado imagens de severidade de seca anuais, em que píxeis com valores positivos do índice são desconsiderados. A partir de cada mapa de severidade de seca, determina-se o valor mínimo de severidade associado a uma determinada extensão territorial. Por exemplo, para uma determinada data, 90% da área afetada pela seca tem o valor de severidade abaixo de -1, enquanto 10% da área afetada da seca tem o valor abaixo de -2. O mesmo procedimento é repetido para todas as imagens até se obter uma distribuição das frequências dos valores de severidade para cada percentual de área escolhido. Assim, para um intervalo de 10% obtém-se um total de dez (10) curvas. Por fim, ajusta-se uma distribuição estatística a cada uma das dez curvas o que permitirá obter o tempo de retorno para cada extensão de área e para o período desejado. Podem ser empregadas distribuições estatísticas como, por exemplo, as distribuições *gama*, normal ou log-normal, seguidas por um teste de hipótese como o teste Kolmogorov-Smirnov.

Curvas SFA foram calculadas para as regiões nordeste (NE) e sudeste (SE) do Brasil como análise preliminar dos estudos de seca que virão a ser empregados o longo deste estudo. Compararam-se os anos hidrológicos de 2012 a 2015, tendo-se como referência a série histórica de dados mensais de 1901 a 2012. A caracterização do período seco conjuntamente com a apresentação das regiões de estudo desta tese será detalhada nos capítulos subsequentes. Para comparar a magnitude da seca nesse período adotado, dois índices de seca, notadamente o índice de precipitação normalizado

(*Standardized Precipitation Index* – SPI) e o índice de precipitação-*evapotranspiração* padronizada (*Standardized Precipitation Index* – SPEI).

Os dados de precipitação e *evapotranspiração* potencial são oriundos da base de dados *Climatic Research Unit* (CRU). Esse conjunto de dados, denominado CRU TS versão 3.41.01, tem abrangência global de 1901 a 2015 e sofrem periódicas atualizações (Harris *et al.*, 2014). São imagens globais com resolução espacial de 0,5° e frequência mensal, oriundos de interpolação de observações diretas em estações meteorológicas. Essa fonte de dados tem importante aplicações em estudos de tendências de severidade de secas, como apresentado em Schrier *et al.* (2013), para o índice de severidade de seca de Palmer (PDSI).

A Figura 2.4 apresenta cada curva de referência de severidade-área-frequência modelada considerando o período de 2012 a 2015 para cada período de retorno (5, 10, 50, 500 e 1000 anos), em cada região (nordeste e sudeste) e para cada índice de seca (SPI e SPEI). Sobrepostas às curvas de referência, têm-se as curvas observadas para o período de 2012-2013, 2013-2014 e 2014-2015. Pelos gráficos, observa-se, com clareza, a magnitude da seca entre 2012 e 2015 para ambas as regiões. Para a região nordeste (NE), a seca de maior severidade ocorreu em 2012-2013, quando 90% da área esteve sob severidade de seca com período de retorno acima de 1000 anos. Em contrapartida, na região sudeste (SE), a seca de maior severidade ocorreu em 2014-2015, quando 80% da área esteve sob severidade de seca com período entre 10 e 50 anos. Em seguida ao período seco, ambas as regiões sofreram um intenso período úmido com 80% de suas respectivas áreas sob severidade abaixo do valor 10.



**Figura 2.4:** Curvas severidade-frequência-área para cada período de retorno e para os anos de seca severa, 2012-2013, 2013-2014 e 2013-2014, para as regiões nordeste e sudeste e os índices SPI e SPEI.

A avaliação das curvas SFA evidenciaram a severidade relativa da seca para cada região e a relevância de estudos mais profundos para cada um desses períodos. No entanto, a diferenciação entre os dois índices foi baixa. As curvas SFA para cada ano apresentaram um mesmo padrão, tanto para o SPEI quanto para o SPI, para ambas regiões de estudo. A maior diferença deu-se na amplitude das curvas de SFA para a faixa de 0 a 10% da área sob severidade. Considerando-se essa faixa, os dois índices apresentam maiores valores extremos de severidade na região NE em comparação com a região SE, pontuando-se que, entre os índices, os valores associados a maiores períodos de retorno foram superiores para SPI bem como a amplitude obtida entre os períodos de maior e menor retorno, como observado em ambas regiões. O resultado

sugere que o índice SPEI subestima a área sob seca em comparação ao SPI, o que certamente está associado ao fato do primeiro índice ser composto por duas variáveis, precipitação e evapotranspiração potencial.

### **2.7.2 Persistência da Seca**

Apesar de seus impactos na superfície terrestre, pouca ênfase nos estudos de seca é dada quanto a sua persistência temporal. Uma das consequências da sua persistência temporal é a depleção de reservatórios de água, impacto na fenologia da vegetação (Nicolai-Shaw *et al.*, 2016), impacto na produção agrícola e abandono de lavouras (Wallace *et al.*, 2017), risco de incêndios florestais (Gouveia *et al.*, 2016; Liberato *et al.*, 2017) e êxodo rural. O estabelecimento de um período de seca está normalmente associado a anomalias de transporte de umidade envolvendo processos atmosféricos de larga escala. No entanto, o prolongamento e a severidade da seca podem sofrer adicional influência da interação entre a superfície terrestre e a atmosfera (De Ridder, 1998). A redução na cobertura vegetal pode ocasionar uma maior duração da seca uma vez que essa aumenta o albedo e diminui a evapotranspiração o que reduz a oferta de água para a atmosfera e, conseqüentemente, a precipitação (Zeng, 2003). Da mesma forma, locais em que há forte retroalimentação entre a umidade do solo e a precipitação, uma redução da umidade do solo no início do verão provoca um aumento da temperatura superficial e gera menor evapotranspiração, provocando secas mais severas e mais longas (Oglesby e Erickson, 1989; Cook, 2007).

A distribuição espacial da persistência de secas é fruto principalmente da variabilidade inter e intra-anual da precipitação. Métodos estatísticos podem ser empregados para avaliar a sua frequência e estimar a sua ocorrência e tendência no longo prazo (Ganguli e Ganguly, 2016). A persistência de secas é definida como a

ocorrência consecutiva de dois ou mais eventos de seca seja durante uma mesma estação climática, quando no curto prazo, ou entre estações climáticas distintas, quando no longo prazo. A escolha do índice, bem como o limiar de severidade adotado, terá influência direta na ocorrência ou não de seca persistente (Mo e Lettenmaier, 2004; Anderson *et al*, 2013).

Secas persistentes em uma mesma estação climática podem ser modeladas facilmente através de modelos do tipo *Cadeia de Markov*, comumente empregados em hidrologia para verificar dependência em uma série temporal. Modelos de até três (3) ordens podem ser utilizados para calcular a probabilidade de transição em diferentes estados, secos e úmidos (Kottegoda *et al.*, 2004). Assim, esses modelos podem ser ajustados para examinar a persistência de dois ou mais períodos secos, intercalados ou não com períodos úmidos, em diferentes épocas do ano. Uma alternativa para examinar secas entre estações é por meio de regressão logística (Ford e Labosier, 2014; Meng *et al.*, 2017). Métodos complementares como coeficientes de persistência e duração de períodos secos podem ser encontrados em Dahale *et al.* (1994).

## Capítulo 3 – Metodologia

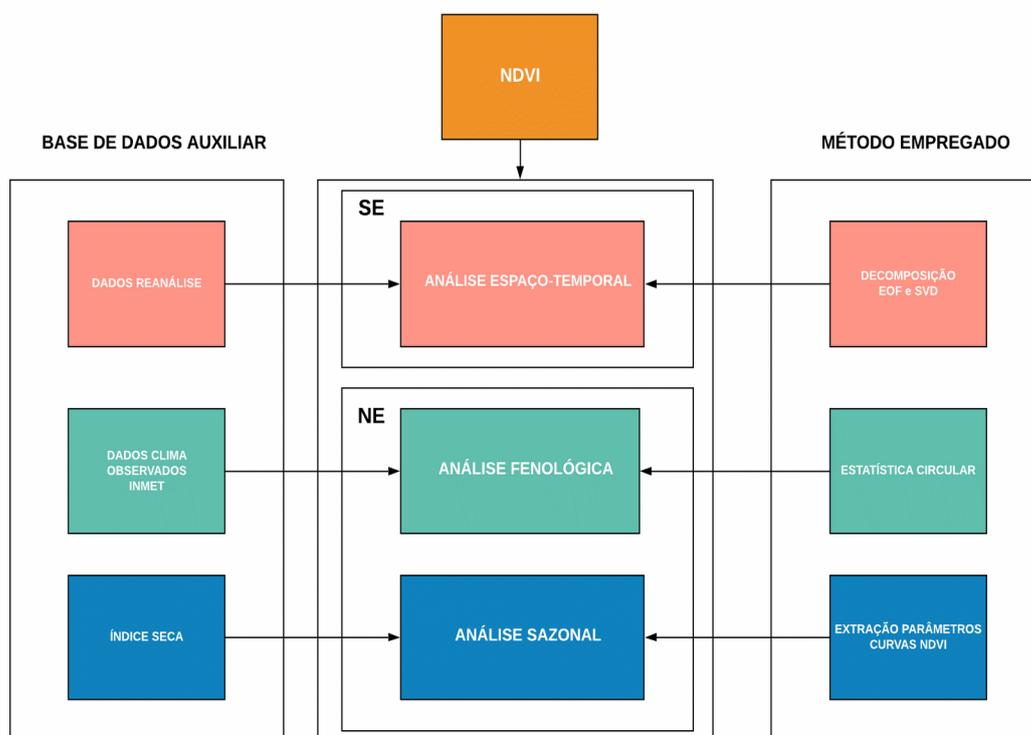
### 3.1 Considerações Gerais

O objetivo da tese está centrado no emprego de dados ópticos de sensoriamento remoto, sobretudo do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) do sensor MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) para identificar padrões de comportamento da vegetação, sobretudo sob condições de estresse hídrico, explorando os efeitos gerados por secas de diferentes intensidades. As metas estabelecidas incluem a caracterização espaço-temporal da vegetação e sua inter-relação com dados hidrometeorológicos, identificação da duração e da persistência das secas e delimitação dos impactos fenológicos da seca na vegetação.

Em função do referencial concebido, a visão geral da metodologia proposta, nesta tese, está apresentada na Figura 3.1, em que se discriminam as três (3) seguintes etapas ou blocos de avaliação: (1) análise proposta e realizada; (2) tratamento da base de dados; e (3) implementação do método de avaliação. Observe-se que, a partir de dados do índice NDVI do sensor MODIS, realizaram-se três (3) análises distintas, aqui denominadas de espaço-temporal, fenológica e sazonal, empregando, em cada uma dessas proposições, dados hidroclimáticos de natureza e fontes distintas. A especificação do produto MODIS utilizado em cada análise e o seu método de obtenção serão detalhados nos itens subsequentes.

Mais especificamente, as análises foram subdivididas em: (1) análise espaço-temporal de imagens NDVI e sua covariabilidade com dados de reanálise do modelo

NOAH-GLDAS, (2) análise da sazonalidade de parâmetros da curva de séries temporais NDVI e os efeitos da persistência temporal da seca, calculada pelo índice SPEI, segundo esses parâmetros; e, por fim, (3) uma análise fenológica da curva de séries temporais NDVI e o efeito da disponibilidade hídrica nestes parâmetros, fazendo-se uso da estatística circular. A análise referente ao item (1) foi feita utilizando toda a região de estudo, regiões nordeste e sudeste do Brasil, enquanto as análises referentes aos itens (2) e (3) restringiram-se à região nordeste.



**Figura 3.1:** Fluxograma geral da metodologia da tese.

### **3.2 Variabilidade Espaço-Temporal da Vegetação**

As análises espaço-temporais da vegetação na região leste do Brasil foram baseadas na técnica de análises de componentes principais (ACP). O conjunto de dados empregado nessa etapa incluiu a análise de todo o conjunto de imagens NDVI, englobando todo o leste do Brasil, segmentada, neste estudo, em regiões nordeste e sudeste, extraíndo-se as séries temporais individuais NDVI para cada bioma, procedendo-se de forma similar, quanto ao tratamento do conjunto de imagens de cada variável do modelo GLDAS.

A ACP é uma técnica de análise multivariada que deriva combinações lineares de um conjunto de variáveis, permitindo representar, de forma sintética, a variabilidade do conjunto de dados original. Para tanto, cada variável é reprojeta em uma base ortogonal, a fim de maximizar a variância explicada. Por essa razão, ela é denominada como componente principal (Jackson, 1991). A aplicação da ACP em um conjunto de dados com dimensão espacial tal como o dado de sensoriamento remoto, gera, como resultado, séries temporais acompanhadas da variabilidade espacial para cada componente. Essas transformações são possíveis com técnicas de decomposição por valor singular (DVS). A DVS é uma forma de decomposição matricial que pode ser tanto aplicada a um único campo espacial, como dados NDVI, quanto a dados espaciais pareados, como os dados NDVI e GLDAS.

### 3.2.1 Cálculo de Anomalias

As anomalias de séries temporais para NDVI e GLDAS foram obtidas pela média de cada píxel e usadas, quando necessário, como informação complementar pela fórmula

$$z_{i,p} = \bar{x}_{i,p} - \bar{x}_i \quad (3.1)$$

em que  $i$  e  $p$  são, respectivamente, a localização e ano,  $\bar{x}_{i,p}$  é o valor médio para cada ano e píxel e  $\bar{x}_i$  é o valor médio do píxel. As anomalias para as séries temporais foram calculadas pela expressão

$$z_{r,p} = \frac{x_p - \bar{x}_{r,p}}{\bar{s}_{r,p}} \quad (3.2)$$

em que  $r$  significa a região de interesse (nordeste/sudeste),  $p$  é o mês,  $x_p$  é a média concentrada para cada imagem mensal de NDVI and GLDAS, enquanto  $\bar{x}_{r,p}$  e  $\bar{s}_{r,p}$  são a média e desvio padrão de  $x_p$ .

### 3.2.2 Decomposição Matricial

A decomposição matricial foi realizada via DVS. A primeira etapa foi a disposição dos dados no formato  $A_{n,p}$ , em que  $n$  representa cada intervalo temporal e  $p$  cada local amostrado pela imagem de satélite. Em seguida, a matriz de dados é normalizada pela subtração de cada linha por um vetor de média da dimensão temporal, na forma  $X_{n,p} = A_{n,p} - \bar{A}_p$ . Então, a decomposição por valor singular foi calculada como

$$X = UDV^T \quad (3.3)$$

em que  $U_{n,n}$  e  $V_{p,p}$  são ambas matrizes unitárias e quadráticas de dimensão  $n$  e  $p$ , respectivamente, e  $D_{n,p}$  é uma matriz diagonal que contém os valores singulares  $\rho_{ij}$  em que  $\rho_{i,j} = \rho_i > \rho_{i+1}$ . As colunas da matriz  $U$  são autovetores da matriz de covariância da forma  $XX^T$ , enquanto que as colunas de  $V$  são autovetores de  $X^T X$ , e os autovalores  $\lambda$  são obtidos em  $D$  tal que  $\lambda_i = \rho_{i,i}^2$ .

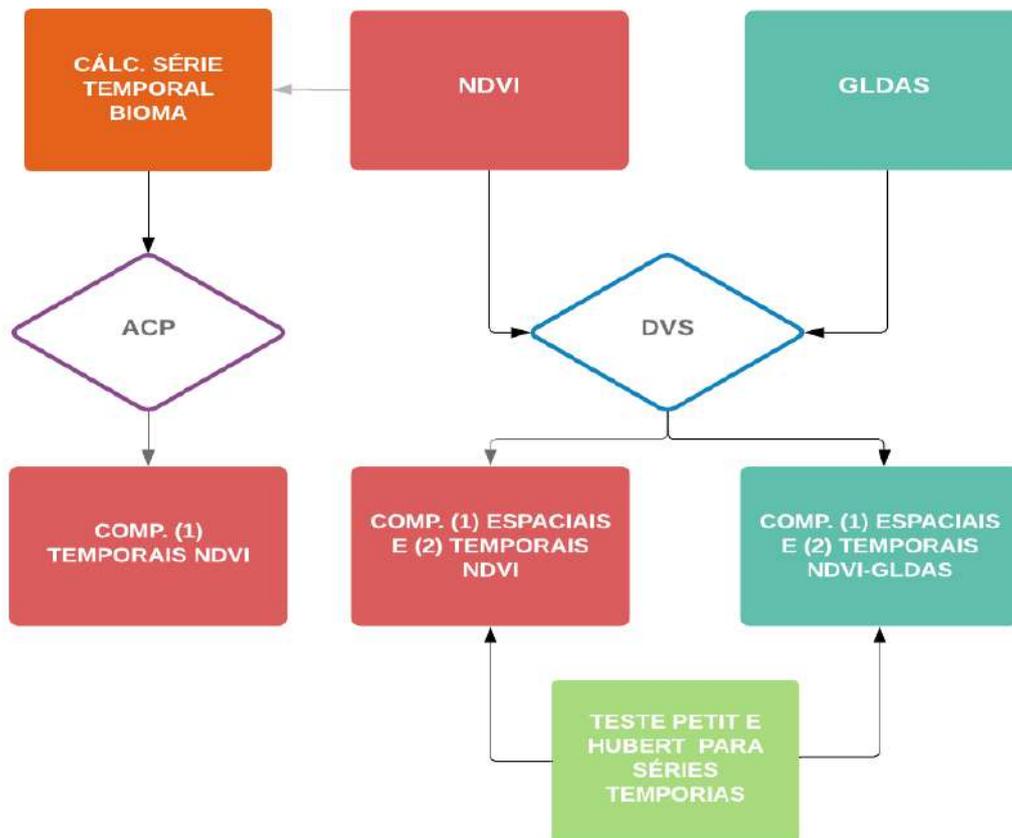
Neste estudo, inicialmente, aplica-se a decomposição por valor singular exclusivamente aos dados NDVI. Desse modo, o padrão espacial será representado pelos autovetores de  $V_{p,p}$ , que serão referidos doravante como funções empíricas ortogonais (FEO ou EOF – *Empirical Orthogonal Functions*). Esse termo é adotado quando a ACP é realizada em um conjunto de imagens em que a terceira dimensão é o domínio temporal. As séries temporais resultantes da decomposição matricial são os componentes principais, os quais são a projeção dos dados originais  $m$  nas primeiras colunas de  $XV_{p,m}$ , denominados como coeficientes expandidos.

Para a análise pareada de imagens entre os dados NDVI e GLDAS, foi calculada a matriz de covariância  $X_{p,l}$  mediante o produto vetorial de  $S_{n,p}$  e  $P_{n,l}$ , as quais referem-se ao conjunto de dados NDVI e GLDAS, respectivamente, levando a

$X = S^T P$ . As colunas das matrizes  $U_{p,p}$  e  $V_{l,l}$  correspondem aos autovetores associados a NDVI e GLDAS respectivamente, enquanto os coeficientes expandidos serão  $SU_{p,m}$  e  $PV_{l,m}$ .

Com o intuito de analisar a variância explicada por cada componente, aplicou-se o teste de Bartlett (1950) para auxiliar quanto ao número de componentes ideal a ser

analisado. O teste de estacionaridade dos coeficientes expandidos foi feito utilizando os testes de Pettitt (1979) e de Hubert *et al.* (1989). As etapas descritas estão apresentadas no fluxograma da Figura 3.2.



**Figura 3.2:** Fluxograma de análise da variabilidade espaço temporal da vegetação usando NDVI e GLDAS por meio de análise de componentes principais (ACP) e decomposição matricial (DVS), incluindo procedimentos de cálculo de anomalia e testes de estacionaridade (Petit e Hubert).

### **3.3 Métricas Sazonais e Fenológicas da Vegetação**

Nas etapas seguintes, em vez dos valores originais do índice NDVI, serão utilizadas informações derivadas do índice, extraídas da curva do seu perfil temporal, a fim de representar as variações sazonais e fenológicas da vegetação da região escolhida. A abordagem será feita exclusivamente para a região do nordeste.

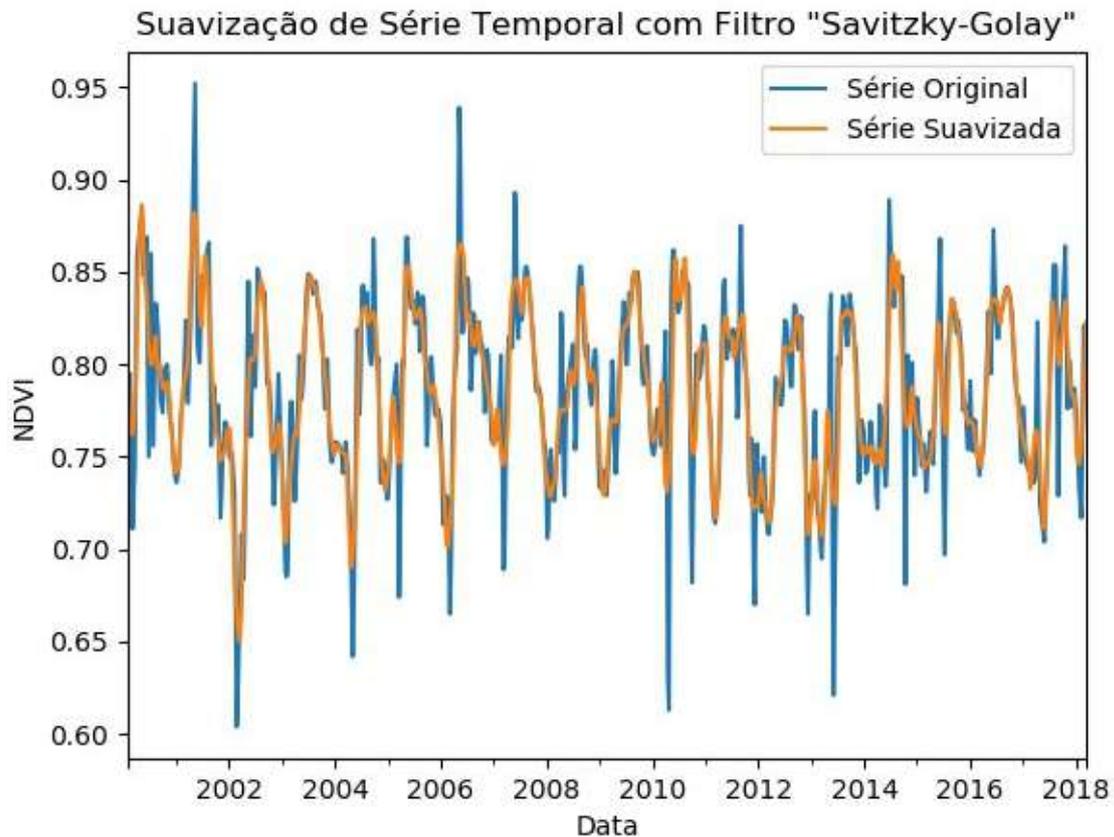
O pré-processamento dos dados iniciou-se com a seleção de valores do píxel que atendessem uma garantia mínima de qualidade, informação esta que acompanha a família de produtos NDVI do sensor MODIS. Essa etapa serve para remover os píxeis com baixa qualidade, que, em seguida, terão os seus valores substituídos por média dos seus vizinhos mais próximos circundantes, este procedimento foi aplicado em cada imagem. Uma vez obtida a série temporal reamostrada NDVI, aplicou-se o filtro *Savitzky-Golay*, que tem como objetivo reduzir o ruído no valor de cada píxel e obter séries temporais que reproduzam o padrão temporal da vegetação mais próxima da superfície. Por fim, ajustou-se uma função logística dupla a cada série temporal NDVI e, então, extraíram-se os parâmetros sazonais e fenológicos da vegetação mediante o emprego de diferentes limiares.

#### **3.3.1 Filtro *Savitzky-Golay***

O filtro do tipo Savitzky-Golay SG (Savitzky e Golay, 1964) é frequentemente adotado pela comunidade científica do sensoriamento remoto para suavização de séries de satélites multitemporais para remoção de ruído causada por fatores como o ângulo do sensor, ângulo de incidência solar, altitude e os efeitos de aerossóis (Chen *et al.*, 2004).

Uma das principais vantagens desse tipo de filtro é preservação dos valores máximos, mínimos e a amplitude do dado. O objetivo da aplicação do filtro SG é obter uma curva NDVI suavizada que possa ser interpretada. Essa é a primeira etapa na extração de métricas fenológicas e sazonais. Uma janela temporal deve ser estimada para o filtro SG, de um modo geral um período de 6 a 12 meses é aplicada à série. Esse valor é ajustado observando-se o ajuste da nova série modelada aos pontos de máximo e mínimo da série temporal original.

A Figura 3.3 apresenta uma aplicação do filtro SG, respeitando uma janela temporal de 12 (doze) meses para um grau de polinômio 2 (dois), em uma amostra de série temporal NDVI do sensor MODIS para a região de estudo. Pode-se observar, na Figura 3.3, que, após a aplicação do filtro, além da remoção dos extremos máximos e mínimos, a sazonalidade do sinal da vegetação é preservada. A suavização da série temporal NDVI é fundamental para o sucesso na aplicação dos demais algoritmos para extração dos parâmetros sazonais e fenológicos.



**Figura 3.3:** Aplicação do filtro *Savitzky-Golay* (SG), janela temporal de 12 (doze) meses e grau de polinômio 2 (dois), para suavização e remoção de ruídos em uma amostra de série temporal NDVI do sensor MODIS para a região de estudo.

A seleção dos píxeis NDVI, pelo seu nível de qualidade, gerou valores ausentes, os quais foram preenchidos por método de interpolação linear para a apropriada aplicação do filtro temporal. O filtro SG é uma convolução simplificada. Ao ser aplicado a um sinal, os coeficientes realizam um ajuste polinomial de mínimos quadrados dentro da janela de filtragem (Zhang *et al.*, 2006). Filtros de média preservam os primeiros momentos de séries temporais, entretanto, esses falham em manter os momentos de ordem superior na série filtrada (Press e Teukolsky, 1990). A vantagem da aplicação de um polinômio na filtragem pelo procedimento SG é que esse

preserva os momentos de ordem superior da distribuição dos dados e reduz o viés introduzido pelo filtro, conforme mostrado abaixo por

$$Y_j = \frac{\sum_{i=-m}^m C_i Y_{j+1}}{2m+1} \quad (3.4)$$

em que  $Y$  é o valor original de NDVI,  $j$  é o índice de execução da tabela de dados de ordenação original,  $Y_j$  é o valor de NDVI resultante,  $C_i$  é o coeficiente do filtro de SG, e  $m$  é a metade da largura da janela de suavização. O parâmetro  $m$  é o grau do polinômio de suavização e afeta os resultados de redução de ruído. Uma vez modelado o NDVI pela função do filtro SG, diversos parâmetros fenológicos e de sazonalidade podem, então, ser extraídos.

### 3.3.2 Função Logística Dupla

Nesta etapa, a série temporal NDVI será suavizada pelo filtro SG e ajustada por funções não lineares são ajustadas aos máximos e mínimos da série NDVI, já suavizada, para, em seguida, permitir a extração dos parâmetros sazonais. O objetivo dessa etapa é modelar a forma da curva do perfil temporal do NDVI e a função escolhida para essa etapa é uma função logística dupla. A função é ajustada para diferentes segmentos da série temporal NDVI, por um período correspondente a um ciclo anual, quando se espera que ocorra ao menos um pico no índice.

A forma geral da função é dada por

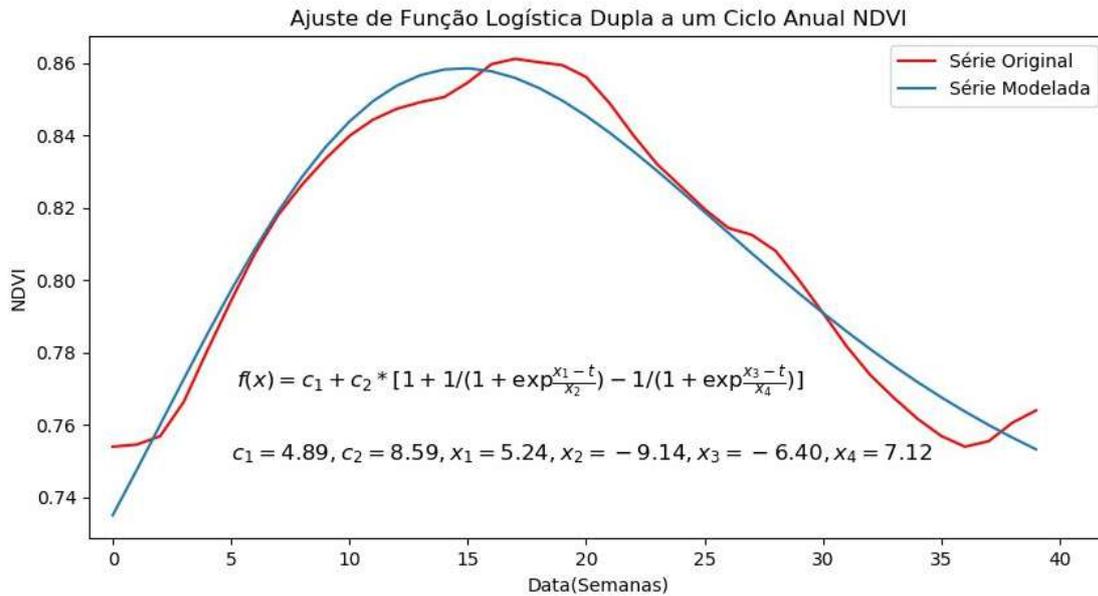
$$f(t) = f(t; c, x) = c_1 + c_2 g(t; x) \quad (3.5)$$

em que os parâmetros lineares  $c=(c_1,c_2)$  determinam o nível base e a amplitude. Os parâmetros não lineares  $x=(x_1,x_2,\dots,x_p)$  determinam a forma da função de base  $g=(t;x)$ . A fórmula da função logística que será empregada nesta tese (Jönsson e Eklundh, 2004), pode ser escrita como

$$g(t;x_1,\dots,x_4)=\frac{1}{1+\exp\left(\frac{x_1-t}{x_2}\right)}-\frac{1}{1+\exp\left(\frac{x_3-t}{x_4}\right)} \quad (3.6)$$

em que  $x_1$  determina a posição do ponto de inflexão esquerdo, enquanto  $x_2$  indica a taxa de alteração. Da mesma forma,  $x_3$  determina a posição do ponto de inflexão à direita, enquanto  $x_4$  indica a taxa de mudança nesse ponto. A estimativa dos parâmetros da fórmula acima é obtida pelo método de ajuste por mínimos quadrados. O critério para escolha dos parâmetros é a minimização do erro médio quadrático entre a curva NDVI original e a curva NDVI modelada. A obtenção dos parâmetros foi realizada por algoritmo de otimização cuja função objetivo era minimizar o erro médio quadrático.

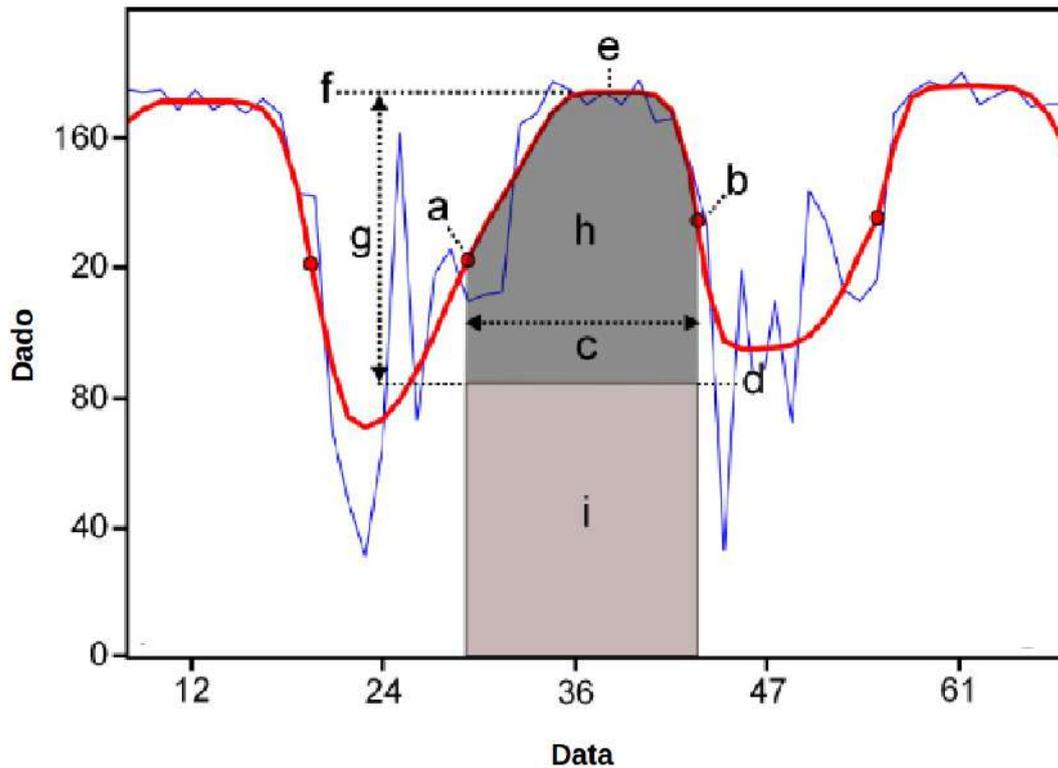
A Figura 3.4 exemplifica o ajuste dos parâmetros da função logística dupla para modelagem de um ciclo anual da série NDVI original, obtendo-se um erro médio quadrático de 0,0017. O método foi empregado sucessivamente para cada ciclo anual, com o intuito de calcular os parâmetros sazonais e fenológicos com uma frequência anual.



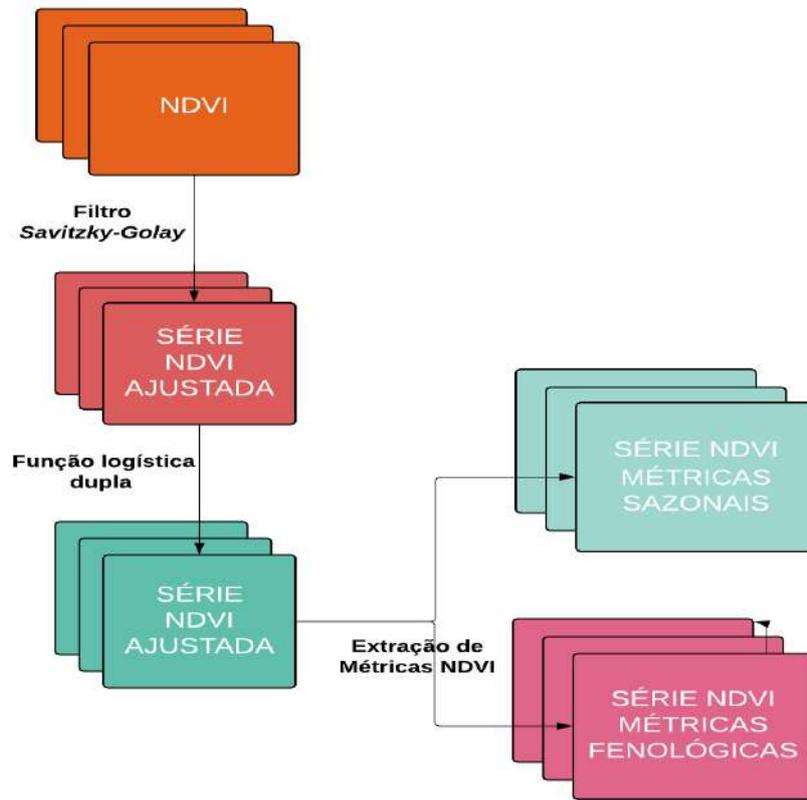
**Figura 3.4:** Ajuste da função logística dupla a um ciclo anual NDVI com erro médio quadrático de 0,0017.

### 3.3.3 Extração das Métricas da Curva NDVI

A partir do perfil da curva NDVI modelada pela função logística-dupla, prossegue-se com a extração das métricas da vegetação, fenológicas e sazonais. Conforme se pode ver na Figura 3.5, as métricas fenológicas são: (a) início do ciclo de crescimento; (b) fim do ciclo de crescimento; (c) duração do ciclo de crescimento. Por outro lado, as métricas sazonais são: (d) valor basal; (e) pico do ciclo de crescimento; (f) valor máximo; (g) amplitude e (h) integral da curva NDVI. As etapas descritas estão apresentadas no fluxograma da Figura 3.6.



**Figura 3.5:** Parâmetros da vegetação extraídos da curva NDVI; métricas fenológicas: (a) início do ciclo de crescimento; (b) fim do ciclo de crescimento; e (c) duração do ciclo de crescimento; métricas sazonais: (d) valor basal; (e) pico do ciclo de crescimento (f); amplitude (g); e (h) integral da curva NDVI. Fonte: Eklundh e Jönsson (2012).



**Figura 3.6:** Fluxograma da metodologia de extração de parâmetros sazonais e fenológicos das séries temporais NDVI.

### 3.4 Efeito da Disponibilidade Hídrica na Fenologia da Vegetação

Os parâmetros fenológicos, como o início e o final do ciclo de crescimento, são altamente sensíveis à variabilidade climática (Awaya *et al.*, 2004; Brown *et al.*, 2010). O método para definir o início do ciclo de crescimento (ICC) e o final do ciclo de crescimento (FCC) é baseado em um limiar de amplitude em cada ponto da curva. Esse limiar, em geral, varia entre 10 e 20% da amplitude do valor mínimo do NDVI, sendo o valor em questão escolhido por inspeção visual na curva NDVI. Após definidas as datas de início e final do ciclo, tem-se a delimitação da fase de duração do ciclo de crescimento (DCC). A sua duração será a diferença entre a data final e a data inicial. A ocorrência do valor máximo na função ajustada definirá a data do pico ciclo de crescimento (PCC).

Pelo método descrito acima, definem-se dois períodos relacionados à atividade da vegetação ao longo da curva do perfil temporal, ou seja, um período ativo em que ocorre o crescimento vegetativo (entre pontos 'a' e 'b' da Figura 3.5) e um segundo período inativo em que ocorre o repouso vegetativo (entre pontos 'g' e 'a' da Figura 3.5). Considerando o período ativo em dois segmentos, tem-se o primeiro (entre pontos 'a' e 'e' da Figura 3.5), quando ocorre a emissão de novas folhas (ascensão da curva de crescimento), e o segundo período (entre pontos 'e' e 'b' da Figura 3.5) quando ocorre a queda das folhas (declínio da curva de crescimento).

Na fase de crescimento vegetativo, muito provavelmente, ocorrerão, também, as fases reprodutivas da vegetação, como floração e frutificação, porém essas não são possíveis de serem registradas via sensoriamento remoto. A delimitação temporal desses dois estágios é definida por dois instantes, a saber: ICC, ponto que antecede o

crescimento da curva do perfil temporal, e o FCC, ponto que marca o fim do desenvolvimento da curva do perfil temporal. Além disso, outro ponto registrado é o PCC (ponto 'e' Figura 3.5), ponto que marca a atividade máxima da vegetação e que divide o ciclo de crescimento. Por esses pontos, consegue-se definir outras fases fenológicas, notadamente entre o ICC e o PCC, a emissão foliar, entre o PCC e o FCC, a queda foliar, e entre o ICC e o FCC, a duração total do ciclo de crescimento da vegetação (DCC).

### **3.4.1 Seleção de Pontos Amostrais NDVI**

O ponto de partida para avaliação dos parâmetros fenológicos foi a seleção de pontos amostrais de séries temporais NDVI que tiveram como referência a rede nacional de meteorologia do Instituto Brasileiro de Metodologia (INMET). Essa rede será apresentada com mais detalhes no item 5.5 da presente tese. Amostrou-se, para cada imagem NDVI, uma janela de três (3) por três (3) píxeis ao redor de cada estação meteorológica. Em seguida, excluíram-se todos os píxeis com pastagem, agricultura e áreas urbanas e armazenou-se o valor médio dos píxeis com vegetação nativa. Procedendo dessa forma, obteve-se uma única série temporal de valores médios de NDVI o mais próximos de cada estação. Esse procedimento permitiu que os parâmetros fenológicos da curva da série temporal NDVI fossem extraídos o mais próximo de dados observados.

### **3.4.2 Classificação Climática**

Os anos compreendidos entre o período de 2001 e 2018 foram classificados em anos secos e anos úmidos em função do total de precipitação durante a duração do ciclo

vegetativo. Calculou-se a média de precipitação entre o período de setembro (de um determinado ano) até agosto (do ano seguinte) a fim de melhor coincidir com o ciclo de crescimento da vegetação para a região nordeste (NE). No caso de períodos em que os registros de dados mensais de precipitação foram inferiores a oito (8) meses, não se calculou a média anual, e tal ano foi excluído.

Em seguida, os dados de precipitação anual foram escalonados em ordem crescente, separados em dois grupos com igual número de registros e classificados entre anos secos e úmidos. Adotando esse critério de separação, alguns anos com taxas normais de precipitação serão inevitavelmente incluídos em um dos dois grupos. Entretanto, as análises estatísticas subsequentes exigiam amostragens com um mínimo de oito registros em cada grupo.

Além da classificação acima definida, taxas médias anuais de precipitação (mm) e temperatura (°C) foram calculadas para comparação com a duração do ciclo vegetativo. A duração do ciclo vegetativo é compreendida entre as datas dos pontos referentes ao início e ao final do crescimento vegetativo. Foi calculado o ciclo médio da vegetação para cada ponto e obtiveram-se os meses mais prováveis de haver crescimento vegetativo. A partir desses meses, foram calculadas as taxas médias anuais de precipitação e temperatura e, então, comparadas com a duração do ciclo vegetativo.

A amostragem de dados de NDVI para fenologia foi pontual e seguiu a distribuição das estações meteorológicas de precipitação e temperatura da rede hidrometeorológica no INMET. Portanto, as séries temporais NDVI foram obtidas o mais próximo de cada estação, observando a cobertura vegetal da região e considerando o período de 2000 a 2018. Após obtenção da série temporal, os dados foram interpolados linearmente para preenchimento dos dados ausentes. Ainda com relação à série temporal NDVI, para aumentar a acurácia da extração das métricas, houve

reamostragem temporal por interpolação linear simples. Assim, para um total de 23 registros anuais, obtiveram-se 46 registros de NDVI para cada ano.

### 3.4.3 Alterações Fenológicas com Estatística Circular

Os dados em estatística circular devem ser convertidos de unidade de data para a unidade de direção angular,  $a$ , em que  $X$  foi a unidade medida em uma escala circular, e  $k$  é o total de unidades circulares, como descrito na fórmula

$$a = \frac{(360^\circ)(X)}{k} \quad (3.7)$$

Os dados de ICC, PCC e FCC, todos referentes a datas, para cada ano, foram convertidos a dados de unidade de direção angular para as análises subsequentes.

#### 3.4.3.1 Média Angular

A média angular representa a data mais provável de ocorrência do ciclo fenológico ao longo do ano. Uma amostra contendo  $n$  ângulos de  $a_1$  até  $a_n$ , terá o ângulo médio,  $\bar{a}$ , calculado pelo arco tangente, como na fórmula abaixo. Em seguida, o ângulo médio pode ser convertido de radianos para dia do ano. Seguem as expressões de cálculo:

$$\bar{a} = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) = \arctan\left(\frac{\text{sen } \bar{a}}{\text{cos } \bar{a}}\right) \quad (3.8)$$

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n \cos(a_i)}{n} \quad (3.9)$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n \text{sen}(a_i)}{n} \quad (3.10)$$

### 3.4.3.2 Variância Angular

A variância angular representa a dispersão angular em torno do ângulo médio. Para o seu cálculo, utiliza-se uma medida de dispersão  $S^2$  a partir do valor do ângulo médio,  $r$ , segundo as expressões

$$S^2 = 1 - r \quad (3.11)$$

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (3.12)$$

A média e a variância angular foram calculadas para o conjunto de dados de ICC, PCC e FCC para o período de 2001 a 2018, e, em seguida, o teste de sazonalidade *Rayleigh* foi aplicado, como documentado a seguir.

### 3.4.3.3 Teste de *Rayleigh*

O teste de *Rayleigh* foi empregado para confirmar a sazonalidade do dado, permitindo determinar a significância do ângulo médio. No caso, a hipótese nula,  $H_0$ ,

estabelece que as datas são distribuídas uniformemente (ou aleatoriamente) ao redor do círculo ou ano, isto é, há uniformidade circular ou nenhuma direção média e, conseqüentemente, nenhuma sazonalidade. A hipótese alternativa,  $H_1$ , pressupõe que as datas não são distribuídas uniformemente ao longo do ano, ou seja; há um ângulo médio significativo ou direção média, e, conseqüentemente, há alguma sazonalidade. Se  $H_1$  for aceita, maior será a concentração dos dados em torno do ângulo médio, denotada por  $r$ , que pode ser considerada uma medida do grau de sazonalidade.

#### **3.4.3.4 Diferença Média Angular e Teste de Hipótese**

Pela classificação dos anos em úmidos e secos, foi possível agrupar as métricas ICC, PCC e FCC em cada um dos dois grupos, produzindo dois grupos amostrais. Em seguida, foi calculada (1) a diferença média angular e (2) o teste não paramétrico de *Watson* nos dois grupos. A diferença média angular consistiu na simples subtração do valor médio do ano úmido em relação ao ano seco.

O teste não paramétrico de *Watson* para duas amostras foi utilizado para avaliar se as amostras de dados fenológicos em anos secos e úmidos seguiriam uma mesma distribuição. O teste de *Watson* é recomendado nos casos em que os dados analisados não se enquadram nos requisitos dos testes paramétricos de estatística circular para duas amostras ou, conforme o presente caso, quando o número de amostras for pequeno e diferente em cada grupo (Zar, 2010). Os valores críticos do teste, nesse caso, dependem do tamanho das duas amostras somadas. A recomendação é que esse tamanho seja superior a 17. A estatística  $U^2$  do teste denominado *Watson* é calculada por

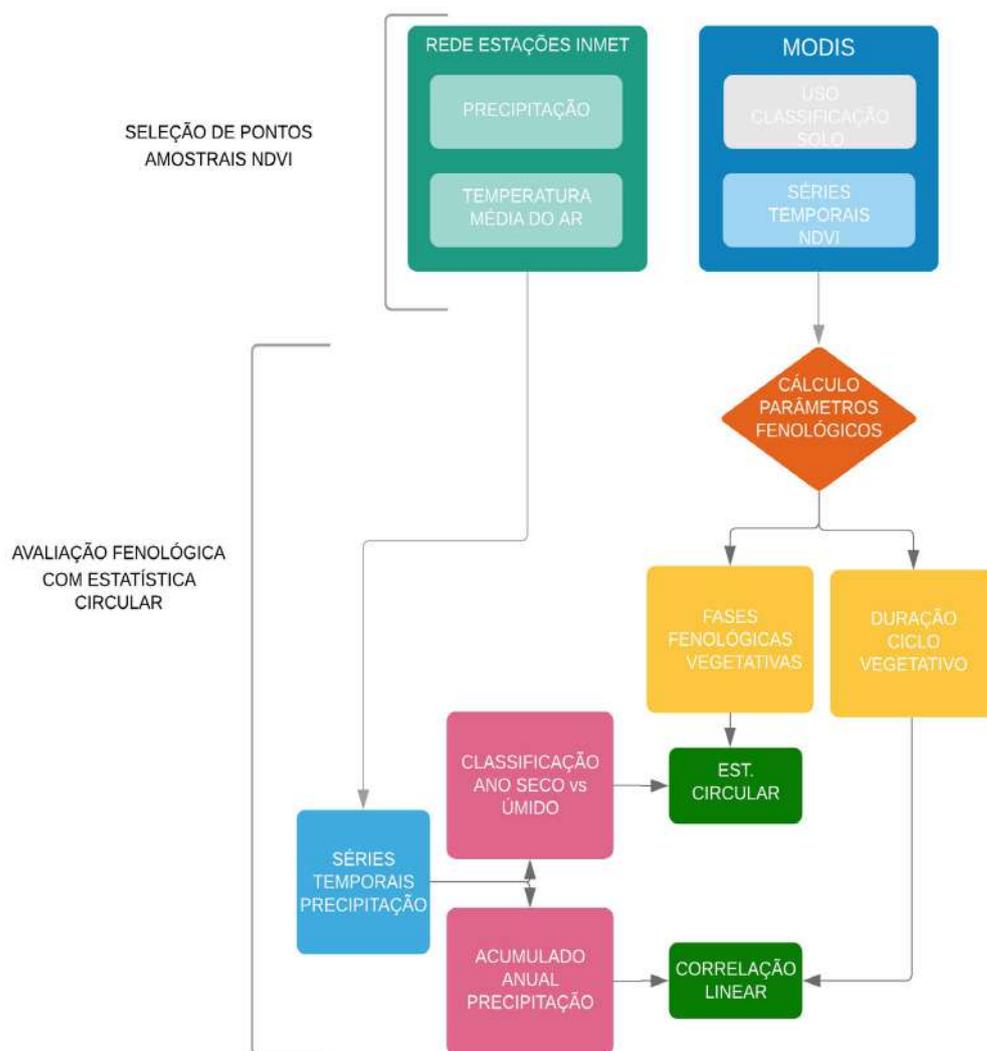
$$U^2 = \frac{n_1 n_2}{N_2} \sum_{k=1}^N (d_k - \bar{d})^2 \quad (3.13)$$

$$d_k = \frac{i}{n_1} - \frac{j}{n_2} \quad (3.14)$$

A tabela com valores críticos de  $U^2$  em função do tamanho das amostras pode ser encontrada em Mardia (1972) ou Zar (2010).

### **3.4.3.5 Relação da Duração do Ciclo da Vegetação com o Clima**

As amostras que tiveram resultado positivo para o teste não paramétrico de *Watson* foram selecionadas para comparação com a precipitação e com a temperatura. Os dados médios de precipitação e de temperatura média foram calculados entre o ICC e o FCC de cada ponto selecionado. Em seguida, foram comparados graficamente com os dados de DCC. As etapas descritas estão apresentadas no fluxograma da Figura 3.7.



**Figura 3.7:** Fluxograma da comparação de métricas fenológicas das séries NDVI e sua relação com o clima da região nordeste (NE).

### 3.5 Efeito da Duração e Persistência da Seca na Sazonalidade da Vegetação

As métricas sazonais foram extraídas da série NDVI depois de convoluídas com filtro SG e modeladas com a função logística dupla para, em seguida, obterem-se as composições anuais em forma de anomalias. As métricas sazonais são extraídas da curva NDVI para cada ciclo anual, ao longo do período de 2011 a 2015, e discretizadas para os biomas da região NE. As métricas foram transformadas em anomalias padronizadas pela expressão

$$z_p = \frac{x_p - \bar{x}_p}{s_p} \quad (3.15)$$

em que  $x_p$  são os valores anuais de cada métrica, enquanto  $\bar{x}_p$  e  $s_p$  são, respectivamente, a média e desvio padrão de cada métrica.

As métricas sazonais selecionadas e a sua descrição estão listadas abaixo:

- valor basal (BSV) - é o valor médio dos mínimos à esquerda e à direita da curva NDVI; essa é uma importante métrica sobretudo para diferenciar diferentes classes de cobertura do solo e níveis de degradação da superfície (Holm *et al.*, 2003; Davison *et al.*, 2011);
- amplitude sazonal (AMP) - é a diferença entre o valor máximo e o nível base e a média dos valores mínimos à esquerda e à direita da curva; essa variável reflete adequadamente a sazonalidade da vegetação (Davison *et al.*, 2011);

- integral menor (SIN) - integral da diferença entre a função que descreve a curva NDVI e o nível base compreendendo o início e o final do ciclo de crescimento; esse é um importante estimador da produção primária da vegetação em uma determinada região (Awaya *et al.*, 2004; Jönsson e Eklundh, 2004; Davis *et al.*, 2017);
- valor máximo (MAX) - é valor máximo da função ajustada para o ciclo de crescimento NDVI; essa é uma métrica de simples obtenção e comumente empregada em dados de sensoriamento remoto de baixa resolução radiométrica para eliminação de ruídos (Holben, 1986); de acordo com de Beurs e Henebry (2013), essa variável é sensível ao déficit hídrico e importante indicador da seca.

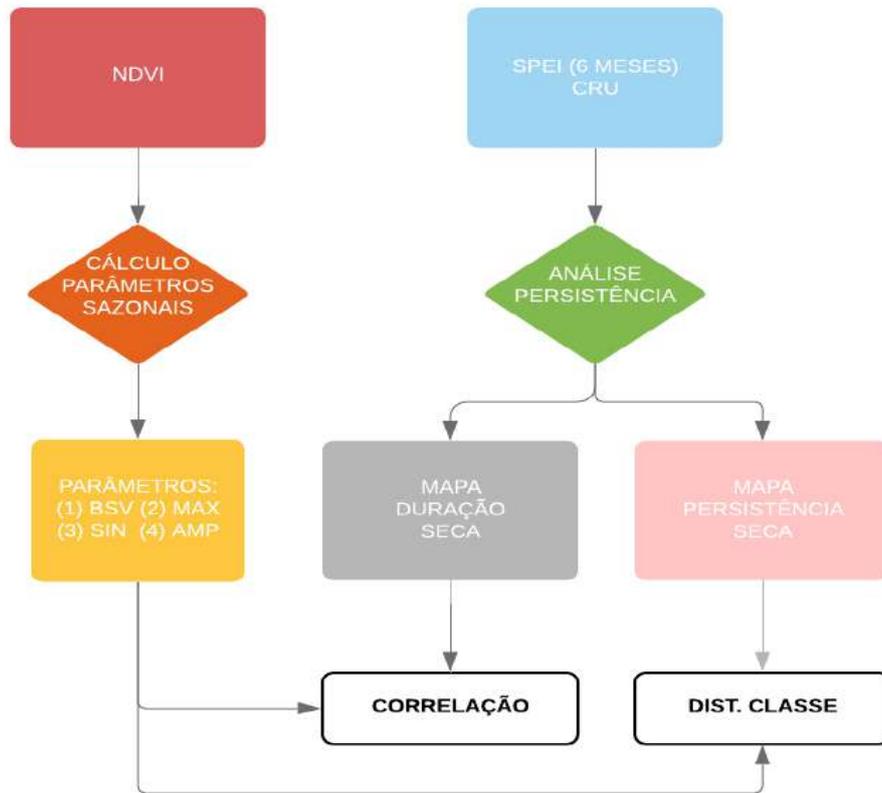
### **3.5.1 Duração da Seca**

A definição de seca deve seguir algum critério, por exemplo, como um certo limiar. Para determinar a duração da seca e, em seguida, a persistência da seca, inicialmente, classificou-se o índice SPEI para cada ano, entre 2011 a 2015. Esta classificação foi realizada somando-se o total de meses que o índice SPEI ficou abaixo de -0,25 para cada píxel. Obtendo-se assim a duração da seca, ou seja, o número de meses em que o índice SPEI permaneceu abaixo do limiar adotado para aquele ano. Esta imagem classificada será doravante denominado SPEI-ACUM (variando de zero a 12 meses). Para detectar os efeitos da duração da seca sobre a dinâmica da vegetação, mapas de correlação linear foram calculados entre o SPEI-ACUM e os parâmetros sazonais de vegetação.

### 3.5.2 Persistência da Seca

A persistência da seca ocorre quando duas estações climáticas ou dois ciclos anuais consecutivos estão sob condições de seca (Ford e Labosier, 2014). Aquelas regiões, onde as condições de seca perduram por um período de tempo, igual ou superior a seis meses, tendo o SPEI-ACUM como base, foram consideradas como secas, as quais contribuem para o estresse da vegetação. Já as regiões onde as condições de seca perduraram por menos de seis meses, são classificadas como não secas.

A análise de persistência é aplicada a cada par de anos (2012-2011, 2013-2012, 2014-2013 e 2015-2014). Se uma condição de seca não for observada no ano anterior, o píxel é classificado como uma seca não persistente (SNP). Por outro lado, se a condição de seca ocorreu em ambos os anos, o píxel é classificado como seca persistente (SP), caso contrário o píxel é classificado como não tendo sofrido seca (NS). Por fim, os valores médios dos parâmetros sazonais da vegetação para cada bioma foram calculados para cada classe de seca. As etapas descritas estão apresentadas no fluxograma da Figura 3.8.



**Figura 3.8:** Fluxograma da comparação de métricas sazonais NDVI e sua relação com a persistência da seca na região nordeste (NE).

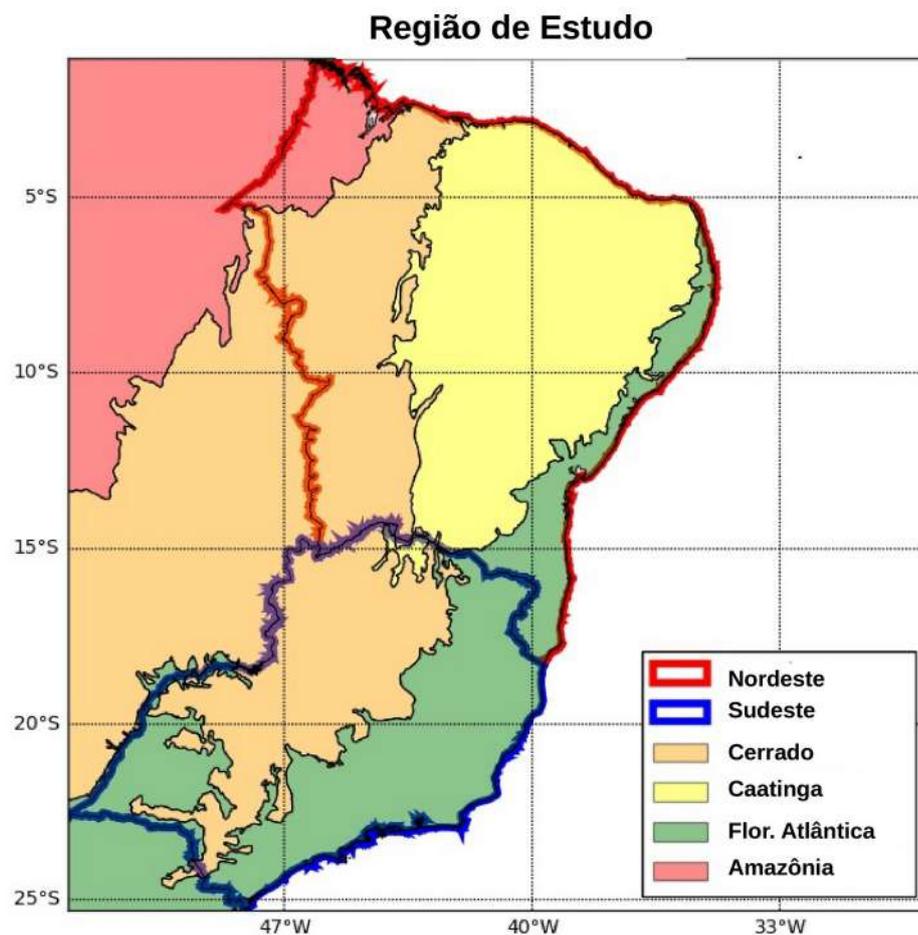
## **Capítulo 4 - Região de Estudo – Nordeste e Sudeste do Brasil**

A região contemplada por este estudo tem grande relevância nacional, seja pela sua densidade populacional, pelos seus aspectos econômicos, mas também devido a importância de cada um dos seus biomas. Entretanto, a diversidade da cobertura vegetal é uma informação, muitas vezes, negligenciada, ou pouco considerada, nos estudos de seca. Logo, esse é um dos propósitos desse capítulo, descrever a cobertura vegetal da região de estudo em detalhes. Portanto, após uma introdução geral de cada uma das regiões administrativas na seção 4.1, são descritos os biomas de cada uma delas na seção 4.2 e os aspectos climáticos mais relevantes de cada uma delas na seção 4.3.

### **4.1 Características das Regiões Nordeste e Sudeste**

A Figura 4.1 apresenta o mapa da porção leste do Brasil, com destaque para as duas regiões administrativas brasileiras que serão objeto inicial de estudo. Inserida dentro dessas regiões, está a delimitação dos biomas de acordo com a classificação pelo IBGE. As regiões sudeste (SE) e nordeste (NE) compreendem, respectivamente, quatro e nove estados da Federação, correspondendo a áreas de, respectivamente, 1.554.291 km<sup>2</sup> e 924.608 km<sup>2</sup> do território nacional. A classificação climática de *Köppen*, baseada em uma recente atualização de Alvares *et al.* (2013) para o Brasil, indica que a região SE está predominantemente em uma zona úmida subtropical em sua porção centro-sul e em uma zona tropical distribuída em parte do seu litoral e na sua porção norte. Na

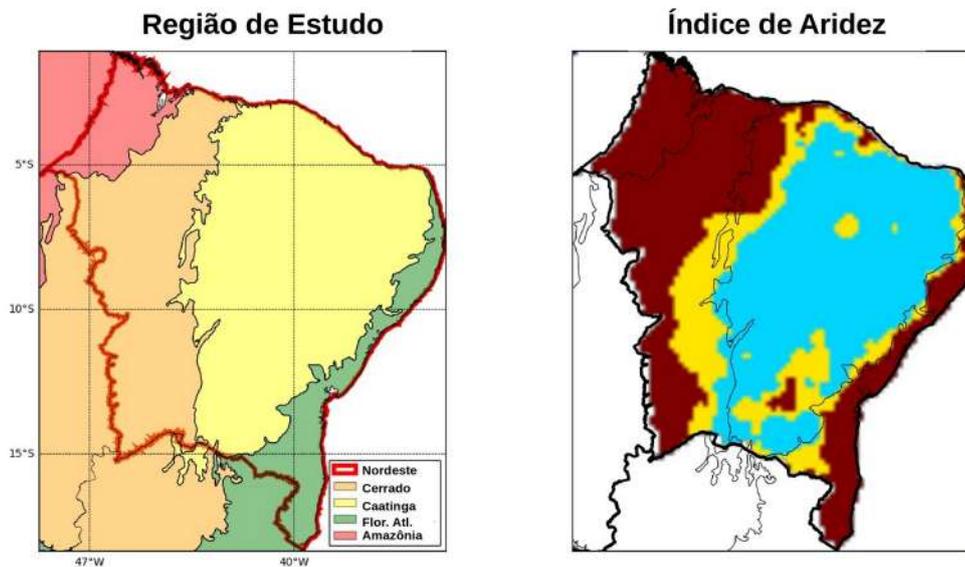
região central do NE, por sua vez, encontra-se a região semiárida a qual é envolta por uma zona tropical seca que faz a ligação entre o semiárido e o litoral nordestino. Além disso, em algumas porções do litoral do NE, como no litoral sul, encontra-se uma zona tropical úmida. Para fins de comparação, de acordo com os dados do modelo GLDAS, empregados e extraídos, nesta tese, para as duas regiões de estudo, a precipitação anual média é de 3,71 mm/dia e 2,92 mm/dia, respectivamente, para o SE e NE.



**Figura 4.1:** Regiões administrativas e biomas na porção leste do Brasil de acordo com a classificação do IBGE.

As regiões SE e NE são antagônicas em relação ao seu desenvolvimento socioeconômico. A região SE concentra maior parte do PIB *per capita* nacional em comparação com a região NE, e a diferença representa uma histórica desigualdade regional no país (Nasser, 2000). Os tipos de vegetação em ambas as regiões são igualmente distintos, entretanto, as correspondentes distribuições geográficas são intimamente relacionadas aos gradientes climáticos típicos de cada região. De um modo geral, na medida em que ocorre o afastamento do litoral em direção ao interior do continente ou rumo ao norte do país, observa-se uma queda na densidade da biomassa e da cobertura do solo em função da vegetação, bem registra-se um menor porte da vegetação.

Outra distinção entre ambas as regiões é a maior concentração urbana encontrada na região SE. As cidades do Rio de Janeiro, Belo Horizonte e São Paulo são exemplos de grandes aglomerações urbanas. Associadas a essa elevada densidade urbana, concentram-se grandes reservatórios de água que foram construídos nas últimas décadas. Pode-se dizer que a maior ameaça à seca no SE diz respeito às secas hidrológicas, e, em vez de uma preocupação em relação à seca e ao seu flagelo social, o interesse é frequentemente associado ao risco de baixos níveis de água e sua falta para geração de energia hidroelétrica e limitação quanto ao consumo interno de água (Nobre *et al.*, 2016; Ribbe *et al.*, 2019).



**Figura 4.2:** Esquerda: região NE e delimitação de cada bioma. Direita: Índice de Aridez (IA) para a região NE. Região sub-húmida ( $IA > 0,65$ , região marrom), região sub-húmida ( $0,51 > IA > 0,65$ , região amarela) e semiárida ( $IA < 0,5$ , região azul) de acordo com Vieira *et al.* (2015).

O semiárido brasileiro, localizado no NE do país, é uma das regiões áridas mais povoadas do mundo. Há décadas, os processos de secas vêm causando fome e forçam a população local no sentido da migração (Gutierrez *et al.*, 2014). A Figura 4.2 apresenta, em destaque, o mapa da região NE e seus biomas no lado esquerdo, enquanto o índice de aridez (IA) é disposto no lado direito. O IA, que consiste na relação entre precipitação e evapotranspiração potencial, bem como os limiares de discriminação do IA foram os mesmos definidos em Vieira *et al.* (2015). O maior bioma compreendido na região nordeste é a caatinga, cuja condição climática é predominantemente semiárida, com IA menor que 0,65. A ligação da caatinga com os outros biomas, ou seja, o cerrado, à esquerda, e a mata atlântica à direita, como pode ser visualizada na Figura 4.2, é marcada pela transição da condição climática semiárida para a sub-húmida, criando um

gradiente de vegetação típico. Mais distante da transição com a caatinga, na porção noroeste do mapa, localiza-se uma pequena porção do bioma amazônia.

O semiárido brasileiro possui intensa atividade antrópica e um dos principais usos do solo é a agricultura de subsistência, composta por pequenas lavouras e criação de pequenos rebanhos. Essas atividades agrícolas coexistem com a vegetação nativa da caatinga, vale dizer que trata-se de um bioma de características únicas com uma rica coleção de fauna e flora no semiárido brasileiro (Moura *et al.*, 2013). Ainda sobre a seca no NE, trata-se de uma grande preocupação ainda nos dias de hoje. Extremos climáticos, típico das regiões semiáridas, ainda assolam essa região e resultam em vários impactos socioeconômicos que tem sido relatados desde o século XIX (Campos, 2015). Diversos estudos abordam a seca meteorológica no NE e a previsibilidade da precipitação, estabelecendo relações com mecanismos de circulação em grande escala (Nobre *et al.*, 2006; Marengo *et al.*, 2018) e recentemente, com o surgimento de ferramentas de sensoriamento remoto, impactos da seca no estado da vegetação também foram igualmente associados (Santos e Negri, 1996; Barbosa *et al.*, 2007; Cunha *et al.*, 2015; Barbosa e Kumar, 2016; Barbosa *et al.*, 2019). A compreensão do clima e da vegetação é uma questão intrigante no NE, pois, nessa região, há um tipo de vegetação arbustivo composto por plantas xerófitas que desenvolveu-se adaptadas ao ambiente seco (Moura *et al.*, 2013). Além desse típico bioma, parte do uso do solo na região NE é dedicado à agricultura, assim como parte do bioma cerrado é dedicado à produção de grãos e à produção de cana-de-açúcar na costa leste.

## **4.2 Biomas da Região**

### **4.2.1 Caatinga**

A caatinga é um ecossistema único brasileiro localizado em um ambiente semiárido circundado pela amazônia, cerrado e mata atlântica. A importância desse bioma é a complexidade e diversidade de sua fauna e flora (Moura *et al.*, 2013), embora essa região seja propensa a secas causadas por flutuações naturais de chuvas e altas temperaturas (Pereira *et al.*, 2014). Esse tipo de vegetação é formado por um estrato superior com plantas baixas com galhos tortuosos e espinhos; há também a presença de cactáceas, e abaixo um estrato de gramíneas herbáceas IBGE (1997). Além dos distintos grupos de famílias botânicas presente na caatinga e no cerrado, outro elemento que as diferencia é o fato de não ser observado aglomeração densa e florestal na caatinga como no cerrado. As plantas na caatinga apresentam adaptação à escassez e irregularidade das chuvas. Nesse bioma predominam espécies arbóreas e arbustivas de pequeno porte que perdem as folhas na estação seca. No entanto, outros mecanismos de resistência a seca são também observados por outros grupos de planta. A Figura 4.3 ilustra uma paisagem do bioma caatinga.



**Figura 4.3:** Foto do bioma caatinga. Fonte: Cláudia Márcia Borges, distribuído sob a licença de *Creative Commons*; consultado no dia 7 de abril de 2020 em <https://commons.wikimedia.org>.

#### **4.2.2 Mata Atlântica**

A mata atlântica no Brasil está localizada na costa leste, compreendendo as costas das regiões NE e SE. A diversidade e distribuição das espécies da mata atlântica está ligada, sobretudo, a influência climática da linha de costa dando nome a essa floresta (Scarano, 2002). A presença de uma cadeia de montanhas adjacente a linha de costa dá origem a chuvas orográficas que são, de um modo geral, bem distribuídas ao longo do ano (Morellato *et al.*, 2000). Pode-se dividir a floresta em duas porções: uma floresta tropical perene (floresta que não perde suas folhas ao longo do curso de um ano) do lado costeiro chuvoso e do seu lado esquerdo, no interior do continente, uma floresta semidecídua (floresta que perde suas folhas parcialmente ao longo do curso de um ano),

essa última vizinha ao cerrado. A primeira porção está sob um clima úmido e quente com chuvas bem distribuídas, enquanto o segundo está sob um clima sazonal, devido a irregular distribuição das chuvas, marcadamente mais seca, geralmente, de abril a setembro (Oliveira-Filho e Fontes, 2000). Hoje, a cobertura vegetal original da mata atlântica é altamente fragmentada e reduzida devido ao desmatamento. Estima-se, por exemplo, com base de dados de 2005, que a mata atlântica possui entre 11 a 12% de área florestal remanescente (Teixeira *et al.*, 2009), resultante, principalmente, por ocupações antrópicas na região SE. A Figura 4.4 ilustra uma amostra da mata atlântica em um relevo montanhoso.



**Figura 4.4:** Foto do bioma mata atlântica. Fonte: Bjørn Christian Tørrissen, distribuído sob a licença de *Creative Commons*; consultado no dia 7 de abril de 2020 em <https://commons.wikimedia.org>.

### 4.2.3 Cerrado

O cerrado é uma vegetação savânica tropical de grande diversidade de plantas xeromorfas e que se localiza no planalto central do Brasil. O aspecto da vegetação caracteriza-se por uma estrutura composta por árvores baixas e tortuosas, isoladas ou agrupados sobre um segundo estrato formado por gramíneas herbáceas. O clima é estacional, com chuvas concentradas em um período do ano, sendo o restante do ano com clima seco, essa estação pode durar seis meses ou mais IBGE (1997). A sua vegetação desenvolve-se sob solos pobres, altamente intemperizados, resultado de longo processo de lixiviação, e com altos teores de alumínio. O cerrado possui diferentes fitofisionomias. Generalizando, pode-se dizer que esse varia de um caso extremo em que se concentram florestas altas e densas com dossel fechado sem a presença de gramíneas e com vegetação gramínea baixa sem a presença de plantas lenhosas. Outras categorias são comuns, como a mata de galeria, que acompanha os cursos de água e campos inundados (Simon e Proença, 2000). Nessa região, observa-se também os impactos da expansão agrícola. É composto por uma mistura de densas florestas de copas e pastagens (Simon e Proença, 2000). Pastagens naturais foram convertidas em pastagens plantadas e culturas agrícolas, sobretudo soja, pela remoção da cobertura vegetal seguida por mecanização (Nepstad *et al.*, 1997). A Figura 4.5 ilustra uma amostra desse bioma, onde se pode observar os dois estratos de vegetação citados anteriormente, um lenhoso mais alto e um arbustivo inferior.



**Figura 4.5:** Foto do bioma cerrado. Fonte: Jean Fábio Torres Rodrigues e distribuído sob a licença de *Creative Commons*; consultado no dia 7 de abril de 2020 em <https://commons.wikimedia.org>.

#### 4.2.4 Amazônia

O noroeste do semiárido nordestino é uma região de transição com a amazônia a que denominamos uma zona ecotonal aonde ocorre uma área de transição entre dois habitats diferentes (Santos-Filho, 2013). A zona estende-se pelos estados do Piauí e do Maranhão, onde está distribuída uma vegetação típica de babaçuais, carnaubais e buritizais e é também conhecida por mata dos cocais. Trata-se de uma região plana com florestas abertas de palmeiras em que as copas encontram-se bem espaçadas. De acordo com IBGE (1997), essa vegetação é classificada como floresta ombrófila aberta das terras baixas. A Figura 4.6 exemplifica o ecótono mata dos cocais.



**Figura 4.6:** Foto do ecótono mata dos cocais. Fonte: Rafael Drake, distribuído sob a licença de *Creative Commons*; consultado o dia 7 de abril de 2020 em <https://commons.wikimedia.org>.

## **4.3 Clima e as Secas na Região Leste do Brasil**

### **4.3.1 Região Sudeste**

A região sudeste está localizada entre as latitudes 15°S e 25°S, concentrada na faixa de clima tropical, essa elevada amplitude latitudinal lhe confere grande diversidade climática. Em função da extensa costa que margeia essa região, o efeito da maritimidade é sentido em boa parte das terras próximas ao litoral, em até 1500 km e, a medida que se adentra ao continente, os efeitos da continentalidade no clima são mais pronunciados, o ponto mais distante do litoral é de até 1.000 km. O fator geográfico é também um importante atributo climático, a diversidade do relevo, composto por serras, vales e planaltos, é responsável pela ampla gama de temperatura observada na região e por diferentes processos de formação de chuva. Como dito, pela sua extensão latitudinal, a região apresenta um clima que varia de tropical a subtropical e, no sentido longitudinal, a região é marcada por um clima mais úmido. Na porção leste da região SE, o clima é mais seco, semelhante ao clima do Brasil central.

As diferenças térmicas resultam do efeito combinado da sua extensão latitudinal com a variação altimétrica observada na região. O gradiente de temperatura segue uma distribuição norte-sul, com médias anuais mais altas no norte de Minas Gerais, onde o clima é semiárido, e no litoral leste, incluindo o Espírito Santo e Rio de Janeiro, e as temperaturas mais baixas no sul do estado de São Paulo, onde se encontra uma pequena faixa de terra abaixo do Trópico de Capricórnio e nas regiões serranas. Apesar da mesma latitude, algumas regiões diferem quanto a temperatura pelo efeito da altitude, portanto fatores locais sobrepõem-se sobre os globais, como se pode observar em regiões como aquelas compreendidas pela serras do Mar, Mantiqueira e Espinhaço (Neto, 2005).

As características geográficas descritas acima conferem igualmente a região uma intensa variabilidade espaço-temporal. A precipitação média anual observada tem uma brusca variação na região até mesmo entre regiões relativamente próximas e a temporalidade da precipitação, como o início da estação chuvosa, também varia entre as regiões. Os períodos de estação úmida e seca na região central da América do Sul são bem definidos devido ao sistema de monção. De maneira breve, a circulação atmosférica sob o regime de monção sofre mudanças sazonais em sua direção. Essa reversão dos ventos causa verões chuvosos e invernos secos (Gan *et al.*, 2009) e ocorre devido a diferente capacidade de armazenamento de calor entre o continente e o oceano. A sazonalidade da precipitação na região SE tem características de um sistema de monções, inicia-se em geral em novembro e termina em março durante o verão austral (Franchito *et al.*, 2010). A variabilidade intra-anual da precipitação é marcada por dois períodos bem distintos: um de maior abundância, no verão austral, e um de escassez ou seca, no inverno austral. A duração do período seco em relação ao período úmido aumenta do sentido sudoeste para o nordeste. Como exemplo, no norte da região sudeste, a duração do período seco alcança de 5 a 6 meses.

Em relação a circulação atmosférica, a porção mais ao sul do sudeste está mais associada a altas pressões atmosféricas, e, nesse ponto, há o encontro de massas tropicais e extratropicais produzindo chuvas frontais. São comuns também chuvas convectivas. A porção mais ao norte da região sudeste está mais associada a baixas pressões atmosféricas e sofre influência de sistemas atmosféricos de baixas latitudes como massas de ar quente de origem tropical continental e equatorial. Essa região tem influência mais discreta da frente polar, e a gênese de chuvas está mais associada a linhas de instabilidade tropicais.

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é uma faixa de nebulosidade resultante de um corredor de umidade equatorial no sentido noroeste-sudeste. Sua formação é de grande importância para o sudeste por transportar umidade para essa região durante o verão. A formação de uma ZCAS depende que uma frente fria seja bloqueada sob o sudeste alimentada pela umidade da amazônia que vem em altitude, formando um corredor de nuvens carregadas, por pelo menos 4 dias. Além disso, atuam, na região, as linhas de estabilidade do ar tropical, jatos de ar de baixos níveis vindos da amazônia e complexos convectivos de mesoescala.

Os eventos de seca que atingiram a região SE ocorreram no verão austral de 2013/2014 e 2014/2015 e início de 2015. Esse evento foi considerado como o de maior severidade em décadas. Apesar desse evento não ter causado um crise energética como ocorrido em 2001, o Sistema Cantareira sofreu um grande decréscimo do seu volume armazenado. Esse sistema é formado por seis barragens interligadas e é responsável pelo abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo, formada por seis municípios (Escobar, 2015). A redução dos níveis de abastecimento em 5-15% de sua capacidade total levaram a uma crise de consumo de água no ano de 2014 (Seth *et al.*, 2015; Coelho *et al.*, 2016a).

Os sistemas meteorológicos atuantes e geradores de precipitação na região são diversos, não havendo um único fator desencadeador da seca em 2014. Partindo-se de uma intensa fonte de calor localizada no norte e nordeste da Austrália, perturbações atmosféricas foram geradas, intensificando o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) entre o sudeste do Brasil e o Oceano Atlântico, o que provocou movimentos subsidentes de correntes de ar sobre o sudeste do Brasil. Simultaneamente, o aquecimento do Oceano Atlântico Sul, próximo à costa do sudeste do Brasil, apresentou alta correlação positiva com a queda da precipitação observada. Essa anomalia positiva

da TSM e o aumento da temperatura do ar na região sudeste contribuíram para um bloqueio atmosférico, inibindo o ingresso de frentes frias que contribuem para ocorrência de chuvas na região. Esse sistema de alta pressão com mais intensidade e maior permanência inibiu a formação da ZCAS, outro importante mecanismo responsável pelas precipitações durante o verão, contribuindo para a seca. No ano de 2015, ocorreu um novo sistema de alta pressão, mas, dessa vez, menos intenso e de menor duração, entretanto a condição de baixa umidade da superfície devido à seca do ano anterior reduziu o fluxo de umidade para a atmosfera, o que resultou em uma diminuição das chuvas (Reboita et al., 2015; Marengo et al., 2015, Coelho et al., 2016b).

#### **4.3.2 Região Nordeste**

A região NE está localizada entre as latitudes 18°S e 1°N. A topografia da região é predominantemente plana e pouco acidentada. As regiões de maior altitude encontram-se ao sul do estado da Bahia, região denominada Chapada da Diamantina, e a região denominada planalto da Borborema na região central do nordeste, entre os estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. Excluindo-se as regiões de altitude mencionadas, entre o litoral e a região central, encontra-se a depressão sertaneja.

A região NE tem sido foco de pesquisas em secas, sobretudo as secas meteorológicas, em que avalia-se a previsibilidade de precipitação ao estabelecer a relação dessa com processos de circulação em larga escala (Nobre *et al.*, 2006; Marengo *et al.*, 2018). A precipitação na região nordeste possui alta variabilidade inter-anual, uma das maiores da América do Sul, e tem forte correlação com a TSM do Pacífico e Atlântico Tropical, que são comumente utilizados como preditores para essa região (Hastenrath, 1990; Uvo *et al.*, 1998; Stern e Easterling, 1999). Dentre os fatores

climáticos que determinam essa variabilidade, estão a sua posição geográfica, o seu relevo, a natureza da sua superfície e os sistemas de pressão atuantes na região (Kayano e Sansígolo, 2009). Entretanto, de maneira geral, a variação da temperatura é baixa, não sendo a principal variável estudada para essa região.

A distribuição da precipitação total incidente na região nordeste concentra-se, de maneira geral, entre os meses de março a abril (Hastenrath, 2012; Barbosa e Kumar, 2016). Entretanto, a região caracteriza-se por três regiões com padrão sazonal de precipitação bem distintos, sendo eles: a costa leste e as porções norte e sul do semiárido nordestino (Rao *et al.*, 1993; Paredes-Trejo *et al.*, 2017).

O padrão de precipitação no litoral leste nordestino é influenciado pelas brisas marinhas que transportam nebulosidade para essa região por advecção e o total anual de chuvas chega a 1500 mm (Kayano e Sansígolo, 2009). As ondas de leste são perturbações que se formam no campo de pressão atmosférica que se verificam nos trópicos superposta à corrente dos alísios que se deslocam de oeste para leste. Essas ondas geram regiões com nebulosidade intercaladas por regiões sem nebulosidade (Varejão-Silva, 2006; Reboita *et al.*, 2010). Outros mecanismos que influenciam na precipitação no litoral do nordeste, os quais não serem detalhados, são o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis e a posição do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul.

A região central do nordeste, por sua vez, possui um padrão de precipitação bem distinto. Baixos volumes são encontrados e tem-se um clima semiárido, a precipitação anual pode chegar a 400 mm. A razão dessa baixa precipitação é a concentração de movimentos subsidentes do ar nessa região, aumentando a pressão atmosférica.

Durante o inverno, o ramo descendente da célula zonal, sentido leste-oeste, e da célula zonal, sentido norte-sul, concentram-se na região nordeste, impedindo a ascensão de ar e a formação de nuvens (Reboita *et al.*, 2012; Reboita *et al.*, 2016). Por outro lado,

durante o final do verão e início do outono, a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) encontra-se mais ao sul, fazendo com que a subsidência do ar se direcione mais ao sul da região nordeste, e a presença de ventos alísios aumenta o transporte de umidade e favorece a precipitação na região (Reboita *et al.*, 2012; Reboita *et al.*, 2016).

Portanto, a precipitação região centro-norte do nordeste está intimamente associado a posição mais austral da ZCIT que coincide com o menor gradiente inter-hemisférica da temperatura da superfície do mar (TSM) propiciando o início do ciclo chuvoso no período de março a abril (Hastenrath, 2012). As secas na região estão principalmente associadas a teleconexões com reflexos nesse gradiente da TSM e, logo, a mudanças no curso anual da ZCIT, principalmente quando há a ocorrência de oscilações térmicas nas águas do leste do Pacífico equatorial.

A ocorrência de seca no NE está, em geral, associada a variações na temperatura da superfície do Pacífico tropical expressas pelo índice ENSO, como as secas de 1998 e 2002. Entretanto, a seca de 2012 a 2015 foi excepcional, ocorrendo mesmo em um período de *La Niña*, quando mais precipitação era esperada (Marengo *et al.* 2013). A seca no NE partiu de uma anomalia de TSM no Atlântico Norte em 2012, causando o posicionamento da ZCIT mais ao norte em relação a sua posição normal, desfavorecendo, então, a precipitação na região. Já instalada a seca, o seu prolongamento deveu-se à ocorrência de um fraco evento *La Niña*, o qual, via de regra, propicia chuvas na região. O evento não foi suficiente para interromper a seca no ano de 2013. Soma-se a essa condição, a ocorrência de um evento *El Niño* em 2015, que reduziu novamente a precipitação na região (Marengo *et al.*, 2018). Essa seca foi considerada a pior dos últimos 60 anos em intensidade e magnitude, sobretudo devido a sua persistência até o ano de 2015 (Marengo e Bernasconi, 2015; Silva *et al.*, 2015).

## **Capítulo 5 - Banco de Dados – Nordeste e Sudeste do Brasil**

Este capítulo tem o intuito apresentar cada uma das fontes de dados utilizada neste trabalho, com a correspondente resolução espaço-temporal, período de amostragem, natureza do dado e instituição provedora. Esses dados foram essenciais para compreender a dinâmica da vegetação a partir dos dados de sensoriamento remoto. Na seção 5.1, estão listados os produtos de vegetação adquiridos do sensor MODIS e o procedimento de amostragem para cada um deles. Na seção 5.2, está referenciada a origem dos dados de reanálise de precipitação e de evapotranspiração potencial que se adotou para o cálculo do índice de seca precipitação-evapotranspiração potencial (SPEI). Na seção 5.3, estão listadas as variáveis hidrometeorológicas extraídas do modelo de superfície GLDAS. Os dados temáticos do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), que foram empregados na delimitação da área de estudo e da área de cobertura vegetal, são apresentados na seção 5.3, e as informações extraídas da rede meteorológica nacional INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) estão descritas na seção 5.5.

### **5.1 Sensor MODIS**

Neste estudo, foram empregados dados do sensor MODIS a bordo da plataforma Terra, adquiridos a partir de fevereiro de 2000. Selecionaram-se dados NDVI com diferentes resoluções espaciais. Inicialmente, foram capturados dados referentes ao produto MODIS MOD13C2 (período de 2000 a 2015), cuja resolução espacial é de 0,05 grau de resolução. Foi empregado em formato matricial para a área de estudo em

questão. Além disso, quando a abordagem do estudo implicou a extração da série temporal NDVI para um único ponto, utilizou-se o produto MODIS MOD13Q1 (período de 2000 a 2018). Nesse último caso, a extração da série temporal foi feita no entorno de estações meteorológicas respeitando uma distância de 100 km do centróide da sua geo-localização.

A série temporal do MOD13Q1 foi ainda reamostrada para uma escala diária partindo de uma frequência temporal bissemanal, totalizando 434 registros. O produto MOD13Q1 possui uma imagem denominada de banda de controle de qualidade. Esse critério de qualidade tem como objetivo dar maior peso àqueles píxeis com menor quantidade de ruído, menor concentração de aerossóis e sem cobertura de nuvens. Foram selecionados os píxeis da categoria "confiável" e excluídos aqueles de qualidade inferior.

Outro critério de seleção foi a classe de uso de cobertura do solo. Para tanto, contou-se com o auxílio do produto MCD12Q1, advindo do mesmo satélite, o qual contém classes de cobertura do solo do IGBP. As coberturas do solo escolhidas foram, de acordo com a classificação IGBP, as seguintes: formação arbustiva com predominância de espécies lenhosas (*shrubland*), formação arbustiva com predominância de espécies herbáceas (*open shrubland*), formação savânicas com predominância de espécies lenhosas (*woody savanna*), formação savânicas com predominância de espécies herbáceas (*savanna*) e pastagens antrópicas e naturais (*grasslands*).

## 5.2 Forçantes Meteorológicas CRU

Dados globais mensais de precipitação e de evapotranspiração potencial com resolução espacial de 0,5 grau versão CRU TS 3.1, foram recortados para a região NE abrangendo o período de 2000 a 2015. A CRU TS 3.1 fornece uma série temporal mensal de dados globais em grade com base em observações de mais de 4000 estações (Belda *et al.*, 2014). Os dados espaciais foram reamostrados para a resolução espacial de 0,05° a fim de se corresponder espacialmente com os dados derivados de NDVI.

## 5.3 Modelo GLDAS-NOAH

O modelo de superfície terrestre GLDAS foi utilizado como fonte para os dados de precipitação, evapotranspiração e umidade do solo. O modelo é forçado por um produto de precipitação derivado de uma combinação de observações terrestres e satélites pelo NOAA *Climate Prediction Center's (CPC's) Merged Analysis of Precipitation (CMAP)*, que foi ajustado para resolução temporal mensal e resolução espacial de 0,25 ° (Rodell *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2012). O modelo NOAH calcula a evapotranspiração como a soma da evaporação direta do solo, evaporação da copa e da superfície do dossel, evaporação direta da transpiração da planta e da água do solo descoberto (Chen *et al.*, 1996; Ek *et al.*, 2003). A umidade do solo é distribuída em quatro camadas a 0,1 m, 0,4 m, 1 m e 2 m de profundidade. A dinâmica da umidade do solo da camada superior é governada por infiltração, escoamento sub-superficial, difusão de gradiente, gravidade e evapotranspiração (Liu *et al.*, 2011 e 2012). Cada camada de umidade do solo foi integrada até a profundidade de 2 metros em um único valor volumétrico de umidade do solo. As séries temporais foram

padronizadas subtraindo-se a média das séries originais temporais e dividindo por seu desvio padrão, a fim de restringir sua variância ao mesmo intervalo e, portanto, tornar sua intercomparação mais direta.

#### **5.4 Dados Temáticos do IBGE**

Dados cadastrais dos limites das regiões administrativas do nordeste e do sudeste foram obtidos eletronicamente. Os dados referentes ao domínio de cada bioma foram obtidos para todo território nacional e recortados, respectivamente, para cada bioma, gerando seis (6) sub-regiões: caatinga (1), mata atlântica porção NE (2) e SE (3), cerrado porção NE (4) e SE (5) e amazônia (6).

#### **5.5 Rede de Dados do INMET**

Séries temporais de dados de precipitação e de temperatura do ar média referentes a estações meteorológicas localizadas na região NE foram obtidas eletronicamente na base de dados relativa às redes meteorológicas gerenciadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. As séries temporais utilizadas foram reamostradas por média simples de resolução temporal diária para resoluções mensal e anual, correspondentes a um período de 2000 a 2019 (20 anos). Foram excluídas aquelas estações inseridas em grandes centros urbanos e distantes da vegetação nativa ou campestre. Selecionaram-se as estações meteorológicas com poucos valores ausentes e com dados coincidentes com as séries temporais do sensor MODIS. Essas estações e seus respectivos códigos estão ilustrados no mapa da Figura 5.1.

## Estações Seleccionadas REDE INMET



**Figura 5.1:** Localização e código das estações meteorológicas seleccionadas da rede de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

# **Capítulo 6 – Variabilidade Espaço-Temporal e Sensibilidade Climática da Vegetação no Leste do Brasil**

Secas prolongadas sobre grandes áreas afetam a atividade da vegetação e ameaçam a biodiversidade dos biomas. Apesar de diversos estudos no Brasil focarem o monitoramento da vegetação na região nordeste (NE), os possíveis efeitos da seca em algumas regiões, como no sudeste (SE), são subestimadas. Portanto, objetivou-se comparar dados de longo prazo do índice NDVI, em ambas regiões, com as variáveis hidrológicas do modelo de superfície terrestre GLDAS.

O foco da análise foi a recente seca prolongada no período de 2012 a 2015, que ocorreu nas duas regiões. Os resultados demonstram que a seca afetou severamente a vegetação. Na região nordeste, onde se localiza o semiárido brasileiro, grandes áreas de vegetação estressada foram identificadas. Na região sudeste, a seca foi menos pronunciada afetando apenas pequenas áreas descontínuas.

A respeito dos biomas, as áreas dominadas pela vegetação da caatinga (CAT) e da mata atlântica (ATL) foram as mais afetadas. As séries temporais, avaliadas segundo testes estatísticos de segmentação, revelaram uma intensa queda do índice após quatro anos de relativa estabilidade, seguida por pulsos frequentes de recuperação durante o período da seca.

Entre as variáveis hidrológicas avaliadas, a precipitação e a umidade do solo foram as melhores candidatas para explicar a variabilidade espaço-temporal do NDVI,

enquanto a resposta à evapotranspiração não teve efeito tão pronunciado, principalmente na região nordeste. Os resultados da covariabilidade entre NDVI e GLDAS apontam para um maior aprofundamento visando a futura aplicação no monitoramento e na previsão da seca nos diferentes biomas brasileiros.

Uma vez realizada essa breve síntese, passa-se a expor o tema deste capítulo de forma detalhada nos itens subsequentes.

## **6.1 Introdução**

A seca é um fenômeno global, natural e episódico que é caracterizado por um período de escassez de água em uma determinada região com potencial para alterar a dinâmica da vegetação (Heumann *et al.*, 2007; Verbesselt *et al.*, 2012). Estudos recentes verificaram um aumento nas regiões afetadas pela seca nas últimas décadas por meio de modelagem computacional, o que foi confirmado por dados observados (Dai, 2012; Sheffield *et al.*, 2012). Simulações climáticas confirmam essa tendência mostrando um aumento de ocorrência de seca em diferentes regiões do globo para os anos futuros (Dai, 2012; Zarch *et al.*, 2015; Naumann *et al.*, 2018). Além disso, diferentes tipos de seca são previstos, pois podem ser causados tanto pela redução da precipitação como pelo aumento da evapotranspiração devido a temperaturas mais elevadas (Sheffield *et al.*, 2012; Trenberth *et al.*, 2014; Mukherjee *et al.*, 2018). O sensoriamento remoto por satélite é uma excelente ferramenta para mapear regiões sujeitas a condições de seca ou pela escassez de água devido a atividades humanas conforme demonstrado por Rodell *et al.* (2018).

Diversos estudos avaliaram os efeitos climáticos da vegetação no leste do Brasil (Liu *et al.*, 1994; Batista *et al.*, 1997; Gurgel e Ferreira 2003; Dessay *et al.*, 2004;

Oliveira *et al.*, 2010; Adami *et al.*, 2018) ou com foco específico na região semiárida do nordeste do Brasil (Juarez e Liu, 2001; Barbosa *et al.*, 2007; Cunha *et al.*, 2015; Barbosa e Kumar, 2016). O sinal sazonal do NDVI varia em função dos regimes de precipitação observados em cada bioma. Por exemplo, as transições entre as estações seca e chuvosa são bem distintas em biomas como a caatinga (CAT), que é muito sensível à precipitação e apresenta forte sazonalidade. Por outro lado, regiões mais úmidas, como a mata atlântica (ATL), apresentam transições entre as estações seca e úmida menos evidentes (Santos e Negri, 1996; Batista *et al.*, 1997). O cerrado (CRD), por sua vez, é um bioma de transição frequentemente observado entre terras úmidas e secas e seu sinal de NDVI é, em parte, uma resposta relacionada com o total de precipitação. A CAT tem, em geral, baixo valor de NDVI durante o período seco, mas alta amplitude anual atingindo seu valor máximo de NDVI durante o período chuvoso. Por outro lado, as regiões com vegetação densa apresentam alto NDVI e seu ciclo sazonal nem sempre acompanha as mudanças sazonais ou até mesmo a variação entre anos úmidos e secos não é tão evidente (Dessay *et al.*, 2004). Tudo isso contribui para que a identificação do efeito da seca nas condições de vegetação seja ampla e heterogênea, onde regiões úmidas e semiáridas coexistem, revelando-se ainda mais desafiador discriminar as condições da vegetação em diferentes situações de estado hídrico mediante uso de satélite.

Além da sazonalidade, a variabilidade interanual da precipitação influenciará o índice de vegetação. Nesse contexto, regiões propensas à seca como a região semiárida no NE vivenciam tais condições (Hounsou-Gbo, 2015) e o comportamento de precipitação molda a distribuição espacial do NDVI (Barbosa e Kumar, 2016). A variabilidade espaço-temporal da precipitação no NE cria três (3) regiões distintas com diferentes tempos e volumes e reflete a distribuição regional e a sazonalidade da

vegetação. Grande parte da região SE é sub-úmida no centro e cercada por um clima tropical úmido (Alvares *et al.*, 2013). A maior parte da cobertura vegetal original, como CRD e ATL, foi intensamente convertida em agricultura e pastagem. Além disso, os dados de NDVI de áreas com cultivo agrícola e precipitação são fortemente acoplados. Assim, pode-se imaginar que o NDVI da região SE será regular e altamente sazonal. Esse fato foi confirmado por Adami *et al.* (2018), que encontraram um componente forte e periódico derivado do sinal de NDVI que predomina no centro-sudoeste brasileiro.

Apesar de sua baixa resolução espacial, as imagens de satélite MODIS ainda são a melhor opção para sistemas de alerta e monitoramento de secas em escala local e regional (Rembold *et al.*, 2013). No entanto, apenas informações de sensoriamento remoto não são suficientes para antecipar anomalias da vegetação. Conseqüentemente, a busca por regiões com forte acoplamento entre o NDVI e os componentes da superfície terrestre podem maximizar a previsão de áreas afetadas por seca. Uma dessas técnicas é a análise de componentes principais que são especialmente obtidas por meio da decomposição dos dados mediante procedimento também referidos por funções empíricas ortogonais (FEO) e decomposição por valor singular (DVS). A posterior análise-espço temporal das componentes permite identificar, de forma eficiente, a influência de padrões de circulação atmosférica em larga escala na variabilidade da vegetação (Li *et al.*, 2016).

Essa mesma abordagem pode ser estendida para estudar a variabilidade climática regional e sua influência sobre diferentes coberturas de vegetação. Em escala local, a dinâmica da vegetação é forçada não apenas pela variabilidade da precipitação, mas por outros componentes do ciclo da água terrestre, como umidade do solo e evapotranspiração, que podem ajudar a explicar a variabilidade da vegetação. Uma

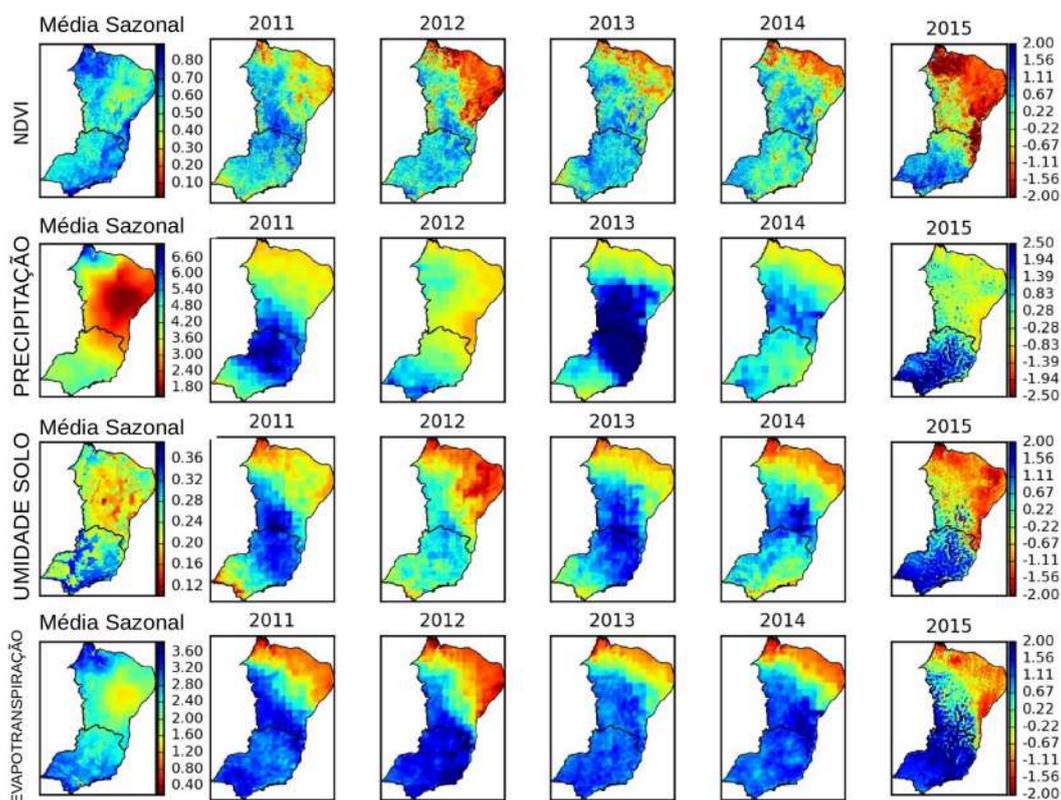
melhor compreensão de tais processos também pode ajudar a explicar as interações superfície-atmosfera locais e o papel da vegetação no clima regional (Chug e Dominguez, 2019). A seca no leste do Brasil é de grande relevância no que diz respeito à vegetação, uma vez que importantes biomas são distribuídos por essa região, e a maior parte da agricultura depende da chuva, tanto para pequenas propriedades como para áreas mais extensivas. Portanto, propõe-se, neste estudo, que as anomalias da vegetação podem vir a ser mais bem previstas no leste do Brasil se os déficits de precipitação forem acompanhados pela condição do estado da superfície terrestre, que pode ser fornecida por modelos de superfície da terra, como o GLDAS (*Global Land Data Assimilation System*).

Nesse sentido, os objetivos deste capítulo pressupõem selecionar variáveis hidrológicas, mais especificamente entre precipitação, umidade do solo e evapotranspiração, que melhor expliquem a variabilidade do NDVI no longo prazo na região leste do Brasil e avaliar procedimentos que explorem a covariabilidade entre dados hidrometeorológicos e vegetação por satélite. Para atingir esse objetivo, aplica-se, primeiramente, a ACP em um único conjunto de dados de vegetação. Em sequência, estende-se a análise para imagens pareadas da mesma data entre as variáveis hidrometeorológicas NDVI e GLDAS por meio da decomposição por valor singular (DVS) durante um período de seca severa.

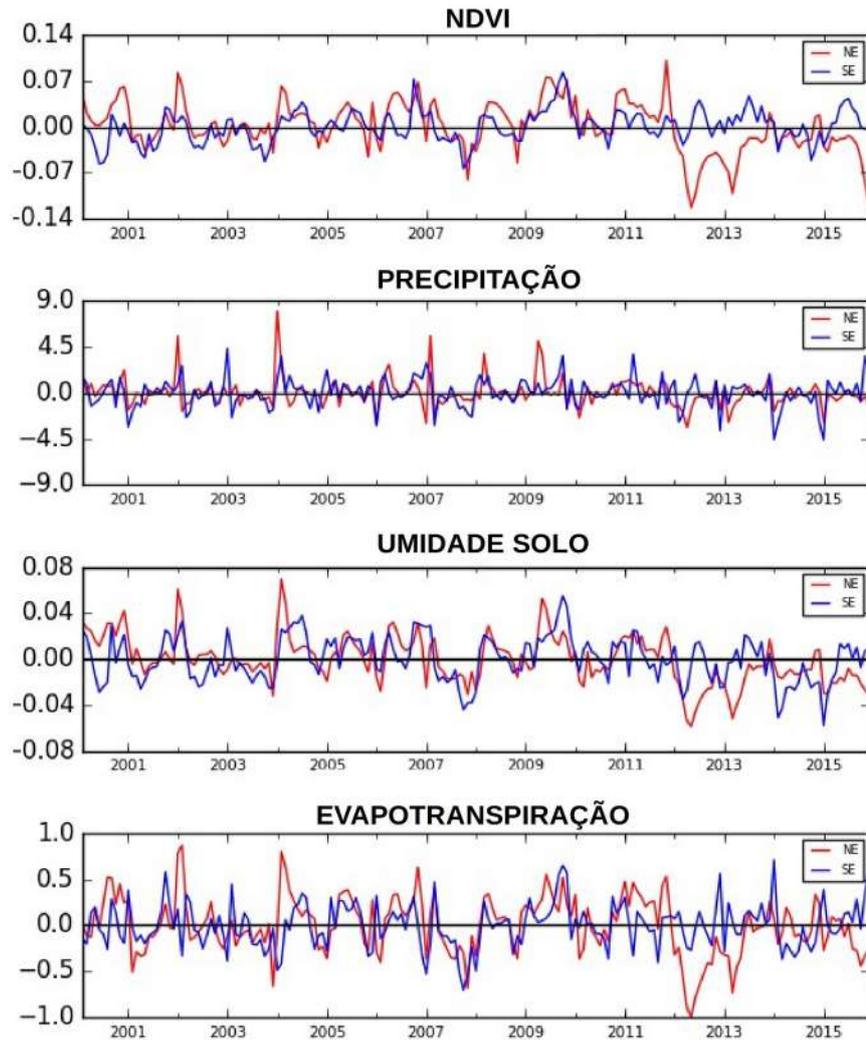
## **6.2 Variação Espaço-Temporal da Vegetação no Leste do Brasil**

As anomalias padronizadas médias anuais para NDVI, precipitação, umidade do solo e evapotranspiração são mostradas na Figura 6.1, para o período de 2011 a 2015, enquanto as séries temporais de anomalia de 2000 a 2015, para SE e NE, são

apresentadas na Figura 6.2. Todas as parcelas mostram uma mudança abrupta de NDVI e de outras variáveis iniciando predominantemente no ano de 2012. Os mapas espaciais mostram que as anomalias de NDVI foram claramente mais evidentes na região NE, com início de seca no lado leste do NE em 2011 induzida por anomalias negativas de precipitação negativas em 2012. A seca agravou-se quando a menor taxa de precipitação alcançou a zona costeira. O NDVI diminuiu continuamente nos dois anos seguintes, atingindo uma grande extensão de área em 2015, observando-se que o padrão de recuperação foi observado em 2013 e em 2014.



**Figura 6.1:** Distribuição espacial de NDVI e variáveis GLDAS - precipitação, umidade do solo e evapotranspiração.



**Figura 6.2:** Séries temporais de anomalias de NDVI e GLDAS - precipitação, umidade do solo e evapotranspiração nas regiões nordeste (NE) e sudeste (SE) do Brasil.

Mesmo sob taxas semelhantes de anomalias de precipitação negativa, ambas as regiões têm respostas de vegetação desiguais. Por exemplo, de 2011 a 2014, na porção sul da região SE, observa-se uma ligeira mudança nos valores de NDVI, mesmo sob condições de anomalias negativas de umidade do solo e de precipitação. Comparando-se com o mesmo período no norte da região SE, a resposta do NDVI é mais evidente e também abrange uma grande extensão de área.

Embora os mapas de umidade do solo e de NDVI mostrem forte correspondência em ambas as regiões, os padrões espaciais e temporais de NDVI e de evapotranspiração não são tão claros na região SE. Portanto, um padrão de interação muito mais complexo entre evapotranspiração e vegetação deve ser investigado. Se forem observadas as séries temporais na Figura 6.2, nem a evapotranspiração nem o NDVI mostram uma diminuição constante correspondente ao decréscimo da precipitação e da umidade do solo na região SE. Essa constatação pode ser igualmente observada na Tabela 6.1, que resume as inclinações do NDVI entre os meses de janeiro e dezembro de 2011 a 2015. Mesmo sob a influência dos crescentes déficits de precipitação de 2011 a 2014, pode-se observar que a anomalia do NDVI no SE foi bastante estável em relação ao início da seca no NE em 2011 e 2012, quando as inclinações negativas foram de  $-0,0265$  mm/dia e  $-0,0285$  mm/dia, respectivamente. Portanto, os padrões de anomalia de NDVI no SE não exibem um padrão monotônico de variação com umidade do solo e precipitação como na região NE, sugerindo que a representação dessas variáveis pelo modelo GLDAS para essa região podem não estar diretamente relacionada à variação do NDVI.

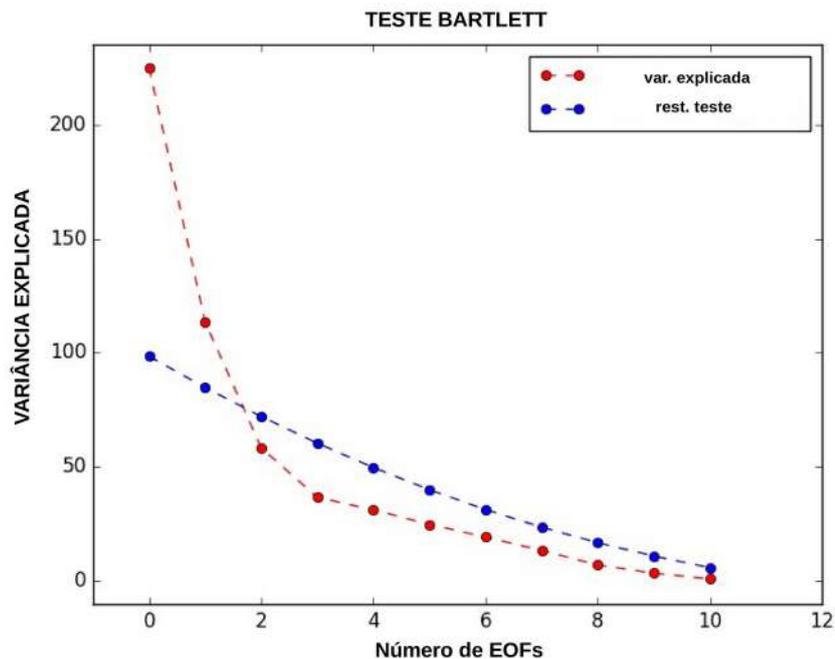
**Tabela 6.1:** Coeficiente angular de séries anuais de NDVI para as regiões nordeste (NE) e sudeste (SE) do Brasil.

<b>Ano</b>	<b>NE</b>	<b>SE</b>
<b>2011</b>	-0,0265	-0,0135
<b>2012</b>	-0,0285	-0,0011
<b>2013</b>	0,0803	0,0217
<b>2014</b>	0,0189	-0,0136
<b>2015</b>	-0,0889	0,028

Outro aspecto interessante do NDVI no NE é um padrão de oscilação duplo (lembrando o formato de sino) entre 2012 e 2013 na curva de variação do NDVI, uma vez que ambas as quedas são seguidas por um forte mecanismo de recuperação. Vale notar que a redução do NDVI foi mais forte em 2012 do que em 2013, mesmo as anomalias de precipitação e de umidade do solo sendo da mesma intensidade. Cunha *et al.* (2015) encontraram resultados semelhantes e interpretaram que esse comportamento pode ser resultado de mecanismos de recuperação e de memória que regem a dinâmica da vegetação em regiões semiáridas. A alta variabilidade intra-anual de chuvas no nordeste do Brasil, relatada por Silva (2004) poderia explicar parcialmente o mecanismo de adaptação à absorção de água pela vegetação no semiárido durante os anos úmidos e secos.

Assim, o estresse da vegetação devido ao efeito combinado de múltiplas variáveis hidrológicas não pôde ser confirmado somente via mapas de NDVI, de precipitação, de umidade do solo e de evapotranspiração para ambas as regiões. No sul da região SE, as taxas de evapotranspiração são altas em comparação com a precipitação anual total (Oliveira *et al.*, 2016), e as séries temporais GLDAS revelaram que essa taxa foi levemente reduzida durante a seca, o que ajudou a manter o padrão de esverdeamento (também referido como *greening*), tendência positiva do NDVI. Apesar das variáveis hidrometeorológicas serem mais correlacionadas com o NDVI na região NE, a taxa de recuperação observada para o NDVI pode indicar que outros fatores além do clima podem ter influenciado.

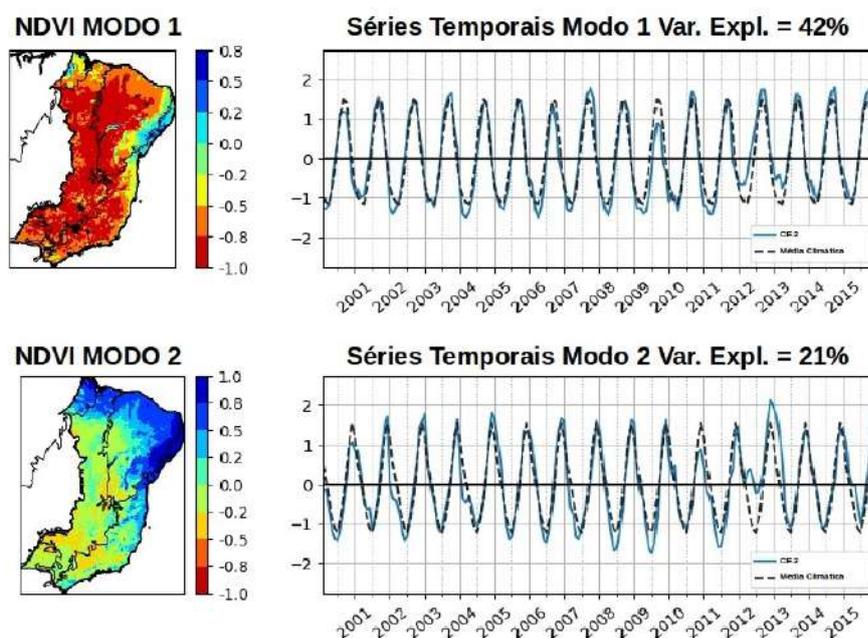
A Figura 6.3 mostra a variância explicada para as primeiras doze componentes no nível de confiança de 95% do teste de *Bartlett*. O teste indica que as duas primeiras FEOs são significativas, sendo que, juntas, elas explicam 86% da variabilidade (70% e 16%, respectivamente). A terceira e quarta componentes principais respondem por 5% e 2% da variabilidade, respectivamente. Embora ambas estejam abaixo do nível de significância, pode-se notar que a terceira componente é a mais próximo do limiar de teste. O objetivo dessa análise não foi determinar o número ideal de componentes principais a serem retidas, mas avaliar a significância de cada componente, permitindo, então, ter uma ideia clara da interpretação física do padrão espacial de cada modo FEO. Nesse sentido, decidiu-se avaliar as quatro primeiras componentes principais. Em seguida, cada par de FEOs e padrões temporais serão descritos.



**Figura 6.3:** Variância explicada, em vermelho, e significância das componentes pelo teste *Bartlett*, em azul.

A Figura 6.4 mostra os resultados do primeiro e segundo padrão espacial da FEO do NDVI e suas respectivas séries temporais. As duas primeiras FEOs respondem por 86% da variância explicada e contêm um sinal sazonal típico representando a variabilidade média do ciclo da vegetação. Os valores máximos da primeira componente ocorrem em setembro/outubro e os valores mínimos em março/abril, estando associados, principalmente, à vegetação da costa leste do NE. O período de chuvas, nessa região, tem seu pico em junho/julho (Barbosa e Kumar, 2016), de modo que um intervalo de tempo de dois a três meses é observado entre a precipitação máxima e o máximo esverdeamento (*greening*), como reportado por Gurgel e Ferreira (2003). Outra característica espacial da FEO 1, e reproduzida na FEO 2, é a ocorrência de três sub-regiões de vegetação na região NE: (1) a costa ocidental, anteriormente dominada por densa mata atlântica e atualmente por canaviais, (2) centro-oeste caatinga e (3) caatinga do norte (Gurgel e Ferreira, 2003; Magalhães, 2016). A região restante,

incluindo o domínio cerrado na região NE e toda a região SE, tem sinal negativo, indicando uma tendência de variação oposta às regiões mencionadas.

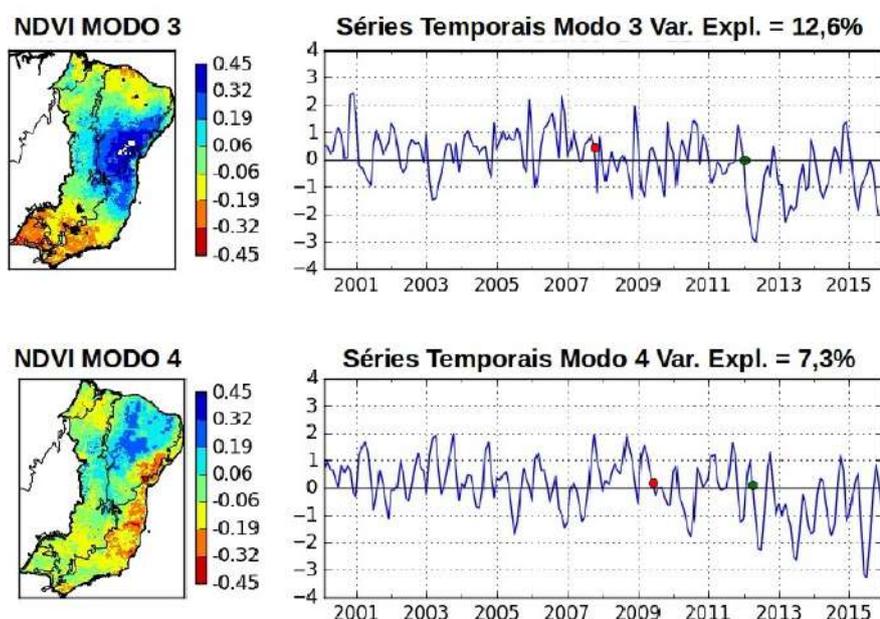


**Figura 6.4:** Primeiro e segundo modo FEO NDVI e seus respectivos coeficientes de expansão – período de 2000 a 2015.

A segunda componente tem valor máximo em dezembro/janeiro e valor mínimo em junho/julho. Altos valores positivos estão concentrados na região SE e valores moderados na porção CAT e CER da região NE. Os meses de vegetação máxima no SE correspondem ao período máximo de chuvas daquela região (Franchito *et al.*, 2010). Esse é um comportamento oposto em relação ao observado na região NE, não sendo, nesse caso, detectado qualquer intervalo temporal entre a precipitação e o crescimento da vegetação. O período chuvoso no interior da CAT tem seu pico em dezembro/abril (Barbosa e Kumar, 2016), portanto três (3) meses antes da região SE, o que pode explicar o sinal de NDVI mais fraco naquela região. Portanto, os modos FEO descrevem bem a distribuição espacial dos biomas no Brasil, bem como seus

comportamentos temporais, que são: a transição entre a costa úmida e as terras secas internas na região NE e o gradiente climático entre as regiões NE e SE.

A Figura 6.5 exhibe o padrão espacial do NDVI e os coeficientes expandidos dos modos FEOs 3 e 4. Suas séries temporais revelam um padrão não estacionário que foi analisado com o auxílio de testes de ponto de interrupção. Juntos, os dois modos explicam 19,9% da variabilidade, que é proporcionalmente pequena em comparação com FEO1 e FEO2. Em geral, as componentes de primeira ordem dos conjuntos de dados de vegetação de sensoriamento remoto indicam principalmente o comportamento de sazonalidade (Hall-Beyer, 2003; Lewińska *et al.*, 2016), também referidas como componentes estáveis (Collins e Woodcock., 1996). As componentes restantes, que respondem pela variabilidade de curto prazo, tendem a reter mudanças na superfície da terra ou anomalias climáticas (Hall-beyer, 2003; Li *et al.*, 2016). Com uma análise de longo prazo, é fácil separar as componentes estáveis e de mudança comparando suas séries temporais.



**Figura 6.5:** Terceiro e quarto modo FEO NDVI e seus respectivos coeficientes de expansão bem como os resultados para os testes de Pettitt (verde) e Hubert (vermelho).

Como explicado acima, é razoável supor que a terceira e a quarta componente sejam modos de variação de mudança, de modo que esses campos de variabilidade possam explicar as mudanças na vegetação nos últimos anos em função da menor disponibilidade hídrica. O padrão espacial do terceiro modo FEO mostra uma maior variabilidade concentrada na parte sudoeste da caatinga e em uma parte da porção norte da mata atlântica.

A região da mata atlântica no modo FEO 3 faz parte da porção norte desse bioma que se desenvolve sob clima úmido e se estende a partir de dois estados brasileiros: Bahia (na região NE) e Espírito Santo (na região SE) (Oliveira-Filho e Fontes, 2000). Essa é uma região importante para a conservação da mata atlântica, uma vez que é reconhecida com alto nível de endemismo (Coelho *et al.*, 2014; Leitman *et al.*, 2014). Embora a pastagem e a agricultura sejam as coberturas vegetais mais comuns (Landau *et al.*, 2008), essa região possui um dos maiores fragmentos de mata atlântica remanescentes principalmente no sul da Bahia (Ribeiro *et al.*, 2009).

Em comparação com o domínio da mata atlântica, observa-se menor desmatamento e conversão de cobertura vegetal na caatinga. Assim a assinatura espectral do NDVI, nessa região, tem maior contribuição da cobertura vegetal original. No entanto, regiões com vegetação da caatinga ainda são propensas ao processo de desertificação (Vieira *et al.*, 2015), principalmente devido às práticas agrícolas de derrubada e queimada (Menezes *et al.*, 2012) e degradação de pastagens (Tomasella *et al.*, 2018). A região da caatinga afetada pela seca na componente FEO 3 apresenta maior proporção de áreas antrópicas, como a agrícola, em relação à vegetação natural, considerando-se todo o bioma (Vieira *et al.*, 2013). Portanto, o abandono de plantações ou campos não plantados pode ter contribuído para a variabilidade do NDVI, que é recorrente durante a seca (Wallace *et al.*, 2017). Além disso, uma maior variabilidade

detectada pela análise das FEOs representa o efeito combinado de uma maior topografia e maior variabilidade pluviométrica observada no sul da caatinga (Barbosa *et al.*, 2019).

Como observado para FEOs 3 e 4, o NDVI da caatinga tem uma maior contribuição para a variabilidade espacial total do que as regiões da mata atlântica. Essa maior influência da caatinga pode estar relacionada à sua vegetação escassa, a maior variabilidade do índice de área foliar do que em florestas tropicais e a uma proporção maior de sua cobertura vegetal original. No entanto, outros mecanismos que podem promover uma maior variabilidade do NDVI não devem ser negligenciados para a caatinga como práticas agrícolas de corte e de queima (Menezes *et al.*, 2012), degradação de pastagens (Tomasella *et al.*, 2018), seca forçando culturas de abandono (Wallace *et al.*, 2017) ou mesmo a associação entre topografia e maior variabilidade pluviométrica observada no sul da caatinga (Barbosa *et al.*, 2019).

A série temporal associada tem valores principalmente positivos até 2007/2008, tendo sido avaliada segundo o teste de ponto de interrupção de *Pettitt*. As maiores mudanças de magnitude foram identificadas pelo teste de *Hubert* em 2012 e estão associadas ao início da seca e a um declínio significativo no NDVI. A forte diminuição do NDVI após os valores de 2012 segue a redução do total de chuvas iniciado em 2011-2012 (Figura 6.1). Posteriormente, em 2014 e no início de 2015, a taxa de precipitação registrou uma recuperação moderada, mas no final de 2015, e no início da estação chuvosa, foi drasticamente reduzida. Assim, as taxas de precipitação esperadas devem ter levado a um sinal negativo de FEO em 2015.

O padrão espacial de FEO 4 está localizado na região central do CRD. Essa região é, em certa medida, complementar ao padrão espacial observado de FEO 3, mas afeta toda a CAT. Os píxeis com sinal positivo na CAT sobrepõem-se ao mapa do índice de aridez no semiárido nordestino (Vieira *et al.*, 2015) o que gera um contraste com a

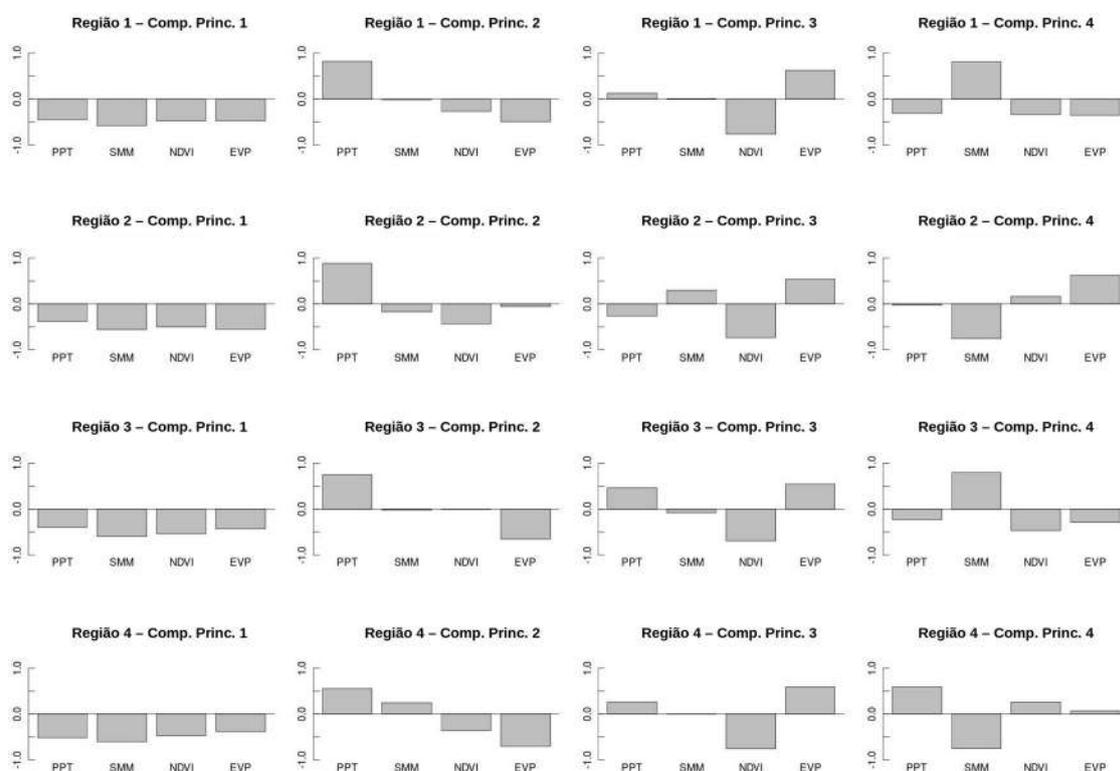
costa úmida ocidental. Essa constatação leva à conclusão de que o FEO 4 está associado principalmente à disponibilidade total de água e, em seguida, à resposta do bioma local.

Além disso, o padrão temporal do modo FEO 4 é semelhante ao FEO 3, já que é possível confirmar com ambos os testes de quebra. O teste de *Hubert* corresponde aos modos FEO 3 e 4, endossando a mudança abrupta do NDVI relacionada à escassez de água. No entanto, o teste de *Pettitt* para FEO 4 encontra a série temporal dividida em 2009, quase um ano e meio após a interrupção identificada no final de 2007 para o modo FEO 3. A Figura 6.1 mostra uma oscilação de anomalia de precipitação entre valores positivos e negativos de 2007 a 2010, correspondendo às mudanças em FEO 3 (2007) e FEO 4 (2009) detectados pelo teste de *Pettitt*. O primeiro período, compreendendo de 2007 a início de 2008, é particularmente seco e anomalias de positivas de precipitação ocorrem com alta intensidade somente em janeiro de 2008. O período seguinte é úmido, como se pode notar nas duas estações chuvosas de 2008-2009 e 2009-2010, quando as taxas de precipitação superam a precipitação média estimada de longo prazo.

### **6.3 Covariabilidade da Vegetação com Dados Hidrometeorológicos GLDAS**

As magnitudes e sinais relativos da Figura 6.6 fornecem a contribuição da variância total de todos os biomas. Observa-se que todas as séries temporais têm igual contribuição para a variabilidade total na primeira componente. Ter o mesmo sinal implica que cada variável está em fase. Esse fato é tipicamente observado na hidrologia de superfície, onde a vegetação responde à entrada de água por precipitação, à absorção de água no solo e, portanto, a mudanças na umidade e evapotranspiração do solo.

Magnitudes semelhantes observadas para cada variável podem ser explicadas pela forte sazonalidade imposta pelo clima em condições tropicais onde a atividade da vegetação é, principalmente, ditada pela disponibilidade de água.



**Figura 6.6:** Peso de cada componente principal para NDVI, precipitação, umidade do solo e evapotranspiração para cada região; região de 1 a 4 – mata atlântica (1), caatinga (2), cerrado (3) e amazônia (4).

A precipitação é uma das principais variáveis da segunda componente que contribui para a variabilidade total em todos os biomas, sendo os maiores pesos na ATL, CAT, CRD e AMZ (0,82; 0,88; 0,75 e 0,55, respectivamente). A evapotranspiração aparece como o segundo processo principal envolvido no ciclo hidrológico superficial e é inversamente proporcional à precipitação, exceto na CAT. Considerando a porção norte do leste do Brasil, a evapotranspiração é limitada pela água, pois na porção sul ela tende a ser limitada por energia. Nesta última região, a evapotranspiração é restringida

durante o inverno pelas temperaturas mais baixas (Allen *et al.*, 2010; Seneviratne *et al.*, 2010).

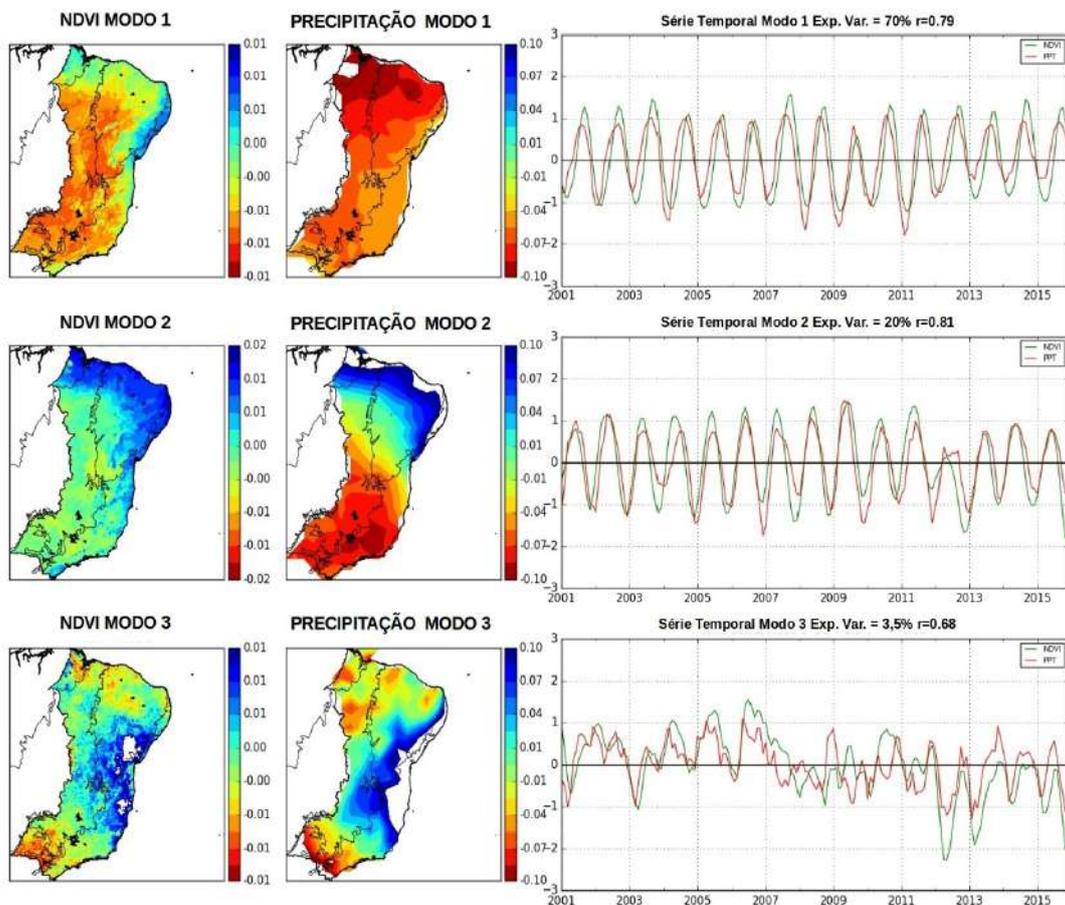
Com base nessa afirmação, poder-se-ia esperar que em regiões úmidas as o peso das componentes de evapotranspiração e de precipitação teriam sinais opostos da mesma magnitude, indicando que não estão concentradas no mesmo período. Essa constatação explica, em parte, porque a evapotranspiração não está em fase oposta à precipitação na região da CAT. No entanto, a contribuição da evapotranspiração para a variabilidade total na CAT é baixa em comparação com o NDVI, que também está em fase oposta com a série temporal de precipitação. Um possível motivo é a alta adaptação de plantas na CAT a ambientes secos e tropicais, seja pela capacidade de emergência foliar dessas durante o período seco ocasionado, principalmente, pelas chuvas esporádicas no início do período chuvoso (Machado *et al.*, 1997) ou pela capacidade de armazenamento de água no lenho por algumas espécies perenes (Lima e Rodal, 2010).

A terceira componente principal é menos dominada pela precipitação, mas é mais influenciada pelo NDVI e pela evapotranspiração, que são responsáveis por grande parte da variabilidade. A quarta componente principal tem uma contribuição maior da umidade do solo, e a contribuição relativa das outras variáveis difere em cada classe (*cluster*) de bioma. Vale a pena notar que as componentes de alta ordem, como a quarta componente, são responsáveis por menor variabilidade. Nesse caso, ela varia de 5 a 15% e, portanto, não será interpretada.

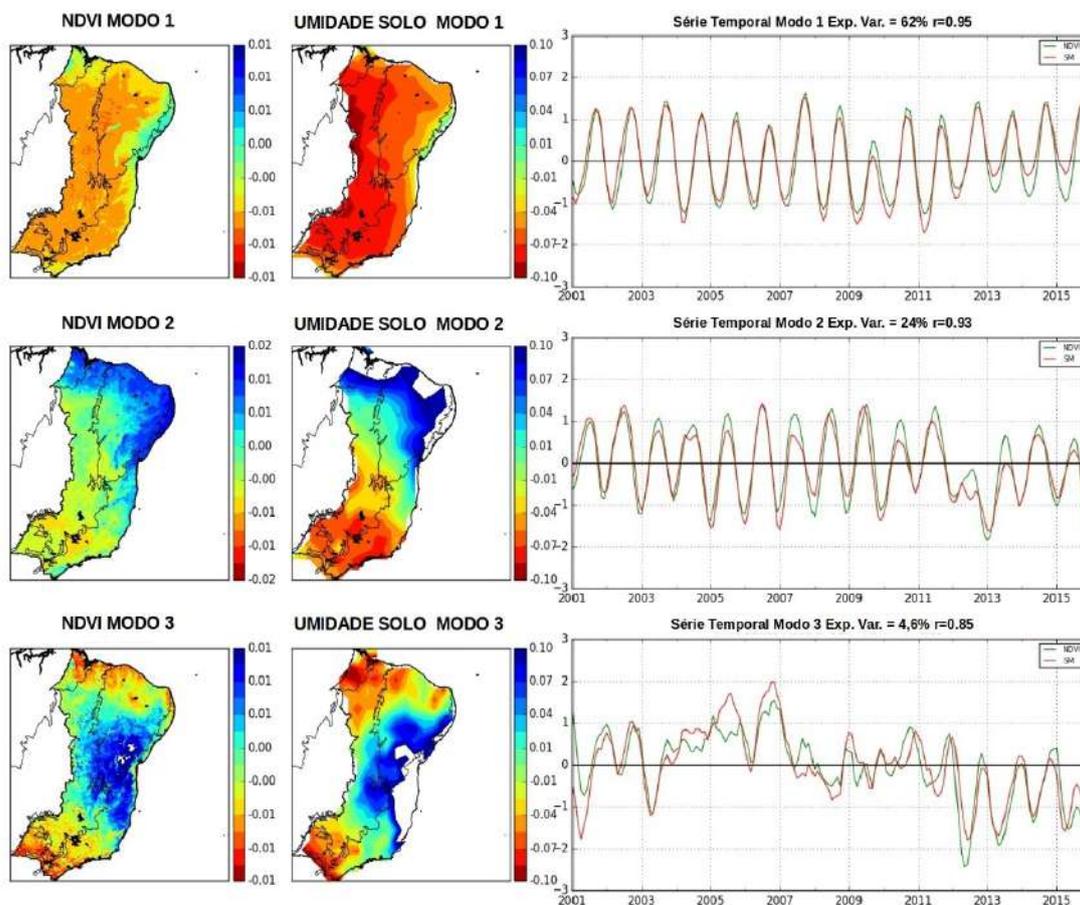
Os resultados da Figura 6.6 mostram que a primeira componente representa um ciclo hidrológico típico, enquanto a segunda e terceira componente detectam possíveis mecanismos de absorção de água e habilidades de evapotranspiração. Entre os biomas, os resultados para a CAT contrastam com os demais, talvez pela composição de plantas especializadas em clima seco tropical, enquanto na AMZ e na ATL, biomas mais

úmidos, esse componente não foi observado.

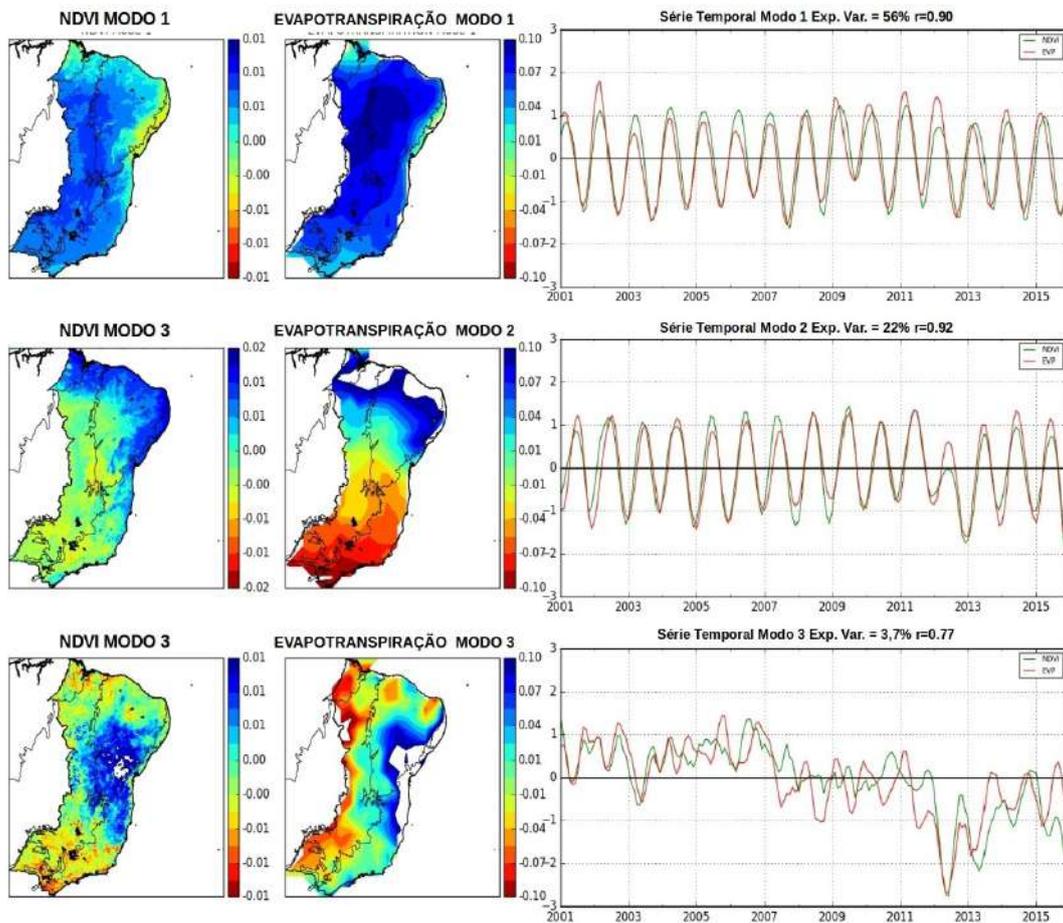
A relação espaço-temporal entre vegetação e as variáveis hidrometeorológicas, ou seja, entre NDVI e variáveis GLDAS, obtidas pelo procedimento DVS para o período de 2000 a 2015, é apresentada nas Figuras 6.7, 6.8 e 6.9. A covariabilidade explicada entre os dados GLDAS e NDVI foi discriminada no modo 1 (70, 62 e 56%), no modo 2 (20, 24 e 22%) e no modo 3 (3,5, 4,6 e 3,7%) para precipitação, umidade do solo e evapotranspiração, respectivamente. O padrão espacial das variáveis GLDAS varia significativamente em cada modo. No modo 1, é observado um gradiente da costa leste em direção ao interior do continente. No modo 2, existe um gradiente norte-sul que abrange toda a costa nordeste. O modo 1 reproduz bem o padrão climático da região. Enquanto no modo 1 há uma forte influência da maritimidade e da continentalidade sobre o padrão de precipitação, o modo 2 está mais associado à distribuição latitudinal da precipitação.



**Figura 6.7:** Primeiro, segundo e terceiro modo pelo modo DVS, com NDVI (esquerda) e precipitação (direita), e seus respectivos coeficientes de expansão.



**Figura 6.8:** Primeiro, segundo e terceiro modo pelo procedimento DVS, com NDVI (esquerda) e umidade do solo (direita), e seus respectivos coeficientes de expansão.



**Figura 6.9:** Primeiro, segundo e terceiro modo pelo procedimento DVS, com NDVI (esquerda) e evapotranspiração (direita), e seus respectivos coeficientes de expansão.

Esse fato sugere que, em modos mais altos, como o modo 3, tem-se a contribuição das variações climáticas intra-anuais de longo prazo. Nesse modo, não foi observado um padrão de gradiente típico, mas uma região de alta variabilidade está localizada no sul da CAT e no litoral nordeste da região SE, principal região entre 2013 e 2015. As porções norte e o sul do leste do Brasil têm cada um deles sinais opostos, gerando dois dipolos. O primeiro está localizado ao norte do CRD e AMZ, enquanto o segundo está localizado no sul da região sudeste, entre a ATF e o CRD.

O padrão espacial de precipitação, umidade do solo e evapotranspiração são semelhantes em cada procedimento DVS. No entanto, observa-se que a evapotranspiração no modo 1 difere da precipitação e da umidade do solo demonstrando, portanto, que essa variável tem menor potencial de explicar a variabilidade espacial das diferentes classes vegetação. Assim, pode-se justificar a menor variabilidade explicada pela evapotranspiração (56%) em relação à umidade do solo e à precipitação.

Em relação às séries temporais, com coeficientes expandidos, o modo 1 reproduz um padrão anual de oscilação anual entre a variável GLDAS e a vegetação. Embora esteja claro que um sinal sazonal domina a variabilidade do modo 2, pode-se detectar a presença de variação intra-anual entre os anos mais secos e úmidos. Os anos de 2007, 2013 e 2005 foram todos secos, como se pode confirmar na Figura 6.1 e nas Figuras 6.7, 6.8 e 6.9, observando-se que os coeficientes expandidos são menores em cada um desses períodos, sendo mais relevante para a umidade do solo. O modo 3 representa as anomalias climáticas mais importantes para as secas de 2013 e 2015, conforme mostrado na Figura 6.4.

Os resultados do procedimento DVS revelam que há uma sincronia entre o sinal da vegetação e as variáveis do modelo GLDAS. Dentre as variáveis, a precipitação é

aquela que mais está associada ao vigor da vegetação, sendo esse aspecto mais evidente na região NE, onde o crescimento da vegetação responde rapidamente ao aporte de água. Embora a menor resolução espacial limite a interpretação dos dados, a previsão de precipitação pode ajudar a mapear as regiões de vegetação previamente estressadas pela seca. A umidade do solo seria a segunda melhor opção para monitorar a vegetação, especialmente na porção sul do leste do Brasil, onde a vegetação não responde de forma significativa à precipitação. Para uma melhor previsão baseada na evapotranspiração, uma melhor compreensão da transpiração da planta e da evaporação do solo, bem como conjuntos de dados precisos de alta resolução ajudariam a explicar essa menor correspondência entre a evapotranspiração e a vegetação.

#### **6.4 Considerações Finais**

Por meio de técnicas baseadas em ACP, avaliaram-se a distribuição espaço-temporal e a covariância cruzada usando NDVI do sensor MODIS e dados de precipitação, umidade do solo e evaporação do modelo GLDAS em diferentes biomas localizados no nordeste e sudeste do Brasil. A série temporal de NDVI de longo prazo revelou que o impacto da seca no NDVI de 2012 a 2015, precedido por um período chuvoso de 2008 a 2011, afetou tanto as regiões estudadas quanto a vegetação afetada no sul da CAT e no norte da ATF. Ambas as regiões têm contrastes de tipo de vegetação e condição climática, sendo a primeira em uma região do semiárido e a segunda em clima úmido. Entretanto, o sinal da série temporal derivado dos modos das FEO revela que a diminuição dos valores do NDVI é notadamente a maior e mais longa já observada em em toda base de dados do sensor MODIS para a região de estudo.

O tipo de cobertura vegetal foi o principal fator para entender a diferente resposta do NDVI à seca no leste do Brasil. Na região SE, onde se concentra a maioria das atividades antropogênicas, as alterações nas anomalias da vegetação não foram diretamente associadas à falta de precipitação. O tempo de exposição à seca e a falta de precipitação não foram suficientes para impactar o *greening* do NDVI associado à vegetação e reduzir a taxa de evapotranspiração significativamente. Na região NE, por outro lado, a vegetação da região semiárida e as variáveis hidrológicas derivadas do GLDAS são mais correlacionadas e associadas a grandes áreas afetadas pela seca. No entanto, observou-se que a magnitude da anomalia do NDVI durante a seca não estava relacionada com a precipitação em alguns casos.

O modelo GLDAS é um bom candidato para identificar quais variáveis hidrológicas mais interagem com a vegetação e explicar sua variabilidade espaço-temporal. Precipitação e umidade do solo são candidatas em potencial e parecem explicar a variabilidade do NDVI em grande parte da região de estudo em comparação com a evapotranspiração. No entanto, cabe destacar que a análise apresenta limitações face a baixa resolução espacial dos dados. Complementarmente, os resultados do procedimento DVS não foi suficiente para identificar o papel da precipitação como única forçante meteorológica, ao passo que as variáveis umidade do solo e evapotranspiração detêm importante influência na dinâmica da vegetação durante eventos de seca.

## **Capítulo 7 – Duração e Persistência da Seca e seus Efeitos na Vegetação na Região Semiárida do Brasil**

Um dos atributos da seca que podem potencializar o seu impacto no estresse fisiológico das plantas é a sua persistência temporal. Define-se a persistência da seca quando a sua ocorrência ultrapassa pelo menos dois anos consecutivos. Em um período de tempo mais curto, a seca também pode ser avaliada pela sua duração, uma vez que a soma dos meses está abaixo de certo limite durante um determinado ano. A investigação do efeito da duração e da persistência da seca na sazonalidade da vegetação concentrou-se na região nordeste do Brasil, onde está localizado o semiárido nordestino. Na análise, as métricas sazonais NDVI anuais foram obtidas pelo sensor MODIS e seu correspondente produto de vegetação NDVI, para os seguintes parâmetros: valor basal, amplitude, integral da curva e valor máximo anual. O índice de seca adotado foi o SPEI com janela temporal de seis meses.

A seca de 2012 a 2015 no nordeste do Brasil afetou o ciclo sazonal das plantas sendo agravada pela sua duração e pela sua persistência. Ambos os efeitos variaram entre as diferentes coberturas vegetais e em relação ao tempo total de exposição. A resposta dos parâmetros sazonais baseados no NDVI às características da seca indica que a caatinga (CAT), principal bioma da região semiárida brasileira, apresenta maior sensibilidade quanto à disponibilidade hídrica. A sensibilidade de outras métricas sazonais no que concerne à duração da seca pode estar associada a diferentes níveis de degradação da superfície. A análise da persistência da seca mostrou que a recuperação da vegetação é acentuadamente reduzida quando as condições de seca excedem um ano.

A seguir, faz-se uma exposição dos resultados obtidos para a duração e para a persistência da seca com base na extração do NDVI associado à região semiárida do Brasil.

## 7.1 Introdução

A relação entre as secas em regiões semiáridas e seus efeitos na superfície, principalmente em relação à vegetação, é objeto de preocupação devido à susceptibilidade dos biomas nesses ambientes em relação à degradação e à desertificação. Os índices espectrais de vegetação fornecem informações espaciais e temporais confiáveis e contínuas sobre o estado da vegetação na superfície. As séries temporais NDVI de longo prazo são objeto de estudo para descrever o comportamento da vegetação durante períodos de seca de diferentes durações em regiões semiáridas (Barbosa *et al.*, 2007; Vicente-Serrano, 2007).

É recorrente o emprego de índices para avaliação de secas. Variáveis tais como precipitação, umidade do solo e evapotranspiração, são empregados como indicadores e podem ser ajustados por uma função estatística, permitindo, então, fornecer informações espaciais e temporais dentro de um intervalo específico, indicando superávit ou déficit hídrico para determinada região (Hao e Singh, 2015). Apesar de esforços governamentais para manutenção de dados hidrometeorológicos, a sua cobertura é baixa e sofre com falhas nas séries temporais (Paredes-Trejo *et al.*, 2017).

Assim, uma das estratégias para se avaliar a vegetação, é usar dados de reanálise, que possuem distribuição homogênea tanto espacial quanto temporalmente. A partir desse tipo de dados, é possível calcular índices de seca. Um índice de seca diversamente utilizado é o SPEI, o qual é considerado como um bom indicador da

condição da vegetação, sobretudo em regiões semiáridas. Por ser baseado no balanço hídrico, avaliando a diferença entre precipitação e evapotranspiração potencial, é eficiente na caracterização de regiões áridas e semiáridas (Vicente-Serrano *et al.*, 2010 e 2015). Os dados SPEI podem ser gerados em diferentes janelas temporais, permitindo o seu ajuste aos ciclos sazonais da vegetação em uma ampla gama de regiões (Gouveia *et al.*, 2016)

A persistência da seca visa identificar a probabilidade de ocorrência de dois períodos de déficit hídrico consecutivos entre duas estações climáticas (Ford e Labosiet, 2014) ou entre dois anos consecutivos (Ganguli e Ganguly, 2016). A persistência temporal pode ter alta variabilidade espacial e dependência das condições climáticas prévias (Meng *et al.*, 2017). A extensão de um período seco tem reflexo na vegetação local. Martiny *et al.* (2005) demonstraram uma relação significativa entre anomalias negativas NDVI e o efeito acumulado da precipitação em até dois anos prévios em regiões semiáridas. Assim, a resposta da vegetação em ambiente semiárido sujeito ao estresse hídrico pode ser diferente em episódios curtos de seca em contraste com aqueles períodos mais longos que superam o ciclo de crescimento da vegetação. O mapeamento de regiões com déficit hídrico pode ser feito adotando um limiar, abaixo do qual, delimita-se a seca. Essa mesma abordagem foi adotada por Gouveia *et al.* (2009), usando um índice de umidade do solo ao avaliar múltiplos episódios de seca. A mesma abordagem pode ser adotada com índices de seca, tal como o SPEI, permitindo classificar as regiões persistentes e não persistentes a partir de um determinado limiar que delimite o crescimento da vegetação.

Cunha *et al.* (2015) avaliaram a condição da vegetação durante a seca de 2012-13 no semiárido nordestino. Eles usaram o número de dias de déficit na umidade do solo, obtidos por balanço hídrico, e precipitação acumulada, como preditores de seca da

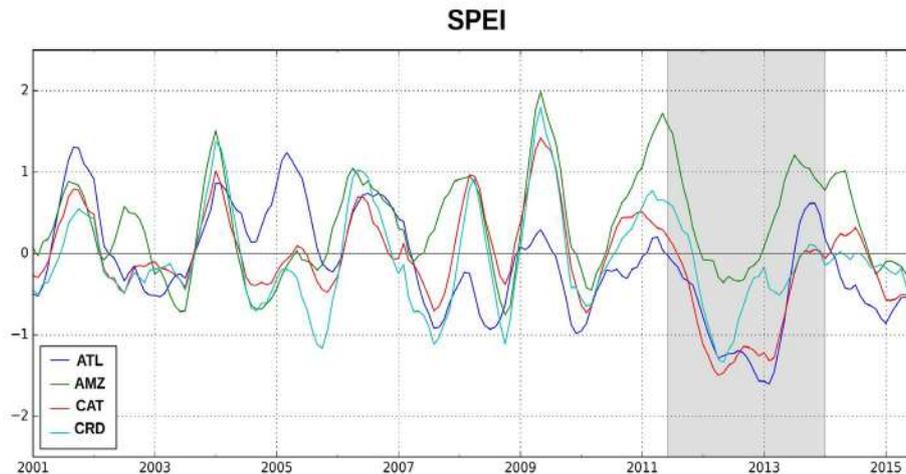
vegetação. Tal configuração foi obtida por um índice de vegetação que integra dados NDVI, ou seja, de refletância da superfície, conjuntamente com dados de temperatura da superfície da terra, ambos do sensor MODIS. Os resultados mostram que os preditores de seca têm boa concordância com a duração da seca e, conseqüentemente, com o tempo durante o qual a vegetação é exposta. Eles também sugerem que os efeitos persistentes interanuais das secas podem explicar a recuperação da vegetação e a memória na região. Diante de tais resultados, a análise da persistência e da duração da seca nessa região e de seus efeitos no NDVI mostram-se promissoras.

Longos períodos de seca que se estendem até por mais de um ano podem agravar as condições da vegetação no nordeste do Brasil. Porém, a resposta da vegetação à seca empregando valores máximos anuais, como comumente realizado, nem sempre consegue explicar as tendências do NDVI, como observado por Vicente-Serrano *et al.* (2015) em relação ao SPEI. Além do tradicional valor máximo anual do NDVI, parâmetros sazonais das séries temporais podem explicar o comportamento de outros padrões associados à vegetação (Jönsson e Eklundh, 2002; Zhang *et al.*, 2006; Reed *et al.*, 2006). A adoção de métricas sazonais NDVI, portanto, permitiria melhor compreender o efeito da seca na vegetação. Além disso, essas mesmas métricas descreveriam, com mais detalhes, a relevância da duração e da persistência para cada bioma da região NE do Brasil.

## **7.2 Efeito da Seca na Sazonalidade da Vegetação**

A Figura 7.1 mostra as séries temporais SPEI, de 2001 a 2015, para cada cobertura vegetal, com destaque para o período relativo à seca de maior severidade, de janeiro de 2011 a dezembro de 2014. Aplicou-se uma janela de média móvel de seis

meses em cada série temporal do índice de seca SPEI por bioma tendo em vista a redução de ruído e para facilitar a sua interpretação. Durante o período de seca, em geral, todas as séries temporais mostram uma tendência semelhante, começando com uma primeira queda no índice SPEI no início de 2012, que, então, permanece negativo até 2013. Todos os biomas, excluindo a amazônia (AMZ), seguiram uma oscilação entre períodos úmidos e secos. A região correspondente ao bioma mata atlântica (ATL) parece apresentar uma tendência negativa do SPEI ao longo dos anos desde 2008.

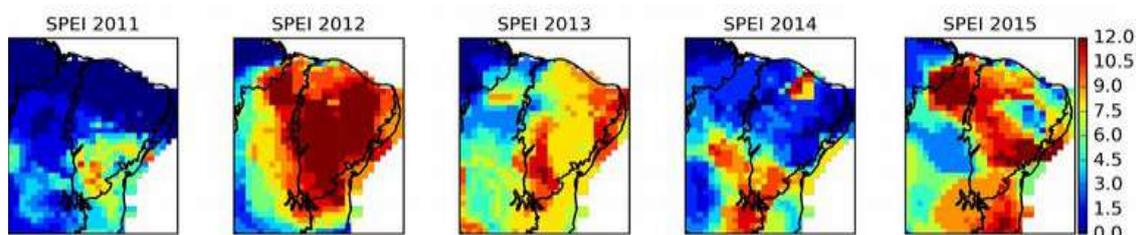


**Figura 7.1:** Séries temporais SPEI para cada bioma, com destaque para o período de seca (2011-2013).

No período relativo ao fim da seca, observa-se uma recuperação nos valores SPEI na região da caatinga (CAT), da mata atlântica (ATL) e do cerrado (CRD), quando o valor do índice varia de -1,5 para 0,5, correspondendo a um maior acúmulo de umidade e, logo, favorecendo a evapotranspiração local e possibilitando novamente o crescimento da vegetação. No entanto, 2014 é novamente um ano seco e a precipitação média diminui gradualmente até 2015. Embora a queda de 2014-2015 seja menos intensa do que a observada em 2012-2013, observa-se desta vez uma seca com cobertura espacial mais abrangente, uma vez que todos os biomas terminam com valores de SPEI próximos a -1.

A fim de avaliar a duração do período de seca para cada ano no NE do Brasil, a Figura 7.2 mostra os mapas cumulativos do índice de seca, SPEI-ACUM, de 2011 a 2015. A faixa representa o número total de meses em que o índice está abaixo do limiar -0,25. A primeira região afetada está centrada na porção sul de CAT, onde alguns píxeis estão mais secos ao longo de 2011 e permaneceram sob essa condição até 2015. Por outro lado, os demais têm menos de dois (2) meses sob condição de seca. Em relação ao

ano de 2012, é possível observar o início da seca, que é principalmente centrada na região da CAT, onde todos os píxeis estavam sob condição de nove (9) meses de seca. As fronteiras dessa região afetada impactam dois outros biomas, CRD (a oeste) e ATL (a leste), onde os valores variam de seis (6) a doze (12) meses. Em 2013, o número de píxeis expostos a condições extremamente secas, duração de seca superior a onze (11) meses, é significativamente reduzido. Durante o mesmo ano, a porção leste do NE teve nove (9) meses de seca, incluindo os biomas CAT e ATL, enquanto na porção leste os valores são inferiores a seis meses. Entretanto, vale ressaltar que duas regiões em particular permanecem sob o efeito da seca desde o ano de 2012, com valores superiores a nove (9) meses, um ponto localizado no nordeste e o segundo na porção sudoeste do bioma CAT, os quais permanecem nesse estado até o período de 2015.



**Figura 7.2:** Mapas acumulativos de SPEI para valores inferiores a -0,5 para 0 a 12 meses (período 2011-2015).

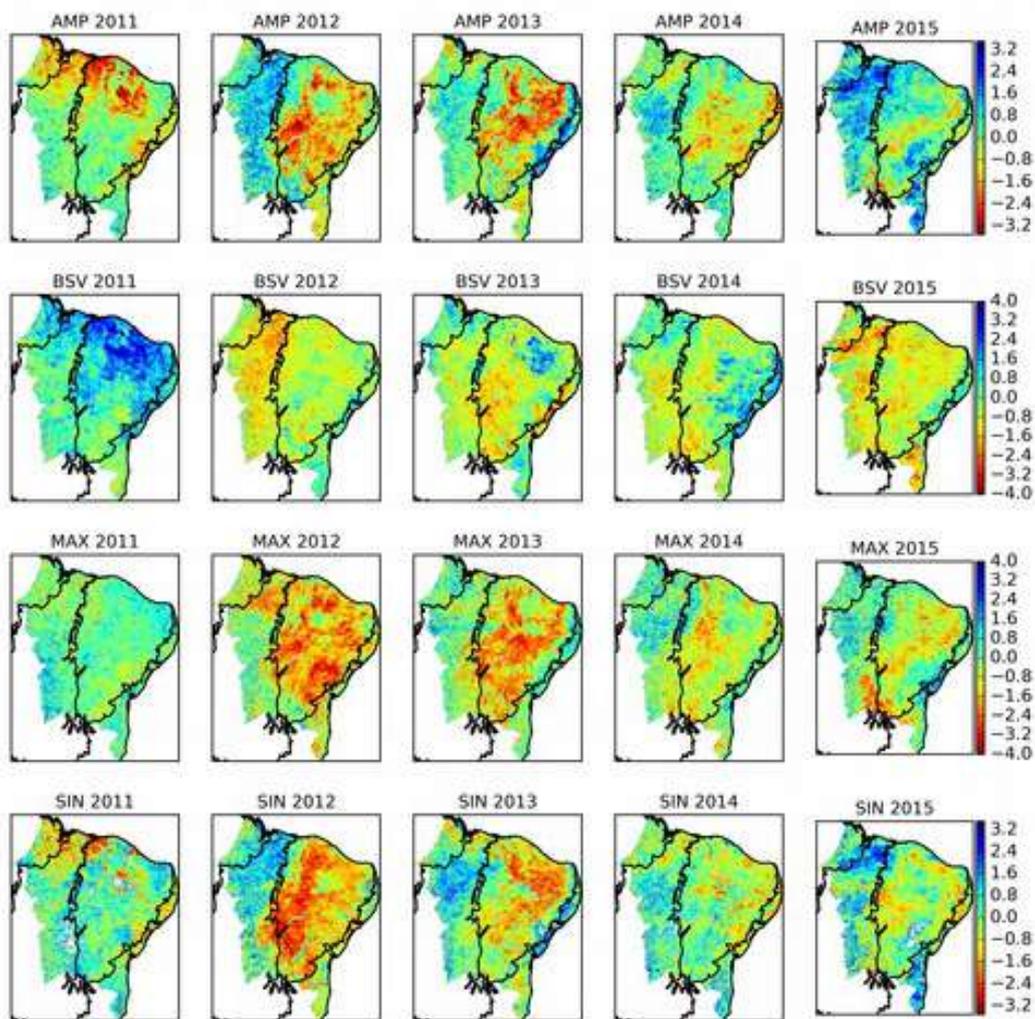
Os dois mapas na Figura 7.2, referentes aos anos de 2014 e 2015, representam a tendência de baixa e de alta do SPEI para todos os biomas conforme observado na Figura 7.1. Grande parte do NE mostra recuperação a partir de 2013, sendo que os píxeis da porção sudoeste-noroeste têm duração de seca menor que 3 meses. Todavia, algumas regiões ainda permanecem secas na porção limítrofe do CRD, da ATL e da CAT, com valores superiores a nove (9) meses. Por fim, a distribuição espacial da seca acumulada, no último ano 2015, é consideravelmente mais irregular se comparada a 2012.

Os mapas de anomalia dos parâmetros sazonais do NDVI de 2011 a 2015 são mostrados na Figura 7.3. O estresse da vegetação causado pela seca é evidente, uma vez que todos os parâmetros da vegetação apresentam abruptas anomalias negativas em 2012 e em 2013 quando comparados ao restante do período estudado. Exceção seja feita ao parâmetro denominado de valor base (BSV), em que a anomalia negativa desse parâmetro é de menor magnitude que os demais.

Anomalias negativas do BSV significam maior contribuição da superfície do solo no sinal do NDVI. Na região nordeste como um todo, a maior parte da cobertura vegetal é esparsa havendo exposição do solo, o que explica a baixa amplitude dessa métrica sazonal. Porém, enquanto as anomalias negativas dos demais parâmetros concentram-se na área da CAT, anomalias negativas do BSV têm maior abrangência na área do CRD, principalmente no ano mais seco de 2012. A resposta da vegetação à seca depende, dentre outros fatores, da proporção entre espécies herbáceas e lenhosas em uma comunidade vegetal (Walker *et al.*, 2015). De acordo com Davison *et al.* (2011), a variação do BSV é maior em regiões com maior percentual de plantas perenes e lenhosas, o que explicaria o fato de que durante o ano mais seco a anomalia negativa foi maior no CRD do que na região de CAT. Portanto, uma das possíveis causas da variação da resposta do BSV entre esses dois biomas é a proporção entre espécies herbáceas e lenhosas, pois é comum na região do CRD a presença de dois substratos de vegetação, um formado por gramíneas e o outro por plantas lenhosas, além de aglomerado de espécies lenhosas com formações vegetais mais densas.

O padrão espacial dos outros parâmetros da vegetação, amplitude (AMP), valor máximo (MAX) e integral curta (SIN), parecem estar mais relacionados entre si, o que é de se esperar tendo em vista a existência de inter-dependência entre as métricas sazonais uma vez que foram extraídas de uma mesma curva de crescimento anual do NDVI

(Heumann *et al.*, 2007). Particularmente, os parâmetros AMP e SIN têm um padrão de variação similar em quase todas as coberturas vegetais, como também descrito por Olsson *et al.* (2005). As anomalias negativas de 2012 e 2013 de AMP e SIN concentram-se na área da CAT e são gradativamente recuperadas entre 2014-2015. Logo, pode-se inferir a acentuada queda na produção primária nessa região e perda de biomassa durante o período de seca. Na região do CRD, entretanto, a AMP e SIN são levemente positivas, cuja interpretação seria um falso ganho de biomassa não fossem as anomalias negativas de BSV que perduram de 2012 a 2015. Pode-se inferir que, enquanto a seca promove um achatamento da curva NDVI na região da CAT, a curva NDVI sofre um esticamento em direção à sua base na região da CAT, o que pode ser corroborado pela baixa alteração na anomalia do MAX na região do CRD.



**Figura 7.3:** Mapas cumulativos anomalias de amplitude NDVI (AMP), valor base (BSV), valor máximo (MAX) e integração curta (SIN) para o período de 2011 a 2015.

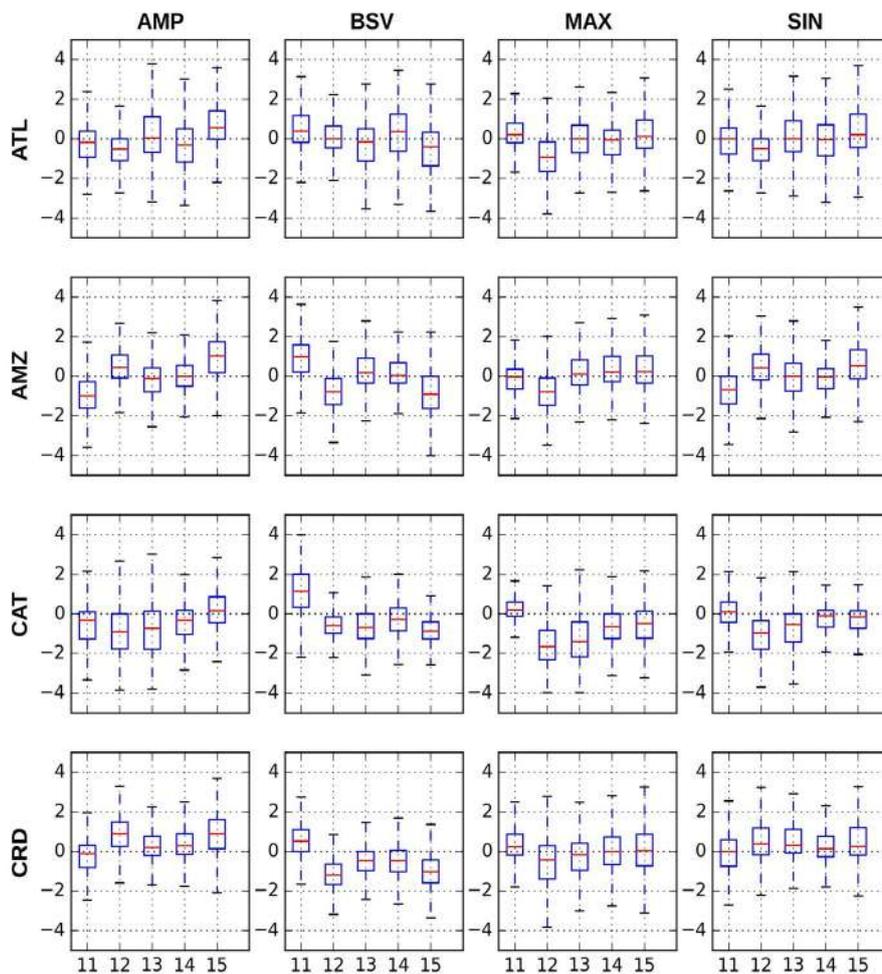
Ainda em relação à recuperação da vegetação após o período da seca, destaca-se a região do bioma ATL no sul do NE, local de vegetação mais densa e de considerável preservação da vegetação nativa. Apesar da seca ter sido de baixa intensidade durante o período de 2011 a 2013, essa região beneficiou-se da maior umidade do solo de 2014 a 2015 apresentando uma anomalia positiva nos parâmetros SIN e AMP. Outro fato que chama atenção é de que há uma ligeira diferença na recuperação da vegetação na região da CAT ao se comparar AMP e SIN no ano de 2015. As anomalias negativas da AMP e do MAX persistem no chamado vale do São Francisco, mas são em áreas que não

correspondem a anomalias negativas SIN. A falta de sincronismo entre AMP e SIN já foi relatada por outros autores e uma das explicações é um padrão sazonal distinto entre diferentes coberturas vegetais ou as mudanças fenológicas que alterem a duração do ciclo de crescimento da vegetação (Heumann *et al.*, 2007; Jenerette *et al.*, 2010; Eklundh e Jönsson, 2012).

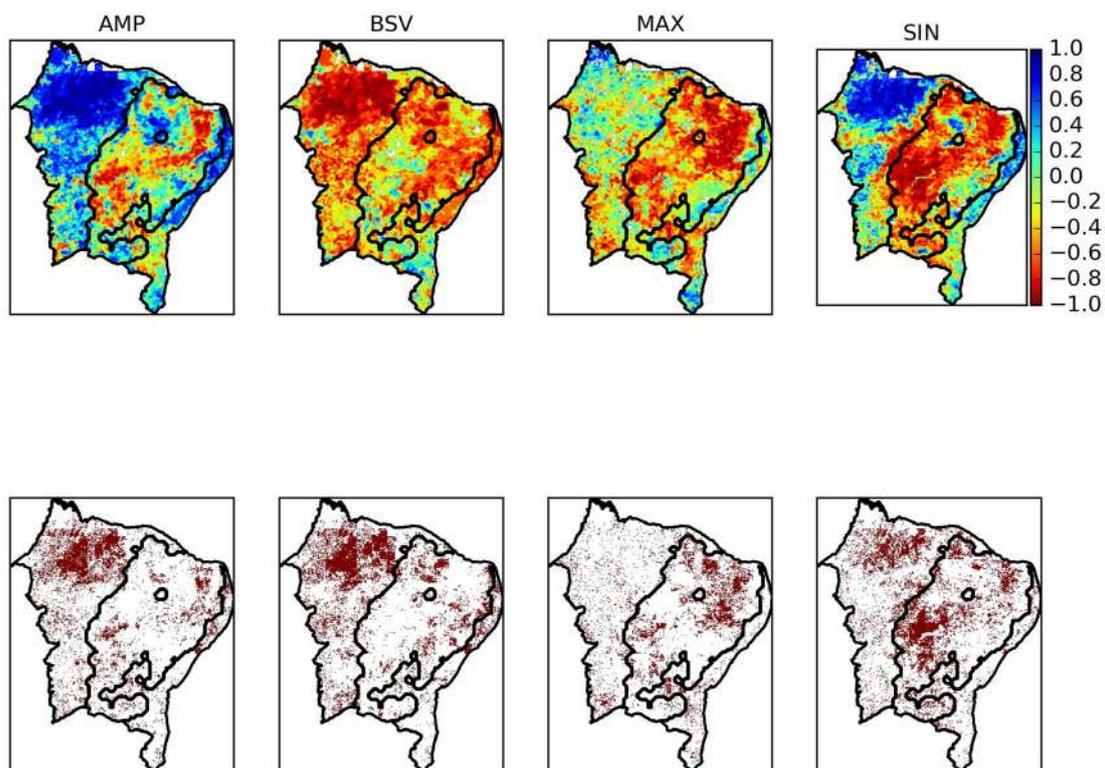
Como já demonstrado pela distribuição espacial das anomalias de cada métrica sazonal, dentre todas as coberturas, o bioma CAT é o mais impactado pela seca, conforme ilustrado na Figura 7.3, e que pode ser igualmente comprovado na distribuição empírica dos parâmetros na Figura 7.4. Avaliando-se mais profundamente a Figura 7.4, pode-se reconhecer alguns padrões específicos dos parâmetros sazonais para cada bioma. Na CAT, o intervalo entre o primeiro e o terceiro quartil é negativo de 2012 a 2013 para todos os parâmetros. Apesar da taxa de recuperação gradual de 2012 a 2015, a maioria das distribuições de parâmetros teve valores da mediana negativos ou próximos de zero, sendo que a única exceção é a recuperação da AMP em 2015, a qual, como se viu anteriormente, por si só não representa ganhos de biomassa vegetal. Em relação ao comportamento dos demais biomas aqui estudados, entretanto, o comportamento é mais diverso.

De modo geral, a média dos parâmetros sazonais para ATL e para AMZ foi mais centrada em torno de zero. Em 2015, os valores de SIN e AMP foram majoritariamente positivos, dado que pode ser interpretado como ganho de biomassa. O comportamento dos biomas ATL e AMZ justifica-se por terem cobertura mais ampla do dossel e sistemas radiculares mais profundos, e, por consequência, são mais resistentes ao período seco e demonstram maior eficiência na absorção de água após um período de seca.

A distribuição empírica dos parâmetros na região do CRD assemelha-se à distribuição encontrada para ATL e AMZ. A única exceção é o parâmetro BSV, que, ao contrário desses dois biomas, apresenta os quartis sempre negativos e todas as anomalias com valores inferiores a 2. Esses resultados mostram a coerência dos dados, uma vez que o comportamento do BSV para o CRD aproxima-o da região da CAT, ambos biomas de menor densidade vegetal quando comparados com ATL e AMZ.



**Figura 7.4:** Gráficos de dispersão para as anomalias de amplitude NDVI (AMP), valor base (BSV), valor máximo (MAX) e integração curta (SIN) nos biomas de mata atlântica (ATL), mazônia (AMZ), caatinga (CAT) e cerrado (CRD) para o período de 2011 a 2015.



**Figura 7.5:** Correlação linear para AMP, BSV, MAX e SIN com SPEI cumulativo (linha superior) e valores de significância (linha inferior),  $p < 0,1$ . O limite da região semiárida também é exibido no centro do mapa.

Complementarmente à Figura 7.5, gráficos de transectos da latitude e longitude são apresentados para cada bioma na Figura 7.6 e na Figura 7.7, respectivamente. Entende-se por transectos de latitude e longitude, os valores médios dos píxeis ao longo dos eixos horizontal e vertical, respectivamente, dos mapas. Uma grande porção de píxeis significativos está localizada na porção noroeste do mapa, incluindo as regiões dos biomas CAT, CRD e AME, com diferentes núcleos de píxeis significativos espalhados sobre a região semiárida. De uma maneira geral, a duração da seca influencia negativamente a maioria das métricas sazonais do NDVI. A distribuição espacial dos píxeis correlacionados de forma negativa parece estar associada à delimitação semiárida, em que grande parte corresponde ao bioma CAT, quando se

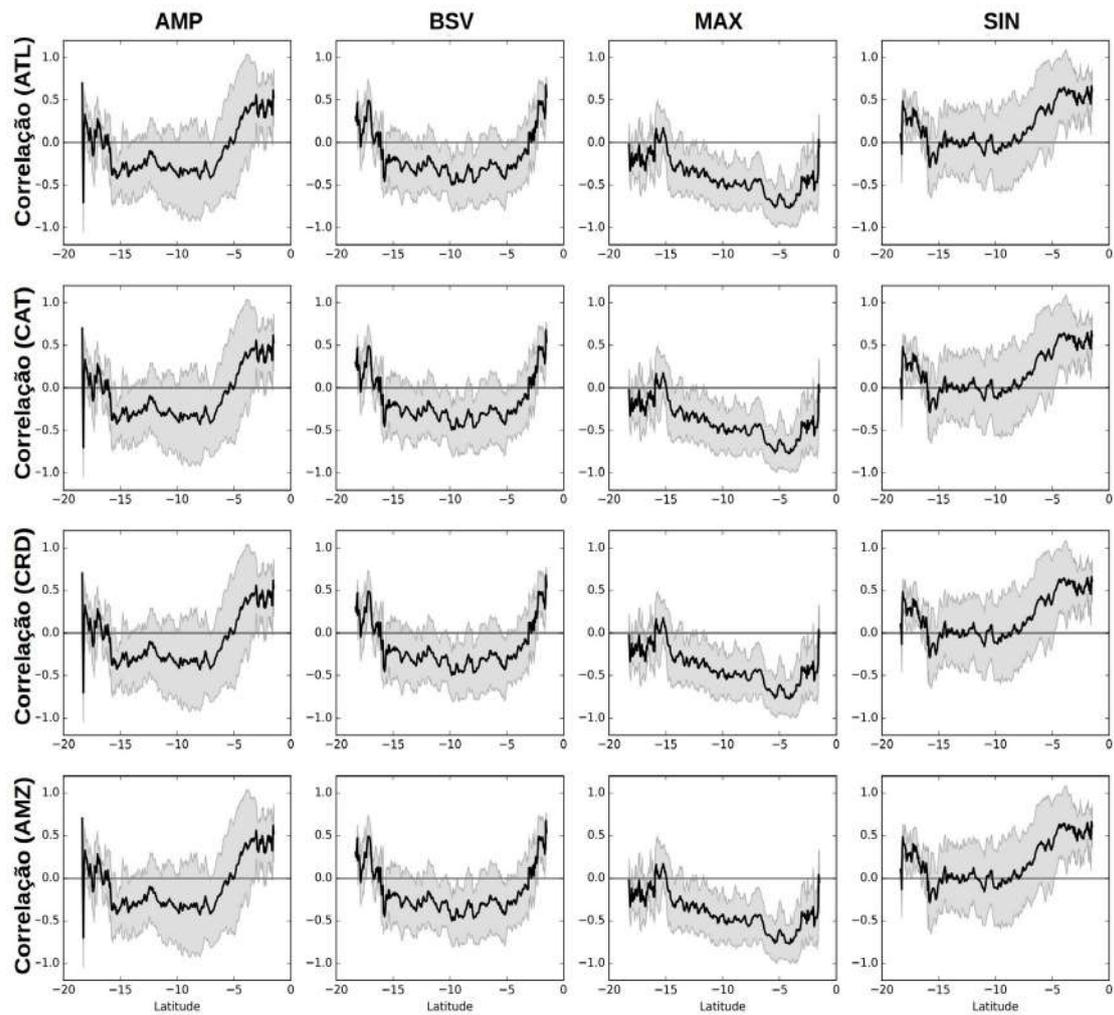
examina os parâmetros AMP, MAX e SIN. Os transectos correspondentes confirmam esse efeito local da duração da seca nos parâmetros sazonais. Os valores de correlação entre os parâmetros sazonais e o SPEI cumulativo para a região da CAT variam entre -1 e -0,5. Essa correlação concentra-se de forma centrada na região NE, principalmente nas latitudes de -15 a -10 graus e longitudes -44 a -38 graus. Os transectos de AMP e SIN possuem um perfil similar sobretudo em latitude maiores, provável influência da porção norte da CAT, e um perfil similar também é observado para os parâmetros BSV e MAX.

No que concerne à região semiárida, a distribuição espacial da resposta do parâmetro MAX à duração da seca restringe-se à essa região. O valor máximo do NDVI portanto é menos afetado em regiões mais úmidas. A distribuição padrão do valor do SIN no semiárido é semelhante ao MAX, sugerindo que a duração da seca, e não apenas a sua magnitude, contribui com o já mencionado fenômeno de achatamento da curva NDVI ilustrado Figura 7.4. Fora dos limites da região semiárida, duas regiões mostram correlação positiva com a duração da seca para os parâmetros SIN e AMP: a primeira na porção noroeste do NE, compreendendo principalmente os biomas AMF e CRD, e a segunda na porção norte da ATL na costa leste. Na primeira região, a atividade da vegetação na região NE vigorou mesmo com aumento da duração da seca. Provavelmente a vegetação beneficiou-se do período úmido entre 2013-2014 entre as duas secas, segundo ilustrado na Figura 7.3. O vigor da vegetação no norte da costa leste é de difícil interpretação, uma vez que essa região tem alta concentração urbana e monocultura de cana-de-açúcar. Diferentemente da porção sul do litoral, os valores NDVI podem sofrer influência dessa cobertura do solo.

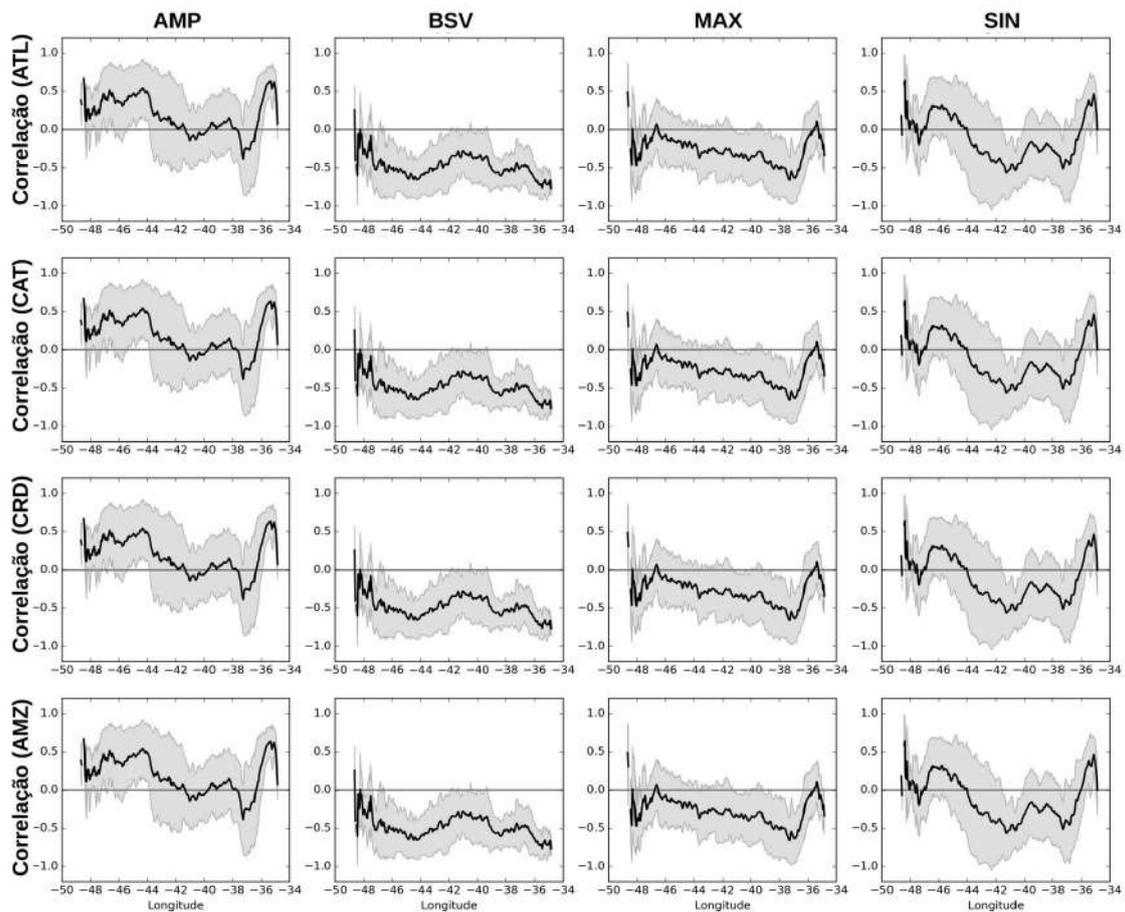
Tomasella *et al.* (2018) propuseram um índice de degradação da superfície desenvolvido para a CAT também com base no sensor MODIS e seu produto NDVI. O índice usa o NDVI como um método para classificar os píxeis como solo exposto em

contraste com aqueles vegetados com base em observações de campo. Suas análises identificaram regiões de diferentes níveis de degradação da terra para algumas janelas temporais. Algumas dessas regiões são núcleos bem conhecidos de desertificação, os quais já foram mapeados por órgãos ambientais brasileiros e continuamente monitorados. A distribuição espacial do índice de degradação por Tomasella *et al.* (2018) para o período de 2007 a 2016 mostra alguma correspondência com a distribuição espacial da correlação entre AMP e SPEI-ACUM e, em menor grau, com MAX e SIN.

As variações espaço-temporais em métricas sazonais NDVI são predominantemente associadas a variações climáticas (Reed, 2006), mas podem ser igualmente empregadas como indicadores para áreas degradadas (Budde *et al.*, 2004). O efeito da degradação da vegetação na superfície da CAT via desmatamento ou pastoreio intensivo pode ter como efeito a redução do vigor vegetativo da vegetação, com perdas de produção de biomassa e cobertura vegetal do solo, tornando essas regiões mais susceptíveis à seca. Nas duas últimas décadas, a frequência de secas no semiárido foi aumentada (Brito *et al.* 2018) e pode estar associada à redução da produtividade da biomassa produzindo um sinal sazonal cada vez mais fraco, que, ao longo desse processo, pode levar à gradativa redução da cobertura vegetal.



**Figura 7.6:** Transectos da latitude para os parâmetros sazonais AMP, BSV, MAX e SIN associados a cada bioma – ATL, CAT, CRD e AMZ no período de 2000 a 2015.



**Figura 7.7:** Transectos da longitude para os parâmetros sazonais AMP, BSV, MAX e SIN associados a cada bioma – ATL, CAT, CRD e AMZ no período de 2000 a 2015.

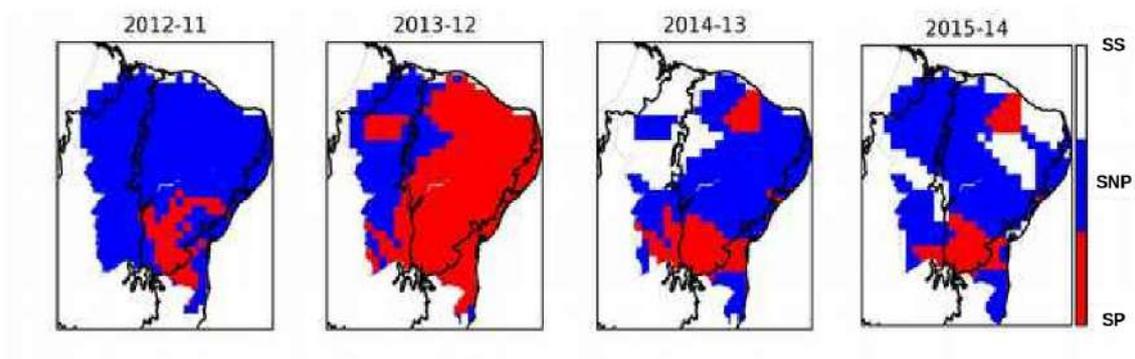
### 7.3 Efeito da Persistência da Seca na Sazonalidade da Vegetação

A Figura 7.8 mostra os mapas de persistência da seca para cada biênio. Os pares 2013-2014 e 2014-2015 são semelhantes. Portanto, as áreas classificadas como persistentes sofreram seca por um período superior a dois (2) anos. A Tabela 7.1 também mostra a porcentagem de mapas de todas as classes, sem seca (SS), seca não persistente (SNP) e seca persistente (SP) para cada cobertura do solo. Os valores médios dos parâmetros sazonais para cada classe de persistência são mostrados na Figura 7.9. Note-se que a classe SS está ausente, uma vez que não tinha sido observada para 2012-2013 e 2012-2011. De maneira geral, há dois comportamentos distintos. O primeiro é seguido pelos parâmetros SIN e AMP os quais mostraram recuperação após o período de seca severa pois as anomalias negativas foram observadas para a maioria das classes entre 2011-2013 e, posteriormente, observam-se anomalias positivas entre 2013-2015. Já o segundo comportamento é observado para BSV e AMP onde o padrão de recuperação anterior não foi observado. Ainda em relação às métricas BSV e MAX, a primeira apresentou pouca diferença entre as classes de seca, enquanto a segunda teve um contraste maior sobretudo em 2013-2012, entre as classes SP e SNP. Nesse biênio, a classe SP predominou na porção centro-leste do NE. Por essa razão, esse contraste nas anomalias de MAX para as classes SP e SNP reflete, principalmente, a diferença do sinal entre as regiões da CAT e do CRD.

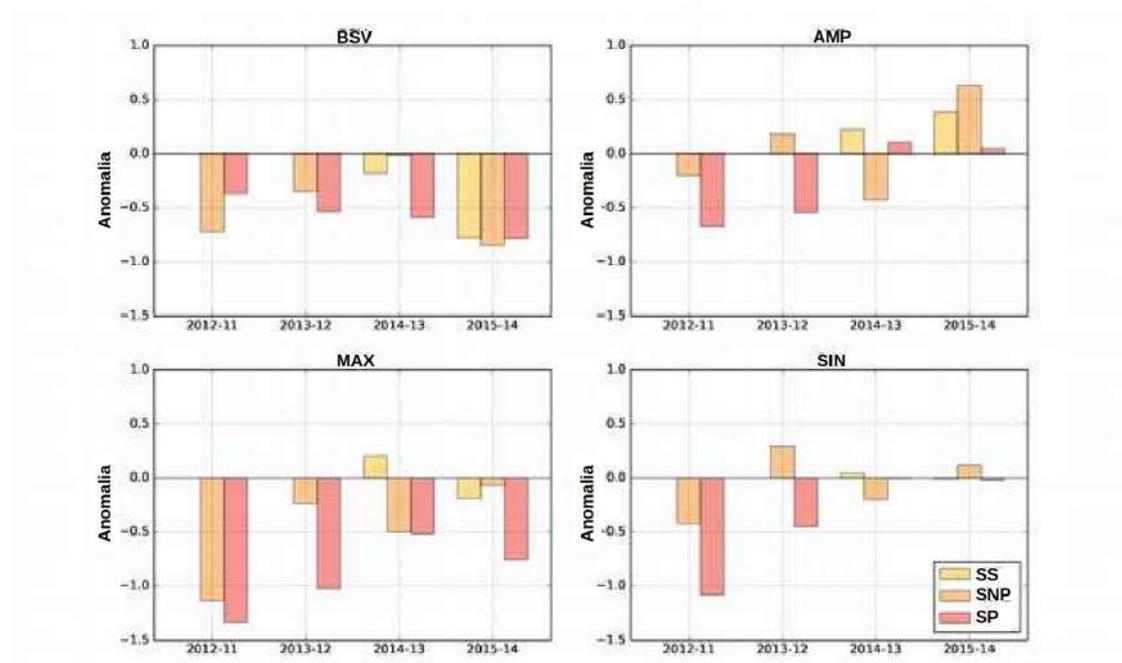
As métricas SIN e AMP parecem ser as mais sensíveis à persistência das secas pois, no período 2012-2011 e 2013-2012, uma maior diferença é observada entre as classes SP e SNP. A partir de 2014, a diferença da SIN entre as classes de persistência anula-se indicando que, provavelmente, a produção primária da vegetação sofre menos

influência após o período de seca mais severo. Esses resultados coadunam-se com os obtidos por Duan *et al.* (2018). Nesse trabalho, a recuperação da vegetação, expressa pela métrica SIN, quanto ao *déficit* hídrico, esteve associada à magnitude e ao tempo de exposição à seca. A variável SIN, portanto, responde à severidade da seca e à duração, configurando-se como potencial métrica para se estimar a produção primária na superfície terrestre.

Outro aspecto importante ao se avaliar a persistência da seca é que a variabilidade das métricas sazonais no NDVI não se restringe aos impactos de extremos climáticos (Budde *et al.*, 2004). Secas persistentes podem intensificar determinadas atividades antrópicas na superfície terrestre as quais se refletem nos índices de vegetação. Secas no semiárido do NE estão associadas principalmente a perdas agrícolas e pastoris de pequenos proprietários de terras em graus de intensidade que variam de acordo com a sua severidade (Verner, 2016). Secas de longa duração podem estimular o abandono de lavouras agrícolas ou as mudanças na densidade do pastejo pela venda precoce de animais, práticas essas correlacionadas com as mudanças no comportamento de métricas sazonais do NDVI em ambiente semiárido (Olsen *et al.*, 2015; Wallace *et al.*, 2017; Tong *et al.*, 2017). Portanto, ao interpretar os resultados da análise de persistência de seca aqui apresentados, não se deve ter como único foco a deficiência hídrica prolongada, mas a combinação dessa com práticas na cobertura do solo associadas a secas prolongadas. Assim, apesar do curto período analisado e da baixa resolução dos dados, uma substancial compreensão acerca do padrão sazonal da vegetação pôde ser alcançado, incorporando informações não apenas da intensidade da seca por si só mas pelo tempo a que essa foi exposta.



**Figura 7.8:** Mapas da classe de persistência, sem seca (SS), seca não persistente (SNP) e seca persistente (SP).



**Figura 7.9:** Valores médios de BSV, AMP, MAX e SIN para cada classe de persistência sem seca (SS), seca não persistente (SNP) e seca persistente (SP).

**Tabela 7.1:** Percentual da área para cada classe de persistência, sem seca (SS), seca persistente (SP) e seca não persistente (SNP) para cada cobertura vegetal.

	<b>Bioma</b>	<b>SNP</b>	<b>SP</b>	<b>SS</b>
<b>2012-11</b>	<b>ATL</b>	87	3	10
<b>2013-12</b>		10	90*	0
<b>2014-3</b>		94	6	0
<b>2015-14</b>		86	0	14
<b>2012-11</b>	<b>AMZ</b>	85	0	15
<b>2013-12</b>		85	0	15
<b>2014-3</b>		0	0	100
<b>2015-14</b>		83	0	17
<b>2012-11</b>	<b>CAT</b>	99	1	0
<b>2013-12</b>		8	92*	0
<b>2014-3</b>		73	19	8
<b>2015-14</b>		68	14	19
<b>2012-11</b>	<b>CRD</b>	93	0	7
<b>2013-12</b>		73	20*	7
<b>2014-3</b>		33	7	60
<b>2015-14</b>		73	5	22

## 7.4 Considerações Finais

A avaliação do SPEI mostrou que a seca é mais severa na porção centro-leste da região NE. Seus efeitos são mais deletérios para as regiões dos biomas CAT e CRD, e a amplitude da série temporal do índice é maior na porção costeira ATL, no período 2013-2014, sendo gradativamente reduzida em direção à região. Os resultados indicam que o ano de 2012 teve a seca mais duradoura e de maior magnitude para o período analisado. No ano seguinte, 2013, ainda estava seco, mas com menor magnitude. Após o período 2012-2013, a seca torna-se irregular, com vários núcleos e menos concentrada.

A análise das métricas sazonais do NDVI revelou que a seca causou mudanças sazonais principalmente, na região semiárida onde se localiza o bioma CAT associado, com duração superando um ano. A exposição temporal à condição de seca contribuiu para explicar as mudanças nas anomalias dos parâmetros do NDVI na região estudada, principalmente na porção norte do NE brasileiro. Os efeitos da duração da seca nos parâmetros sazonais variaram de anomalias positivas a negativas, como observado para os parâmetros MAX e BSV (anomalia negativa) e SIN e AMP (anomalias positivas e negativas). Alguns parâmetros do NDVI, como BSV e SIN, podem não ser sensíveis a valores de SPEI menores que -0,25, como observado para os biomas AMZ e CRD. Observou-se que a correlação negativa para os parâmetros MAX, SIN e AMP concentra-se em regiões já conhecidas pelo seu nível elevado de degradação, como sugerido em estudos anteriores. A correlação positiva de SIN e AMP em algumas regiões pode estar associada à baixa sensibilidade local quanto à duração da seca e quanto à capacidade de se beneficiar de períodos úmidos entre os intervalos de seca.

## **Capítulo 8 – Fenologia da Vegetação e sua Relação com a Seca na Região da Caatinga**

Tendo o clima como principal indutor da fenologia da vegetação, a periodicidade de mudanças de fases fenológicas é sensível a mudanças climáticas. Além disso, a fenologia é responsável por controlar mecanismos de retroalimentação entre a superfície e a atmosfera.

A partir de séries temporais NDVI, foram extraídos indicadores das fases fenológicas na superfície e, em seguida, foram feitas comparações com dados climáticos observados para a região do bioma caatinga no nordeste do Brasil. Os dados de precipitação foram utilizados na classificação anual de anos secos ou úmidos, a fim de investigar se o padrão fenológico da vegetação, em cada um desses períodos, era influenciado pela disponibilidade hídrica. As métricas fenológicas foram: (1) o início, pico e final do ciclo de crescimento; e (2) duração total do ciclo de crescimento.

Para testar a suposição sobre a sensibilidade da fenologia quanto à disponibilidade hídrica, empregou-se a estatística circular, cuja aplicação é comum em estudos de ecologia, porém menos usual em dados de sensoriamento remoto. A estatística circular é voltada à análise de dados com comportamento periódico, tal como observados na fenologia ou até mesmo em dados de satélite. O uso integrado de métricas fenológicas obtidas por meio de sensoriamento remoto e mediante o emprego de precipitação observada foi submetida à análise por técnicas estatísticas, tendo sido possível caracterizar a influência da disponibilidade hídrica no ciclo vegetativo no NE.

Comparando-se a média e a variância angular das métricas fenológicas, observou-se um atraso do início do ciclo e um fim de ciclo mais precoce, logo com uma tendência positiva à redução do ciclo total de crescimento em períodos mais secos. O teste de *Watson*, por sua vez, demonstrou mudanças significativas nas fases fenológicas na região centro-norte da caatinga e durante o pico do ciclo de crescimento em função da disponibilidade hídrica. Por fim, a metodologia apresentada soa promissora para uso como indicador do impacto das mudanças climáticas e da variabilidade em ecossistemas naturais.

Feita essa exposição prévia, abordam-se, nos próximos itens, as diferentes etapas de caracterização fenológica da vegetação, permitindo estabelecer um procedimento de mensuração do correspondente impacto da seca nessa mesma vegetação.

## **8.1 Introdução**

O clima é o principal indutor da fenologia da vegetação e as mudanças de fase fenológicas são diretamente influenciadas pela variabilidade climática. Entretanto, a fenologia exerce igualmente influência sobre o clima. A periodicidade e a intensidade dos eventos fenológicos são fatores que regulam os processos de troca entre a superfície e a atmosfera, como balanço de água, de energia e de carbono. Assim, o padrão fenológico de um determinado local tem potencial de influenciar o clima, tanto local quanto globalmente (Richardson *et al.*, 2013). Em regiões tropicais de clima sazonal e seco, a fenologia da vegetação será, sobretudo, o resultado da sazonalidade do regime de chuvas para aquele local, somando-se ao conjunto de estratégias das espécies em evitar o estresse hídrico em determinada comunidade vegetal.

O bioma caatinga, localizado na região semiárida brasileira, consiste em um mosaico de espécies decíduas e perenes, cuja fenologia, está adaptada à duração e à distribuição das chuvas nesse ambiente. Várias dessas espécies possuem estratégias similares para evitar o estresse hídrico, permitindo reuni-las em grupos funcionais que, por sua vez, terão um padrão fenológico similar (Oliveira *et al.*, 2015; Souza *et al.*, 2016). Uma das estratégias hídricas encontrada por algumas espécies decíduas na caatinga pode ser observada pela sua densidade de madeira. Plantas com baixa densidade de madeira são capazes de armazenar água em seu lenho reservando o seu consumo para os períodos secos do ano, ao passo que essa capacidade de armazenamento é menor em espécies com alta densidade de madeira (Lima e Rodal, 2010). Essa característica condiciona também a fenologia desses dois grupos, sendo que o primeiro tem uma deiscência tardia, ou seja, a queda das folhas ocorre após o período chuvoso, enquanto o segundo tem uma deiscência precoce, ou seja a queda das folhas ocorre antes do período chuvoso (Oliveira *et al.*, 2015). A mesma situação ocorre com relação à emergência foliar. Enquanto o primeiro grupo lança folhas ainda no período seco, a emergência foliar do segundo grupo ocorre após o estabelecimento do período chuvoso (Neves *et al.*, 2010; Lima *et al.*, 2012). Portanto, o comportamento fenológico de uma certa região não pode ser exclusivamente determinado pelo regime de chuvas. Deve-se levar em conta, também, a composição florística (Fisher *et al.*, 2007) e a proporção de indivíduos em cada grupo funcional para, assim, predizer o comportamento fenológico global daquela comunidade.

Acrescenta-se à incerteza em definir um comportamento fenológico comum para uma determinada superfície o fato do sincronismo fenológicos entre as espécies. O sincronismo é o grau de uniformidade em que as fases fenológicas ocorrem entre os indivíduos de uma mesma espécie. É conhecido que o sincronismo fenológico tende a

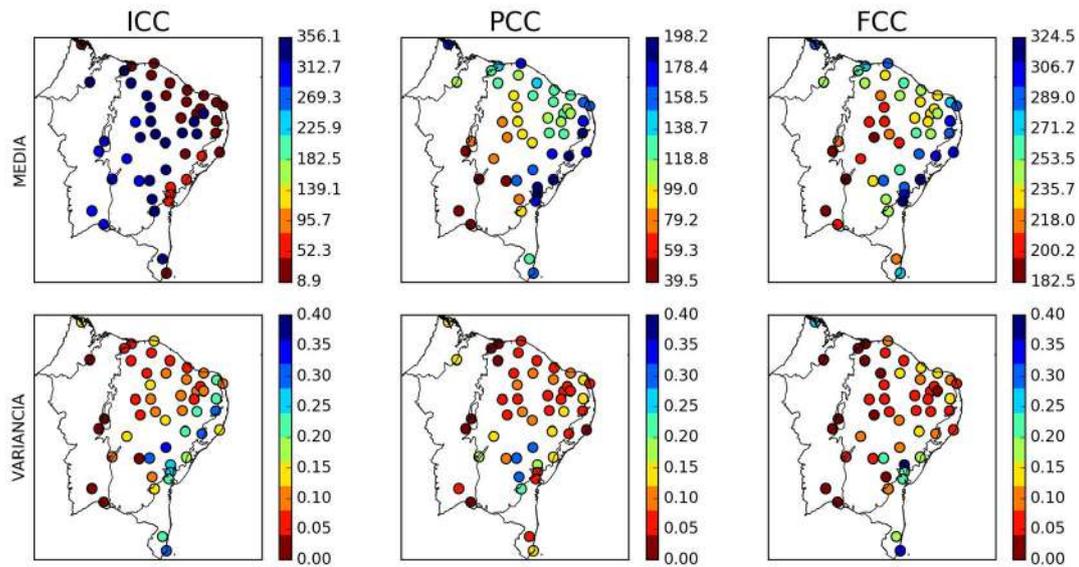
ser modificado em uma comunidade em função de uma variação climática (Machado *et al.*, 1997; Lima e Rodal, 2010). A distribuição da vegetação na caatinga ocorre em uma paisagem heterogênea, com variações topográficas, microclimáticas e edáficas (Araujo *et al.*, 2005). Em cada uma dessas componentes, haverá uma resposta singular das plantas ao estímulo da chuva. Assim, uma das possíveis razões para o baixo sincronismo deve-se a baixa disponibilidade hídrica no nível do indivíduo (Machado *et al.*, 1997) devido a uma distribuição desuniforme da umidade superficial do solo.

Os estudos de tendências temporais em fenologia tradicionalmente recorrem às análises de séries temporais para identificação de padrões nas datas dos eventos fenológicos (Cleland *et al.*, 2007). A estatística circular lida com variáveis cuja distribuição é contínua, em que não há diferença de grandeza entre os valores máximos e mínimos bem como o ponto zero é arbitrário (Zar, 2010). Um exemplo de variável que pode ser representada de forma circular é a data. Considerando dias julianos, na abordagem da estatística circular, o dia 365 (31 de dezembro) de um determinado ano, com o dia 01 (1 de janeiro) do ano seguinte, estariam distanciados de apenas um único dia e, portanto, contíguos. O emprego da estatística circular vem sendo amplamente empregado em ecologia, sobretudo para descrever a fenologia da vegetação a partir de observações de campo (Morellato *et al.*, 2010). A mesma abordagem pode ser feita em datas de fases fenológicas oriundas de curvas de perfil temporal NDVI, como adotado por Atzberger e Eilers (2011), ao caracterizar a variabilidade espacial das datas de ocorrência de valores mínimos e máximos em uma base de dados de sensoriamento remoto na América do Sul. No entanto, no que tange ao sensoriamento remoto, a aplicação da estatística circular ainda não foi amplamente empregada para descrever variabilidade temporal da fenologia em função de condições climáticas como por exemplo, durante períodos secos e úmidos.

Este trabalho propõe-se a avaliar a diferença na fenologia de superfície em anos classificados como secos e úmidos, tendo como referência os valores médios anuais de precipitação. Para cada fase fenológica, buscou-se observar a tendência da mudança, caracterizada por um deslocamento temporal positivo (atraso) ou negativo (adiantamento), com a significância da mudança medida a partir de um teste estatístico apropriado. Ao final, avaliou-se o efeito da precipitação e da temperatura na duração total da curva de crescimento.

## **8.2 Fenologia da Vegetação na Região da Caatinga**

A Figura 8.1 mostra a média e a variância angular do dia juliano para início, meio e fim do ciclo vegetativo. O início do ciclo do crescimento (ICC) ocorre de maneira bem uniforme na região nordeste. Na porção sul e central da CAT, inicia-se de outubro a novembro, enquanto, na porção norte, inicia-se em meados de janeiro. Na porção central da transição entre a CAT e o domínio da ATL, o início do ciclo ocorre em fevereiro. A distribuição espacial do pico do ciclo de crescimento (PCC) e o fim do ciclo de crescimento (FCC), ao contrário do ICC, são menos uniformes. O PCC ocorre de fevereiro a março na CAT e é mais precoce no sul e tardio no norte da região NE. Por outro lado, o FCC ocorre durante o período de junho a agosto e tem uma distribuição espacial similar ao PCC. Ao longo da região litorânea e parte da transição com a CAT, tanto o PCC quanto o FCC, têm o curso do ciclo vegetativo de maneira mais regular, indo de junho a novembro para o PCC e FCC, respectivamente.



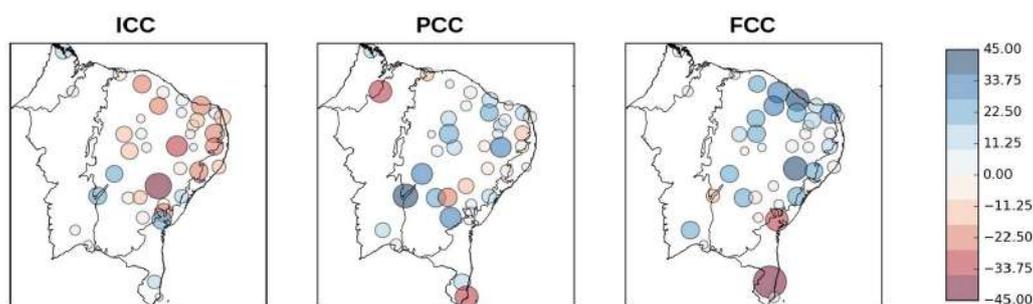
**Figura 8.1:** Média e variância angular (dias julianos) para o início do ciclo de crescimento (ICC), pico do ciclo de crescimento (PCC) e o final do ciclo de crescimento (FCC).

A variância angular dos dados fenológicos da vegetação, de maneira geral, não difere entre o início (ICC), o pico (PCC) e o final do ciclo de crescimento (FCC), mas sim em relação aos domínios de vegetação. Na região do CRD, a variância é baixa, inferior a 0,05, enquanto, na região da CAT e ATL, esse oscila entre 0,05 a 0,2. Excepcionalmente em relação ao ICC, um grupo destaca-se ao longo da costa leste do NE e na transição com a CAT com maior variância do que nas demais fases fenológicas, entre 0,2 e 0,4.

### 8.3 Variações Fenológicas em Função da Disponibilidade Hídrica

Os desvios temporais nas fases fenológicas da vegetação são mostrados na Figura 8.2, em que cada ponto representa a diferença da média angular entre os períodos

úmido e seco. Assim, os valores positivos (negativos) indicam as regiões em que o ciclo fenológico na seca ocorre posteriormente (anteriormente) em relação ao período úmido. A Figura 8.3 mostra a distribuição empírica para os dados mostrados na Figura 8.2, ilustrando diferenças na média angular dos dias julianos e a diferença do desvio padrão dos dias julianos entre o período seco e o período úmido.



**Figura 8.2:** Diferença da média angular entre o período úmido e seco para cada fase fenológica da vegetação: início do ciclo de crescimento (ICC); pico do ciclo de crescimento (PCC) e fim do ciclo de crescimento (FCC).

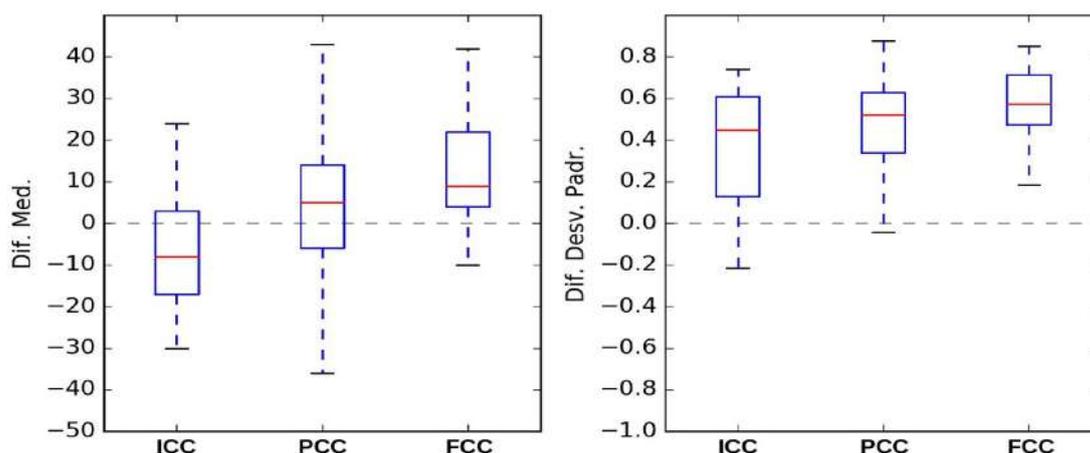
Observa-se que, em anos secos, o início do ciclo de crescimento da vegetação ocorre com atraso quando se compara com os anos úmidos na região NE. Esse efeito é predominante nas porções centro-norte da CAT e da costa leste, onde a diferença temporal pode ultrapassar quase um mês. Portanto, os resultados por sensoriamento são coerentes com o que se espera para a vegetação em relação aos biomas da região. O gráfico da Figura 8.3 mostra um atraso médio de 10 dias podendo chegar a 20 dias do ICC.

Estabelecido o ciclo vegetativo, a tendência é que o final do ciclo ocorra antes em anos secos quando se contrasta com anos úmidos gerando, conseqüentemente, uma redução do período total de crescimento, como se pode observar na Figura 8.2 e na Figura 8.3. Pela Figura 8.3, pode-se observar também que, ao contrário do ICC, a

distribuição dos valores para o FCC são todos positivos, exceto por alguns valores extremos. Por outro lado, a magnitude do adiantamento do fim do ciclo de crescimento é similar ao ICC, com um adiantamento de 10 dias em média podendo chegar a 20 dias do FCC.

Em Silveira *et al.* (2013), foi possível associar a longevidade foliar em plantas do semiárido em diferentes condições de disponibilidade de água. As mudanças nas datas de emissão e queda foliar observadas pelos autores estão de acordo com os resultados aqui obtidos. No entanto, de acordo com os resultados desta pesquisa, a sensibilidade à seca parece ser igual tanto no ICC quanto no FCC, o que diverge dos resultados de Lima *et al.* (2018). Todavia, esses autores consideraram a distribuição das chuvas e não apenas o volume total precipitado, o que parece ser um importante fator desencadeador da fenologia das plantas na CAT (Nogueira *et al.*, 2013).

Em relação ao PCC, ao contrário do ICC e o FCC, não há um padrão único no deslocamento temporal dessa fase nos anos secos ou úmidos. A maior variabilidade temporal do PCC concentra-se na porção centro-sul da caatinga, conforme mostrado na Figura 8.2. Em relação à distribuição dos dados, registra-se, pela Figura 8.3, uma alta dispersão dos dados em torno de uma mediana, o que pode ser resultado de uma maior variabilidade do acúmulo de biomassa sob influência da disponibilidade hídrica.

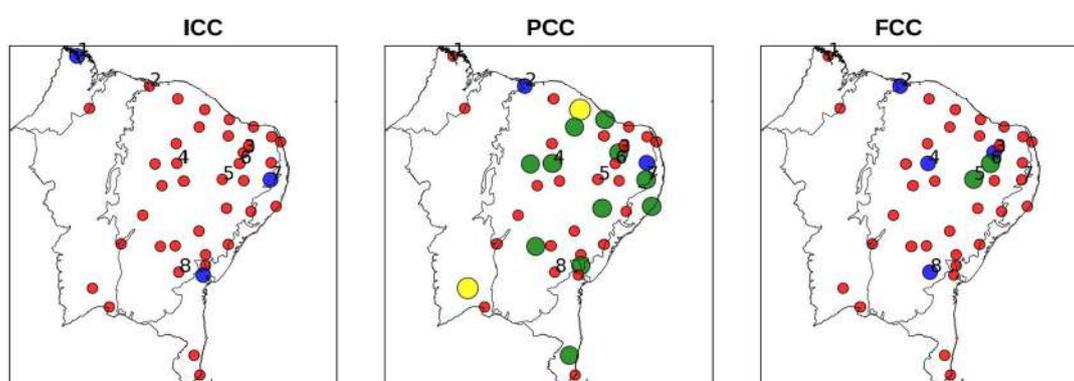


**Figura 8.3:** Gráfico de dispersão da diferença da média angular e da diferença do desvio padrão entre o período seco e período úmido para cada fase fenológica da vegetação: início do ciclo de crescimento (ICC); pico do ciclo de crescimento (PCC) e fim do ciclo de crescimento (FCC).

O PCC é uma fase intermediária que representa o fim do acúmulo de biomassa pela emissão de novas folhas (brotamento de novas folhas na planta) e o início da senescência foliar (morte e queda de folhas mais velhas na planta). Portanto, a data associada a essa métrica será sensível a mudanças na duração dessas duas etapas anteriores. Levando-se em consideração o fato que, durante períodos secos, o sincronismo das fases de emissão e queda foliar são reduzidos (Machado *et al.*, 1997), uma maior heterogeneidade fenológica entre as espécies poderia igualmente resultar em uma maior variabilidade na superfície entre os anos secos e anos úmidos.

O resultado do teste de *Watson* para duas amostras relativo à média angular no período seco e no úmido está na Figura 8.4. Como dito anteriormente, o PCC, o qual apresentava maior variabilidade entre os dois períodos, é também a fase fenológica com maior número de resultados significativos para o teste, com 15 registros. Em seguida, vêm o FCC e o ICC com um total de 7 e 3 registros, respectivamente. Além disso, concentra-se, no PCC, um maior número de testes positivos em maiores níveis de

significância, o que aponta para uma maior certeza de alterações dessa fase fenológica em função da seca. Não há uma clara associação entre o resultado positivo do teste de duas amostras *Watson* e o deslocamento temporal em relação à seca, se positivo ou negativo. Mesmo sem poder afirmar sobre a magnitude do efeito temporal, pode-se afirmar que a vegetação na porção norte da CAT e na porção norte do litoral leste são as que mais sofrem influência do clima sobre a sua fenologia, o que pode ser confirmado observando o PCC, em maior grau, e o FCC, em menor grau, na Figura 8.4.



**Figura 8.4:** Resultado do teste de *Watson* de homogeneidade para duas amostras para cada fase fenológica da vegetação: vermelho - não significativo; azul –  $0,05 < p < 0,1$ ; verde –  $0,01 < p < 0,05$ ; e amarelo –  $0,001 < p < 0,01$ . Os pontos selecionados para correlação da fenologia com clima estão identificados no mapa por nível de identificação (NI) de 1 a 8.

## 8.4 Influência Climática do Ciclo de Crescimento da Vegetação

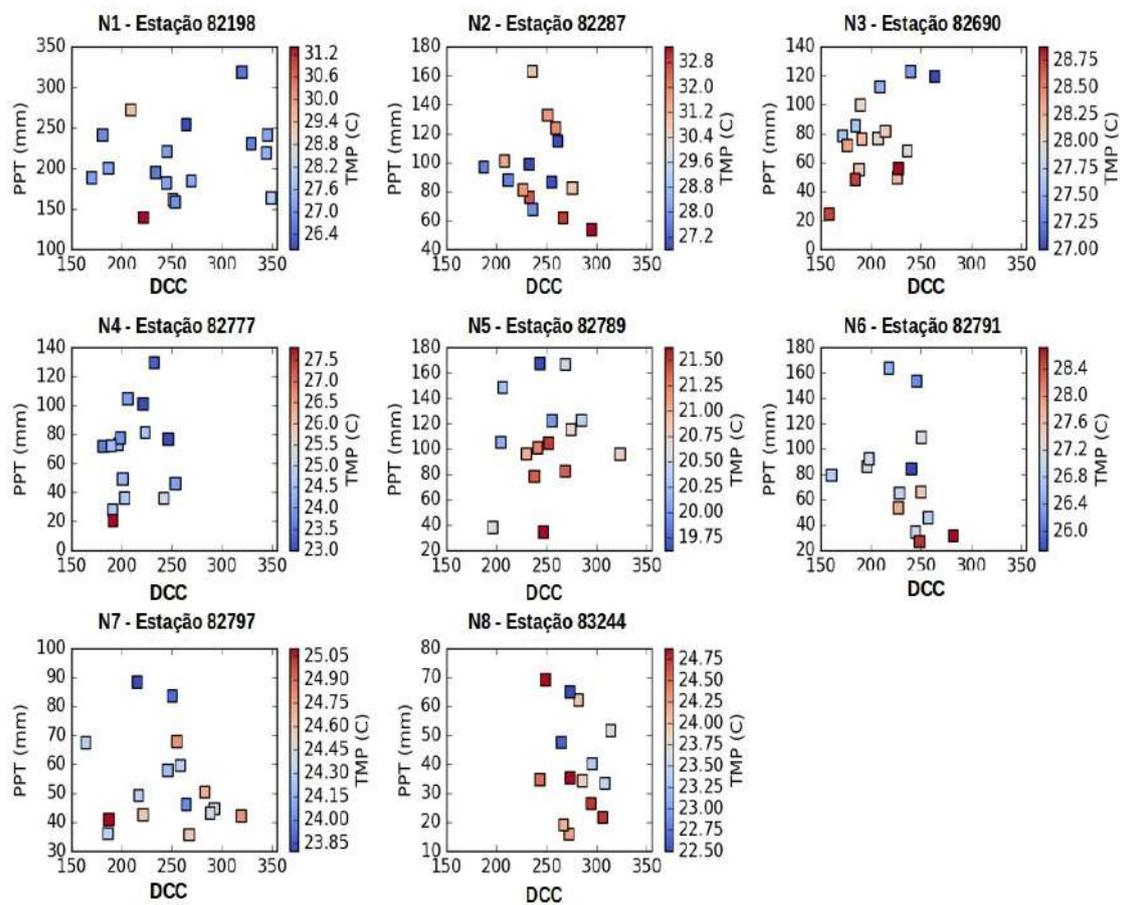
Para a etapa seguinte, selecionaram-se pontos amostrais com provável maior sensibilidade da fenologia ao clima. Para tal tarefa, oito (8) pontos foram escolhidos que tivessem resultado positivo ao teste *Watson* para duas amostras para o ICC e FCC, os quais encontram-se identificados por nível de identificação (NI) na Figura 8.4. Essas duas métricas representam desvios temporais no início e no final do ciclo, o que, por sua

vez, refletiria na duração total do ciclo de crescimento da vegetação. O gráfico de dispersão dos pontos selecionados está representado na Figura 8.5, em que o ciclo de crescimento é comparado com a temperatura e com a precipitação.

Analisando-se os gráficos, não é possível afirmar a presença de relação entre as condições climáticas anuais e a duração do ciclo de crescimento. Para a maioria das condições, a duração do ciclo ocorre de forma independente da magnitude dos valores de precipitação e de temperatura. Nos anos mais secos, de baixa pluviosidade, como é de se esperar, são observados extremos de alta temperatura devido ao menor efeito de esfriamento da superfície pela precipitação. No entanto, observa-se que o efeito combinado de temperatura e de precipitação resulta em um ciclo curto (NI 4 / Estação INMET 82777 e NI 7 / Estação INMET 82797), moderado (NI 5 / Estação INMET 82789) e até mesmo ciclo mais longo que o histórico (NI 2 / Estação INMET 82287 e NI 6 / Estação INMET 82791).

O único ponto que se mostrou sensível ao efeito combinado da temperatura e da precipitação foi o ponto NI 3 (Estação INMET 82690). Esse ponto amostral é a região de caatinga de Seridó no estado do Rio Grande do Norte. Trata-se de um conhecido núcleo de desertificação com intensa degradação da vegetação por pressão antrópica e, logo, com extensa exposição da superfície do solo (Costa *et al.*, 2009). Entretanto, mesmo em áreas preservadas, a vegetação arbustivo-arbórea é mais esparsa e de baixo porte do que em relação à outras áreas da caatinga (Amorim *et al.*, 2005). Nessa estação, observou-se que um ciclo de crescimento de 150 e 260 dias esteve associado a uma variação de 20 mm - 28,75°C e 120 mm - 27,0°C, respectivamente. Trata-se do único local em que um aumento da precipitação, seguido por uma menor temperatura, acompanha uma maior duração do ciclo de crescimento da vegetação.

O relevo da região é acidentado, com declives acentuados e possui solos rasos (Perez-Marin *et al.*, 2013). Assim, essa baixa capacidade de retenção de água do solo dificulta o crescimento da planta e, conseqüentemente, a duração do ciclo de crescimento após períodos secos. Além disso, de acordo com estes mesmos autores, a desertificação no Seridó, mesmo com influência humana, possui uma natureza espontânea. Logo, a fenologia, conjuntamente com dados climáticos, pode ser uma eficiente ferramenta no monitoramento de áreas degradadas e em processo de desertificação.



**Figura 8.5:** Gráfico de dispersão entre precipitação (mm) e temperatura anual (°C) com a duração do ciclo de crescimento (DCC).

## 8.5 Considerações Finais

Grande parte dos estudos de fenologia envolvendo sensoriamento remoto concentra-se em altas latitudes, onde o seu maior limitador é a temperatura. As regiões semiáridas, por outro lado, que são afetadas pela escassez de precipitação, recebem menos atenção apesar de sua relevância na cobertura vegetal global (Broich *et al.*, 2014). A extração de métricas fenológicas da vegetação por meio de sensoriamento remoto e emprego de estatística circular mostrou-se eficientes para monitoramento da cobertura vegetal no nordeste brasileiro. O uso de imagens MODIS permitiu avaliar a periodicidade do ciclo da vegetação em cada bioma assim como a sua variabilidade.

Por meio da metodologia proposta, foi possível mapear o efeito da seca no desvio temporal do ciclo da vegetação. De um modo geral, como previsto para regiões secas, ocorre um atraso do início do ciclo e uma redução do ciclo total de crescimento. Não se explorou, neste trabalho, a relação da distribuição e da intensidade no início do ciclo bem como o papel correspondente que pode vir a ter para uma emergência foliar uniforme na cobertura vegetal. A análise poderia, entretanto, explicar as diferenças na magnitude e na significância dos desvios do ciclo vegetativo observado na região. Em relação à duração total do ciclo vegetativo, não foi possível estabelecer um efeito de alteração de fases fenológicas com os dados climáticos da região, necessitando, talvez, de séries de dados mais longas para tal comprovação.

## Capítulo 9 - Conclusões e Recomendações

O objetivo primordial da tese foi caracterizar o fenômeno da seca pela perspectiva dos seus efeitos na vegetação na região nordeste e sudeste do Brasil. Tendo em vista o impacto da seca em larga escala na superfície, considerou-se a heterogeneidade dos diferentes tipos de vegetação nessa região. O presente estudo apoiou-se, sobretudo, em dados de sensoriamento remoto da vegetação.

Os dados provenientes do satélite MODIS foram empregados em diversos trabalhos científicos com o intuito de caracterizar a cobertura da superfície terrestre e registrar as mudanças e os processos que nela ocorrem. Em especial, no que diz respeito ao NDVI, recorre-se, tradicionalmente a esse índice para desenvolver estudos envolvendo a vegetação na superfície devido ao seu fácil cálculo e interpretação em diferentes tipos de vegetação. Em função do longo prazo alcançado pela missão MODIS, superando uma década de monitoramento, e dada a sua cobertura global, diversas publicações voltam-se para estudos de seca e de seus efeitos na vegetação, notadamente para avaliar o comportamento de diferentes classes de uso do solo associados a variáveis de sensoriamento remoto ou modelos climatológicos, como a temperatura de superfície, precipitação, umidade do solo e evapotranspiração, bem como suas potenciais e prováveis consequências ecológicas, meteorológicas e hídrico-ambientais.

Nesse sentido, investigou-se a região nordeste e sudeste do Brasil, as quais foram impactadas por uma severa seca entre o período de 2011 a 2015, mediante o emprego de um referencial que englobou, em síntese, três (3) tipos de análise para o comportamento

da vegetação diante do fenômeno da seca, discriminadas em variabilidades de natureza espaço-temporal, fenológica e sazonal. Técnicas como análise de componentes principais, teste de estacionaridade de séries temporais e modelagem da curva do perfil temporal do índice NDVI foram empregadas para tratar as bases de dados do modelo de superfície NOAH-GLDAS, índice de precipitação e evapotranspiração padronizado (SPEI) e dados observados de precipitação e temperatura da rede nacional de meteorologia (INMET).

Diante dessa síntese do trabalho de pesquisa, apresenta-se, na sequência, as conclusões e as recomendações, subdivididas pelos três eixos de análise que formam a abordagem metodológica desta tese.

## **9.1 Conclusões**

*Quanto à variabilidade espaço-temporal do NDVI e à covariabilidade com variáveis hidrometeorológicas na região leste do Brasil*

O padrão espaço-temporal da vegetação revelou que, apesar da severa seca ocorrida no período de 2012 a 2015 no leste do Brasil, a região do nordeste brasileiro foi aquela mais susceptível à deficiência hídrica, em especial o bioma caatinga. Na região nordeste, observa-se que a previsibilidade do NDVI é maior do que a do NDVI na região sudeste, uma vez que a maior correlação do primeiro com a precipitação, e demais variáveis hidroclimáticas estudadas, permite a antecipação do seu comportamento por meio de modelos de previsão do tempo e do clima. Apesar da limitação da resolução espacial, a covariabilidade do índice NDVI com dados do modelo GLDAS mostrou que a precipitação é a principal forçante na variabilidade da

vegetação, apesar da importância da umidade do solo e, com menos peso, da evapotranspiração.

*Quanto à sazonalidade do NDVI e à persistência e duração da seca na região nordeste do Brasil*

A extração de parâmetros sazonais dos dados NDVI para a região nordeste do Brasil mostrou-se adequada a partir da metodologia proposta, sendo possível identificar as áreas afetadas pela seca de 2012 a 2015 e outras possíveis áreas em estado de degradação mais sensíveis a seca. A análise da persistência da seca mostrou que a dinâmica padrão da vegetação se altera quando as condições de seca excedem um ano. O potencial de recuperação da vegetação é acentuadamente reduzido quando a seca persiste, como observado para as métricas sazonais AMP e o SIN.

*Quanto à fenologia do NDVI e à disponibilidade hídrica na caatinga do Brasil*

A fase fenológica vegetativa na região nordeste mostrou-se sensível à disponibilidade hídrica. Os resultados coletados ilustraram os desvios temporais na vegetação causados pelo déficit hídrico, bem como indicaram regiões com tendências significativas a mudanças no padrão fenológico. Apesar disso, regiões com alterações significativas nas fases fenológicas não mostraram aparente correlação com a duração total do seu ciclo de crescimento e com dados observados de precipitação e de temperatura média do ar.

## 9.2 Recomendações

*Quanto à variabilidade espaço-temporal do NDVI e à covariabilidade com variáveis hidrometeorológicas na região leste do Brasil*

O leste do Brasil possui biomas com alta riqueza ecológica distribuídos em uma ampla faixa climática. O conhecimento sobre a vulnerabilidade da vegetação à seca é fundamental para a implementação de programas nacionais de previsão e mitigação. Destaca-se que uma maior interpretabilidade dos resultados poderia ser alcançada ao se comparar, além dos dados do ciclo hidrológico, dados do balanço energético e do carbono.

Além do mais, devido à complexidade do fenômeno da seca, um índice com base em uma única variável pode não ilustrar satisfatoriamente a sua magnitude. Essa limitação poderia ser superada aplicando-se índices de seca multivariáveis, que visam reproduzir a variação de duas ou mais variáveis hidrometeorológicas empregando técnicas estatísticas. Portanto, esses índices têm potencial de explicar uma maior variabilidade de dados de vegetação via sensoriamento remoto e, logo, potencializar a geração de alguma estimativa com grau de previsibilidade como prognóstico sobre a evolução do comportamento da vegetação.

Apesar do tradicional emprego do índice NDVI em estudos da vegetação, o emprego de outros índices poderia auxiliar a compreensão do efeito da seca na vegetação. A variabilidade espaço-temporal do NDVI predominou na região semiárida em comparação com as demais áreas avaliadas nesta tese. Diferentes formulações de

índices e fontes alternativas de sensores poderiam melhor representar a variabilidade espaço-temporal da vegetação nos demais biomas estudados.

*Quanto à sazonalidade do NDVI e à persistência e duração da seca na região nordeste do Brasil*

A região nordeste demanda por ferramentas de monitoramento para rápida avaliação do impacto da seca e de tomadas de decisão estratégicas. Apesar da importância da classificação da seca quanto a sua persistência, sugere-se que outros parâmetros sejam adotados, de forma que possam explicar a dinâmica da vegetação. Devido ao fato dos dados hidroclimáticos terem diferentes origens, como dados de modelo, resultados de reanálise, interpolação de dados observados, é comum a divergência entre eles quanto à severidade da seca. Logo, recomenda-se a agregação de parâmetros de índice de seca, como a persistência e a duração por diferentes fontes de dados.

*Quanto à fenologia do NDVI e à disponibilidade hídrica na caatinga do Brasil*

O estudo limitou-se à fenologia de superfície, ou seja, delimitou uma determinada porção do terreno, assumindo-se que dispunha de um padrão fenológico único, comum a maioria das plantas naquele local. Recomenda-se a comparação de dados de séries temporais de sensoriamento remoto com dados prévios de proporção de espécies lenhosas e arbustivas no terreno. Entretanto, para tal avaliação, fazem-se necessários levantamentos fitossociológicos *in situ*, para, só assim, associar o padrão fenológico de superfície por diferentes grupos funcionais de plantas. Devido à limitação da metodologia, considerou-se exclusivamente o padrão de ascensão e queda da curva

NDVI como resultado da emergência e queda foliar, não se considerando o efeito do aumento ou diminuição do teor de clorofila que contribui igualmente para o sinal. O uso combinado de sensores óticos com dados de micro-ondas poderia auxiliar nessa análise, visto que esse último sensor é menos sensível ao conteúdo celular da folha e caracteriza melhor o relevo da superfície.

### **9.3 Síntese final**

Ao final deste trabalho, espera-se ter contribuído com o tema de seleção de variáveis biofísicas no contexto de mudanças climáticas. Descreve-se, ao longo desta tese, duas técnicas de decomposição de séries temporais NDVI, mais especificamente, (1) análise de componentes principais e (2) modelagem da curva do perfil temporal, as quais são capazes de relacionar duas dessas variáveis biofísicas com o clima da região nordeste e sudeste do Brasil, notadamente, a fenologia da vegetação e a produção de biomassa.

Em relação à fenologia, adota-se aqui o conceito de fenologia de superfície, que é o comportamento fenológico esperado da vegetação em uma grande extensão territorial. A obtenção dessas informações tem forte apelo em termos de demanda por dados de sensoriamento remoto. Em relação à produção de biomassa, optou-se por medidas indiretas de produção vegetal, que foram obtidas a partir de métricas extraídas da curva do perfil temporal NDVI. Essas métricas sazonais mostraram-se eficientes em isolar o efeito da seca em diferentes biomas e na identificação do estado de degradação da superfície.

Destaca-se que as variáveis biofísicas apresentadas, que são efetivamente passíveis de serem obtidas mediante o emprego de sensoriamento remoto, podem permitir antever o efeito de secas futuras por meio de diferentes modelos climáticos e antecipar o correspondente impacto na sociedade.

## Referências Bibliográficas

- ABBOTT, B. W., BISHOP, K., ZARNETSKE, J. P. *et al.*, 2019, “Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions”, *Nature Geoscience*, 12(7), pp. 533-540.
- ADAMI, M., BERNARDES, S., ARAI, E. *et al.*, 2018, “Seasonality of vegetation types of South America depicted by moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) time series”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 69, pp. 148-163.
- AGHAKOUCHAK, A., FARAHMAND, A., MELTON, F. S. *et al.*, 2015, “Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities”, *Reviews of Geophysics*, 53(2), pp. 452-480.
- ALLEN, R. G., TASUMI, M., MORSE, A. *et al.*, 2007, “Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Applications”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), pp. 395-406.
- ALLEN, R., E KJAERGAARD, J., 2010, “Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration (METRIC): Model Overview.” In: The 3rd USGS Modeling Conference.
- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C. *et al.*, 2013, “Köppen's climate classification map for Brazil”, *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), pp. 711-728.

- AMORIM, I. L. D., SAMPAIO, E. V., ARAÚJO, E. D. L., 2005, “Flora e estrutura da vegetação arbustivo-arbórea de uma área de caatinga do Seridó, RN, Brasil”, *Acta Botânica Brasílica*, 19(3), pp. 615-623.
- ANDERSON, M. C., NORMAN, J. M., DIAK, G. R. *et al.*, 1997, “A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing”, *Remote Sensing of Environment*, 60(2), pp. 195-216.
- ANDERSON, M. C., KUSTAS, W. P., NORMAN, J. M. *et al.*, 2011, “Mapping daily evapotranspiration at field to continental scales using geostationary and polar orbiting satellite imagery”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1), pp. 223-239.
- ANDERSON, M. C., HAIN, C., OTKIN, J. *et al.*, 2013, “An intercomparison of drought indicators based on thermal remote sensing and NLDAS-2 simulations with US Drought Monitor classifications”, *Journal of Hydrometeorology*, 14(4), pp. 1035-1056.
- ANDERSON, M. C., ZOLIN, C. A., SENTELHAS, P. C. *et al.*, 2016, "The Evaporative Stress Index as an indicator of agricultural drought in Brazil: An assessment based on crop yield impacts, *Remote Sensing of Environment*, 174, pp. 82-99.
- ARAÚJO, 2005, “Repartição da flora lenhosa no domínio da Caatinga”. In: FREIRE, E., 2005, *Análise das variações da biodiversidade do bioma Caatinga: suporte a estratégias regionais de conservação*, Seção 1, Ministério do Meio Ambiente.
- ARCHIBALD, S., SCHOLE, R. J., 2007, “Leaf green-up in a semi-arid African savanna-separating tree and grass responses to environmental cues”, *Journal of Vegetation Science*, 18(4), pp. 583-594.

- ARORA, V., 2002, "Modeling vegetation as a dynamic component in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and hydrological models", *Reviews of Geophysics*, 40(2), pp. 3-1.
- ATZBERGER, C., E EILERS, P. H., 2011, "A time series for monitoring vegetation activity and phenology at 10-daily time steps covering large parts of South America", *International Journal of Digital Earth*, 4(5), pp. 365-386.
- AWANGE, J. L., MPELASOKA, F., GONCALVES, R. M., 2016, "When every drop counts: Analysis of Droughts in Brazil for the 1901-2013 period", *Science of the Total Environment*, 566, pp. 1472-1488.
- AWAYA, Y., KODANI, E., TANAKA, K. *et al.*, 2004, "Estimation of the global net primary productivity using NOAA images and meteorological data: changes between 1988 and 1993", *International Journal of Remote Sensing*, 25(9), pp. 1597-1613.
- BAILING, M., ZHIYONG, L., CUNZHU, L. *et al.*, 2018, "Temporal and spatial heterogeneity of drought impact on vegetation growth on the Inner Mongolian Plateau", *The Rangeland Journal*, 40(2), pp. 113-128.
- BARBOSA, H. A., HUETE, A. R., BAETHGEN, W. E., 2006, A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil, *Journal of Arid Environments*, 67(2), pp. 288-307.
- BARBOSA, H. A., KUMAR, T. L., 2016, "Influence of rainfall variability on the vegetation dynamics over Northeastern Brazil", *Journal of Arid Environments*, 124, pp. 377-387.

- BARBOSA, H. A., KUMAR, T. L., PAREDES, F. *et al.*, 2019, “Assessment of Caatinga response to drought using Meteosat-SEVIRI Normalized Difference Vegetation Index (2008–2016)”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 148, pp. 235-252.
- BARTLETT, M. S., 1950, “Tests of Significance in Factor Analysis”, *British Journal of Statistical Psychology*. Vol. 3(2). pp. 77-85.
- BASTIAANSEN, W. G., MENENTI, M., FEDDES, R. A., 1998, “A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation”, *Journal of Hydrology*, 212, pp. 198-212.
- BATISTA, G. T., SHIMABUKURO, Y. E., LAWRENCE, W. T., 1997, “The long-term monitoring of vegetation cover in the Amazonian region of northern Brazil using NOAA-AVHRR data”, *International Journal of Remote Sensing*, 18(15), pp. 3195-3210.
- BEHARI, J., 2005, “Microwave Remote Sensing Techniques in Soil Moisture Estimation”, *Microwave Dielectric Behavior of Wet Soils*, pp. 66-91.
- BELDA, M., HOLTANOVÁ, E., HALENKA, T. *et al.*, 2014, “Climate classification revisited: from Köppen to Trewartha”, *Climate Research*, 59(1), pp. 1-13.
- de BEURS, K. M., HENEGBRY, G. M., 2010, “Spatio-temporal statistical methods for modelling land surface phenology”. In: HUDSON, I. L., KEATLEY, M. R., *Phenological Research*, pp. 177-208, Springer, Dordrecht.

- de BEURS, K. M., HENEERY, G. M., 2013, "Vegetation phenology in global change studies". In: SCHWARTZ, M. D., *Phenology: An integrative environmental science*, pp. 483-502, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- BHUIYAN, C., SAHA, A. K., BANDYOPADHYAY, N. *et al.*, 2017, "Analyzing the impact of thermal stress on vegetation health and agricultural drought—a case study from Gujarat, India", *GIScience e Remote Sensing*, 54(5), pp. 678-699.
- BODNER, G., NAKHFOROOSH, A., KAUL, H. P., 2015, "Management of crop water under drought: a review", *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), pp. 401-442.
- BOISVENUE, C., RUNNING, S. W., 2006, "Impacts of climate change on natural forest productivity—evidence since the middle of the 20th century", *Global Change Biology*, 12(5), pp. 862-882.
- BOLTEN, J. D., CROW, W. T., ZHAN, X. *et al.*, 2009, "Evaluating the utility of remotely sensed soil moisture retrievals for operational agricultural drought monitoring", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(1), pp. 57-66.
- BONAN, G., 2015, *Ecological climatology: concepts and applications*. Cambridge University Press.
- BORCHERT, R., RIVERA, G., HAGNAUER, W., 2002, "Modification of Vegetative Phenology in a Tropical Semi-deciduous Forest by Abnormal Drought and Rain", *Biotropica*, 34(1), pp. 27-39.

- BRANDO, P., RAY, D., NEPSTAD, D. *et al.*, 2006, “Effects of partial throughfall exclusion on the phenology of *Coussarea racemosa* (Rubiaceae) in an east-central Amazon rainforest”, *Oecologia*, 150(2), pp. 181-189.
- BRITO, S. S. B., CUNHA, A. P. M., CUNNINGHAM, C. C. *et al.*, 2018, “Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region”, *International Journal of Climatology*, 38(2), pp. 517-529.
- BROCCA, L., MELONE, F., MORAMARCO, T. *et al.*, 2010, “Improving runoff prediction through the assimilation of the ASCAT soil moisture product”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10), pp. 1881-1893.
- BROICH, M., HUETE, A., TULBURE, M. G. *et al.*, 2014, “Land surface phenological response to decadal climate variability across Australia using satellite remote sensing”, *Biogeosciences*, 11(18), pp. 5181-5198.
- BROWN, J. F., WARDLOW, B. D., TADESSE, T. *et al.*, 2008, “The Vegetation Drought Response Index (VegDRI): A new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation”, *GIScience e Remote Sensing*, 45(1), pp. 16-46.
- BROWN, M. E., DE BEURS, K., VRIELING, A., 2010, “The response of African land surface phenology to large scale climate oscillations”, *Remote Sensing of Environment*, 114(10), pp. 2286-2296.
- BUDDE, M. E., TAPPAN, G., ROWLAND, J. ET AL., 2004, “Assessing land cover performance in Senegal, West Africa using 1-km integrated NDVI and local variance analysis”, *Journal of Arid Environments*, 59(3), pp. 481-498.

- BYUN, H. R., WILHITE, D. A., 1999, "Objective quantification of drought severity and duration", *Journal of Climate*, 12(9), pp. 2747-2756.
- CAMPOS, J. N. B., 2015, "Paradigms and public policies on drought in northeast Brazil: A historical perspective", *Environmental Management*, 55(5), pp. 1052-1063.
- CARLSON, T. N., GILLIES, R. R., SCHMUGGE, T. J., 1995, "An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil water content", *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3-4), pp. 191-205.
- CECCATO, P., FLASSE, S., TARANTOLA, S. *et al.*, 2001, "Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain", *Remote Sensing of Environment*, 77: 22–33.
- CECCATO, P., FLASSE, S., GREGOIRE, J.M., 2002, "Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2. Validation and applications", *Remote Sensing of Environment*, 82, pp. 198-207.
- CHEN, F., MITCHELL, K., SCHAAKE, J. *et al.*, 1996, "Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D3), pp. 7251-7268.
- CHEN, J., JÖNSSON, P., TAMURA *et al.*, 2004, "A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter", *Remote Sensing of Environment*, 91(3-4), pp. 332-344.
- CHOAT, B., JANSEN, S., BRODRIBB, T. J. *et al.*, 2012, "Global convergence in the vulnerability of forests to drought", *Nature*, 491(7426), pp. 752.

- CHOLER, P., MICHALET, R., CALLAWAY, R. M., 2001, "Facilitation and competition on gradients in alpine plant communities", *Ecology*, 82(12), pp. 3295-3308.
- CHU, L., LIU, Q., HUANG, C. *et al.*, 2016, "Monitoring of winter wheat distribution and phenological phases based on MODIS time-series: A case study in the Yellow River Delta, China", *Journal of Integrative Agriculture*, 15(10), pp. 2403-2416.
- CHUG, D., E DOMINGUEZ, F., 2019, "Isolating the observed influence of vegetation variability on the climate of La Plata River Basin", *Journal of Climate*, 32(14), pp. 4473-4490.
- CHURKINA, G., RUNNING, S. W., 1998, "Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global terrestrial biomes", *Ecosystems*, 1(2), pp. 206-215.
- CIAIS, P., REICHSTEIN, M., VIOVY, N. *et al.*, 2005, "Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003", *Nature*, 437(7058), pp. 529.
- CLARK, J. S., IVERSON, L., WOODALL, C. W. *et al.*, 2016, "The impacts of increasing drought on forest dynamics, structure, and biodiversity in the United States", *Global Change Biology*, 22(7), pp. 2329-2352.
- CLELAND, E. E., CHUINE, I., MENZEL, A. *et al.*, 2007, "Shifting plant phenology in response to global change", *Trends in Ecology Evolution*, 22(7), pp. 357-365.

- COELHO, M. M., AMORIM, A. M., 2014, “Floristic composition of the Montane Forest in the Almadina-Barro Preto axis, Southern Bahia, Brazil”, *Biota Neotropica*, 14(1), pp. 1-41.
- COELHO, C. A., CARDOSO, D. H., FIRPO, M. A., 2016a, “Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil”, *Theoretical and Applied Climatology*, 125(3-4), pp. 769-784.
- COELHO, C. A., OLIVEIRA, C. P., AMBRIZZI, T. *et al.*, 2016b, “The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections”, *Climate Dynamics*, 46(11-12), pp. 3737-3752.
- COLLINS, J. B., WOODCOCK, C. E., 1996, “An assessment of several linear change detection techniques for mapping forest mortality using multitemporal Landsat TM data”, *Remote Sensing of Environment*, 56(1), pp. 66-77.
- COOK, E. R., SEAGER, R., CANE, M. A. *et al.*, 2007, “North American drought: Reconstructions, causes, and consequences”, *Earth-Science Reviews*, 81(1-2), pp. 93-134.
- COSGROVE, B. A., LOHMANN, D., MITCHELL, K. E. *et al.*, 2003, “Real-time and retrospective forcing in the North American Land Data Assimilation System (NLDAS) project”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22).
- COSTA, T. C., OLIVEIRA, M. A., ACCIOLY, L. J. D. O. *et al.*, 2009, “Análise da degradação da caatinga no núcleo de desertificação do Seridó (RN/PB)”, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13, pp. 961-974.

- CROW, W. T., KUMAR, S. V., BOLTEN, J. D., 2012, "On the utility of land surface models for agricultural drought monitoring", *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, pp. 3451-3460.
- CUNHA, A. P. M., ALVALÁ, R. C., NOBRE, C. A., 2015, "Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region", *Agricultural and Forest Meteorology*, 214, pp. 494-505.
- DAHALE, S. D., PANCHAWAGH, N., SINGH, S. V., 1994, "Persistence in rainfall occurrence over tropical south-east Asia and equatorial Pacific", *Theoretical and Applied Climatology*, 49(1), pp. 27-39.
- DAHLIN, K. M., PONTE, D. D., SETLOCK, E., 2017, "Global patterns of drought deciduous phenology in semi-arid and savanna-type ecosystems", *Ecography*, 40(2), pp. 314-323.
- DAI, A., 2011, "Drought under global warming: a review", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), pp. 45-65.
- DAI, A., 2013, "Increasing drought under global warming in observations and models", *Nature Climate Change*, 3(1), pp. 52.
- DAVIES-BARNARD, T., VALDES, P. J., JONES, C. D., 2014, "Sensitivity of a coupled climate model to canopy interception capacity", *Climate Dynamics*, 42(7-8), pp. 1715-1732.
- DAVIS, C. L., HOFFMAN, M. T., ROBERTS, W., 2017, "Long-term trends in vegetation phenology and productivity over Namaqualand using the GIMMS

- AVHRR NDVI3g data from 1982 to 2011”, *South African Journal of Botany*, 111, pp. 76-85.
- DAVISON, J. E., BRESHEARS, D. D., VAN LEEUWEN, W. J., 2011, “Remotely sensed vegetation phenology and productivity along a climatic gradient: on the value of incorporating the dimension of woody plant cover”, *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), pp. 101-113.
- DESSAY, N., LAURENT, H., MACHADO, L. A. *et al.*, 2004, “Comparative study of the 1982–1983 and 1997–1998 El Nino events over different types of vegetation in South America”, *International Journal of Remote Sensing*, 25(20), pp. 4063-4077.
- DIAS, L. C., PIMENTA, F. M., SANTOS, A. B. *et al.*, 2016, “Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture”, *Global Change Biology*, 22(8), pp. 2887-2903.
- Di DOMENICO, A., LAGUARDIA, M., MARGIOTTA, M., 2010, “Investigating the propagation of droughts in the water cycle at the catchment scale”. In: *International Workshop Advances in statistical hydrology*, pp. 23-25.
- DRACUP, J. A., LEE, K. S., PAULSON Jr, E. G., 1980, “On the definition of droughts”, *Water Resources Research*, 16(2), pp. 297-302.
- DRAGONI, D., RAHMAN, A. F., 2012, “Trends in fall phenology across the deciduous forests of the Eastern USA”, *Agricultural and Forest Meteorology*, 157, pp. 96-105.

- DUAN, S., HE, H., SPETICH, M. (2018, Effects of Growing-Season Drought on Phenology and Productivity in the West Region of Central Hardwood Forests, USA. *Forests*, 9(7), pp. 377.
- DUTRA, E., VITERBO, P., MIRANDA, P. M., 2008, “ERA-40 reanalysis hydrological applications in the characterization of regional drought”, *Geophysical Research letters*, 35(19).
- EASTMAN, J., SANGERMANO, F., MACHADO, E., 2013, “Global trends in seasonality of normalized difference vegetation index (NDVI), 1982-2011”, *Remote Sensing*, 5(10), pp. 4799-4818.
- EK, M. B., MITCHELL, K. E., LIN, Y. *et al.*, 2003, “Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22).
- EKLUNDH, L., JÖNSSON, P., 2012, *TIMESAT 3.1 software manual*. Lund University, Sweden, pp. 1-82.
- EL-VILALY, M. A. S., DIDAN, K., MARSH, S. E. *et al.*, 2018, “Vegetation productivity responses to drought on tribal lands in the four corners region of the Southwest USA”, *Frontiers of Earth Science*, 12(1), pp. 37-51.
- ESCOBAR, H., 2015, “Drought triggers alarms in Brazil's biggest metropolis”, *Science*, 347, 812.
- ESPINOZA, J. C., RONCHAIL, J., FRAPPART, F. *et al.*, 2013, “The major floods in the Amazonas River and tributaries (Western Amazon basin) during the 1970–

- 2012 period: A focus on the 2012 flood”, *Journal of Hydrometeorology*, 14(3), pp. 1000-1008.
- FAMIGLIETTI, J. S., RODELL, M. 2013, “Water in the balance”, *Science*, 340(6138), pp. 1300-1301.
- FENSHOLT, R., PROUD, S. R., 2012, “Evaluation of earth observation based global long term vegetation trends—Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series”, *Remote sensing of Environment*, 119, pp. 131-147.
- FISHER, J. I., RICHARDSON, A. D., MUSTARD, J. F., 2007, “Phenology model from surface meteorology does not capture satellite-based greenup estimations”, *Global Change Biology*, 13(3), pp. 707-721.
- FORD, T., LABOSIER, C. F., 2014, “Spatial patterns of drought persistence in the Southeastern United States”, *International Journal of Climatology*, 34(7), pp. 2229-2240.
- FORMAGGIO, A. R., SANCHES, I. D. A., 2017, *Sensoriamento remoto em agricultura*, São Paulo, Oficina de Textos.
- FRANCHITO, S. H., BRAHMANANDA RAO, V., GAN, M. A. *et al.*, 2010, “Onset and end of the rainy season and corn yields in São Paulo State, Brazil”, *Geofísica Internacional*, 49(2), pp. 69-76.
- GAN, M. A., RODRIGUES, L. R., RAO, V. B., 2009, “Monção na América do Sul”. In: CAVALCANTI, I. F, *Tempo e clima no Brasil*, capítulo 19, São Paulo, Oficina de textos.

- GANGULI, P., GANGULY, A. R., 2016, "Space-time trends in US meteorological droughts", *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 8, pp. 235-259.
- GARONNA, I., de JONG, R., de WIT, A. J. *et al.*, 2014, "Strong contribution of autumn phenology to changes in satellite-derived growing season length estimates across Europe (1982–2011)", *Global Change Biology*, 20(11), pp. 3457-3470.
- GE, Q., WANG, H., RUTISHAUSER, T. *et al.*, 2015, "Phenological response to climate change in China: a meta-analysis", *Global Change Biology*, 21(1), pp. 265-274.
- GETIRANA, A. 2016, "Extreme water deficit in Brazil detected from space", *Journal of Hydrometeorology*, 17(2), pp. 591-599.
- GOUVEIA, C., TRIGO, R. M., da CAMARA, C. C., 2009, "Drought and vegetation stress monitoring in Portugal using satellite data", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(1), pp. 185-195.
- GOUVEIA, C. M., BISTINAS, I., LIBERATO, M. L. *et al.*, 2016, "The outstanding synergy between drought, heatwaves and fuel on the 2007 Southern Greece exceptional fire season", *Agricultural and Forest Meteorology*, 218, pp. 135-145.
- GU, Y., BROWN, J. F., VERDIN, J. P. *et al.*, 2007, "A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States", *Geophysical Research Letters*, 34(6).
- GURGEL, H. C., FERREIRA, N. J., 2003, "Annual and interannual variability of NDVI in Brazil and its connections with climate", *International Journal of Remote Sensing*, 24(18), pp. 3595-3609.

- GUTIERREZ, A. P. A., ENGLE, N. L., de NYS, E., 2014, "Drought preparedness in Brazil", *Weather and Climate Extremes*, 3, pp. 95-106.
- HALL-BEYER, M., 2003, "Comparison of single-year and multiyear NDVI time series principal components in cold temperate biomes", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11), pp. 2568-2574.
- HAMILL, T. M., BATES, G. T., WHITAKER, J. S. *et al.*, 2013, "NOAA's second-generation global medium-range ensemble reforecast dataset", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(10), pp. 1553-1565.
- HAN, X., FRANSEN, H. J. H., MONTZKA, C. *et al.*, 2014, "Soil moisture and soil properties estimation in the Community Land Model with synthetic brightness temperature observations", *Water Resources Research*, 50(7), pp. 6081-6105.
- HANNAFORD, J., LLOYD-HUGHES, B., KEEF, C. *et al.*, 2011, "Examining the large-scale spatial coherence of European drought using regional indicators of precipitation and streamflow deficit", *Hydrological Processes*, 25(7), pp. 1146-1162.
- HAO, Z., SINGH, V. P., 2013, "Modeling multisite streamflow dependence with maximum entropy copula", *Water Resources Research*, 49(10), pp. 7139-7143.
- HAO, Z., SINGH, V. P., 2015, "Drought characterization from a multivariate perspective: A review", *Journal of Hydrology*, 527, pp. 668-678.
- HARRIS, I. P. D. J., JONES, P. D., OSBORN, T. J., 2014, "Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset", *International Journal of Climatology*, 34(3), pp. 623-642.

- HASHIMOTO, H., NEMANI, R. R., WHITE, M. A. *et al.*, 2004, “El Nino–Southern Oscillation–induced variability in terrestrial carbon cycling”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D23).
- HASTENRATH, S., 1990, “Prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies”, *Journal of Climate*, 3(8), pp. 893-904.
- HASTENRATH, S., 2012, “Exploring the climate problems of Brazil’s Nordeste: a review”, *Climatic Change*, 112(2), pp. 243-251.
- HAYES, M. J., SVOBODA, M. D., WIIHITE, D. A., 1999, “Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(3), pp. 429-438.
- HEAVENS, N. G., WARD, D. S., NATALIE, M. M, 2013, “Studying and projecting climate change with earth system models”, *Nature Education Knowledge*, 4(5), pp. 4.
- HENEGBRY, G. M., de BEURS, K. M, 2013, “Remote sensing of land surface phenology: A prospectus”. In: SCHWARTZ, M. D., *Phenology: An integrative environmental science*, pp. 483-502, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- HEUMANN, B. W., SEAQUIST, J. W., EKLUNDH, L. *et al.*, 2007, “AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982-2005”, *Remote Sensing of Environment*, 108(4), pp. 385-392.
- HICKLER, T., EKLUNDH, L. SEAQUIST, J. *et al.*, 2005, “Precipitation controls Sahel greening trend”, *Geophysical Research Letters*, 32(21).

- HOLBEN, B. N., 1986, "Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data", *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), pp. 1417-1434.
- HOLM, A. M., CRIDLAND, S. W., RODERICK, M. L., 2003, "The use of time-integrated NOAA NDVI data and rainfall to assess landscape degradation in the arid shrubland of Western Australia", *Remote Sensing of Environment*, 85(2), pp. 145-158.
- HONG, S. Y., KALNAY, E., 2000, "Role of sea surface temperature and soil-moisture feedback in the 1998 Oklahoma-Texas drought", *Nature*, 408(6814), pp. 842.
- HOOPER, D. U., ADAIR, E. C., CARDINALE, B. J. *et al.*, 2012, "A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change", *Nature*, 486(7401), pp. 105.
- HOUEROU, H. N., BINGHAM, R. L., SKERBEK, W., 1988, "Relationship between the variability of primary production and the variability of annual precipitation in world arid lands", *Journal of Arid Environments*, 15(1), pp. 1-18.
- HOUNAM, C. E., BURGOS, J. J., KALIK, M. S. *et al.*, 1975, "Drought and agriculture". In: Report of the Commission for agricultural meteorology Working group on the assessment of drought, Technical Note-World Meteorological Organization (WMO), pp.138.
- HOUNSOU-GBO, G. A., 2015, *Dinâmica do Atlântico tropical e seus impactos sobre o clima ao longo da costa do Nordeste do Brasil*. Tese de D.Sc., UFPE, Recife, Brasil.

- HUBERT, P., CARBONNEL, J. P., CHAOUICHE, A, 1989, “Segmentation des séries hydrométéorologiques-application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest”, *Journal of Hydrology*, 110(3-4), pp. 349-367.
- HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T. *et al.*, 2002, “Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices”, *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), pp. 195-213.
- HUETE, A. R., DIDAN, K., SHIMABUKURO, Y. E. *et al.*, 2006, “Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season”, *Geophysical Research Letters*, 33(6).
- HUFFMAN, G. J., BOLVIN, D. T., NELKIN, E. J. *et al.*, 2007, “The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales”, *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), pp. 38-55.
- Van HUIJGEVOORT, M. H. J., VAN LANEN, H. A. J., TEULING, A. J. *et al.*, 2014, “Identification of changes in hydrological drought characteristics from a multi-GCM driven ensemble constrained by observed discharge”, *Journal of Hydrology*, 512, pp. 421-434.
- IBGE, 1997, *Recursos naturais e meio ambiente: Uma visão do Brasil*. Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro.
- IVITS, E., CHERLET, M., TOTH, G, 2012, “Combining satellite derived phenology with climate data for climate change impact assessment”, *Global and Planetary Change*, 88, pp. 85-97.

- JACKSON , J.E, 1991, *A User's Guide To Principal Component*. John Wiley e Sons Inc., New York USA .
- JENERETTE, G. D., SCOTT, R. L., HUETE, A. R, 2010, “Functional differences between summer and winter season rain assessed with MODIS-derived phenology in a semi-arid region”, *Journal of Vegetation Science*, 21(1), pp. 16-30.
- JENSEN, J. R, 2007, “Remote sensing of the environment: An earth resource perspective”. Second Pearson Education India.
- JEONG, S. J., HO, C. H., GIM, H. J. *et al.*, 2011, “Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982–2008”, *Global Change Biology*, 17(7), pp. 2385-2399.
- JONG, R., SCHAEPMAN, M. E., FURRER, R, 2013, “Spatial relationship between climatologies and changes in global vegetation activity”, *Global Change Biology*, 19(6), pp. 1953-1964.
- JÖNSSON, P., EKLUNDH, L, 2002, “Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data”, *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), pp. 1824-1832.
- JÖNSSON, P., EKLUNDH, L, 2004, “TIMESAT - A program for analyzing time-series of satellite sensor data”, *Computers e Geosciences*, 30(8), pp. 833-845.
- NEGRÓN JUÁREZ, R. I., T. LIU, W., 2001, “FFT analysis on NDVI annual cycle and climatic regionality in Northeast Brazil”, *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 21(14), pp. 1803-1820.

- JUSTICE, C. O., TOWNSHEND, J. R. G., VERMOTE, E. F. et al. , 2002, “An overview of MODIS Land data processing and product status”, *Remote sensing of Environment*, 83(1-2), pp. 3-15.
- KAM, J., SHEFFIELD, J., WOOD, E. F, 2014, “Changes in drought risk over the contiguous United States (1901-2012): The influence of the Pacific and Atlantic Oceans”, *Geophysical Research Letters*, 41(16), pp. 5897-5903.
- De KAUWE, M. G., ZHOU, S. X., MEDLYN, B. E, 2015, “Do land surface models need to include differential plant species responses to drought? Examining model predictions across a mesic-xeric gradient in Europe”, *Biogeosciences*, 12, pp. 7503-7518.
- KAYANO, M. T., SANSÍGOLO, C, 2009, “Interannual to decadal variations of precipitation and daily maximum and daily minimum temperatures in southern Brazil”, *Theoretical and Applied Climatology*, 97(1-2), pp. 81-90.
- KEYANTASH, J., DRACUP, J. A, 2002, “The quantification of drought: an evaluation of drought indices”. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), pp. 1167-1180.
- KIM, T. W., VALDÉS, J. B., APARICIO, J, 2002, “Frequency and spatial characteristics of droughts in the Conchos River Basin, Mexico”, *Water International*, 27(3), pp. 420-430.
- KINGSTON, D. G., FLEIG, A. K., TALLAKSEN, L. M. et al., 2013, “Ocean–atmosphere forcing of summer streamflow drought in Great Britain”, *Journal of Hydrometeorology*, 14(1), pp. 331-344.

- KNAPP, A. K., SMITH, M. D, 2001, "Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production", *Science*, 291(5503), pp. 481-484.
- KOGAN, F. N, 1995, "Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection", *Advances in Space Research*, 15(11), pp. 91-100.
- KOTTEGODA, N. T., NATALE, L., RAITERI, E, 2004, "Some considerations of periodicity and persistence in daily rainfalls", *Journal of Hydrology*, 296(1-4), pp. 23-37.
- KUMAR, S. V., PETERS-LIDARD, C. D., MOCKO, D., 2014, "Assimilation of remotely sensed soil moisture and snow depth retrievals for drought estimation", *Journal of Hydrometeorology*, 15(6), pp. 2446-2469.
- LAIZÉ, C. L., HANNAH, D. M., 2010, "Modification of climate–river flow associations by basin properties", *Journal of Hydrology*, 389(1-2), pp. 186-204.
- LANDAU, E. C., HIRSCH, A., MUSINSKY, J, 2008, "Vegetation cover and land use in the Atlantic coastal forest of southern Bahia, Brazil, based on satellite imagery: a comparison among municipalities. In: THOMAS, W. W., *The Atlantic Coastal Forest of Northeastern Brazil*", pp, 221-244.
- Van LANEN, H. A. J., WANDERS, N., TALLAKSEN, L. M. *et al.*, 2013, "Hydrological drought across the world: impact of climate and physical catchment structure", *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, pp. 1715-1732.
- LEITMAN, P., AMORIM, A., MENINI NETO, 2014, "Epiphytic angiosperms in a mountain forest in southern Bahia, Brazil", *Biota Neotropica*, 14(2).

- LENG, G., HALL, J, 2019, "Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and the projected changes in the future", *Science of the Total Environment*, 654, pp. 811-821.
- LEWIŃSKA, K., IVITS, E., SCHARDT, M. *et al.*, 2016, "Alpine forest drought monitoring in south tyrol: PCA based synergy between scPDSI data and modis derived NDVI and NDII7 time series", *Remote Sensing*, 8(8), pp. 639.
- LI, Z., KAFATOS, M, 2000, "Interannual variability of vegetation in the United States and its relation to El Nino/Southern Oscillation", *Remote Sensing of Environment*, 71(3), pp. 239-247.
- LI, J., WANG, S., ZHOU, F, 2016, "Time series analysis of long-term terrestrial water storage over Canada from GRACE Satellites using principal component analysis", *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42(3), pp. 161-170.
- LIBERATO, M. L., RAMOS, A. M., GOUVEIA, C. M. *et al.*, 2017, "Exceptionally extreme drought in Madeira Archipelago in 2012: Vegetation impacts and driving conditions", *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, pp. 195-209.
- LIMA, A. L. A., RODAL, M. J. N, 2010, "Phenology and wood density of plants growing in the semi-arid region of northeastern Brazil", *Journal of Arid Environments*, 74(11), pp. 1363-1373.
- LIMA, A. L. A., SAMPAIO, E. V. D. S. B., de CASTRO, C. C, 2012, "Do the phenology and functional stem attributes of woody species allow for the identification of functional groups in the semiarid region of Brazil?", *Trees*, 26(5), pp. 1605-1616.

- LIMA, C. R. D., BRUNO, R. D. L. A., ANDRADE, A. P. D. *et al.*, 2018, “Phenology of *Poincianella pyramidalis* (TUL.) LP Queiroz and its relationship with the temporal distribution of rainfall in the Brazilian semi-arid region”, *Ciência Florestal*, 28(3), pp. 1035-1048.
- LIU, W. T., MASSAMBANI, O., NOBRE, C. A., 1994, Satellite recorded vegetation response to drought in Brazil, *International Journal of Climatology*, 14(3), pp. 343-354.
- LIU, Y. Y., PARINUSSA, R. M., DORIGO, W. A. *et al.*, 2011, “Developing an improved soil moisture dataset by blending passive and active microwave satellite-based retrievals”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), pp. 425–436.
- LIU, Y. Y., DORIGO, W. A., PARINUSSA, R. M. *et al.*, 2012, “Trend-preserving blending of passive and active microwave soil moisture retrievals”, *Remote Sensing of Environment*, 123, pp. 280-297.
- LIU, Y., XIAO, J., JU, W. *et al.*, 2015, “Water use efficiency of China’s terrestrial ecosystems and responses to drought”, *Scientific Reports*, 5, 13799.
- Van LOON, A. F., VAN HUIJGEVOORT, M. H. J., VAN LANEN, H. A. J. *et al.*, 2012, “Evaluation of drought propagation in an ensemble mean of large-scale hydrological models”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11), pp. 4057-4078.
- Van LOON, A. F., 2015, “Hydrological drought explained”, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), pp. 359-392.

- LOS, S. O., COLLATZ, G. J., BOUNOUA, L. *et al.*, 2001, “Global interannual variations in sea surface temperature and land surface vegetation, air temperature, and precipitation”, *Journal of Climate*, 14(7), pp. 1535-1549.
- LUO, L., WOOD, E. F, 2007, “Monitoring and predicting the 2007 US drought”, *Geophysical Research Letters*, 34(22).
- LYON, B, 2004, “The strength of El Niño and the spatial extent of tropical drought”, *Geophysical Research Letters*, 31(21).
- MACHADO, I. C., BARROS, L. M., SAMPAIO, E. V, 1997, “Phenology of caatinga species at Serra Talhada, PE, northeastern Brazil”, *Biotropica*, 29(1), pp. 57-68.
- MAGALHÃES, A.R. “Life and drought in Brazil”. In: NYS, E. D., ENGLE, N. L., MAGALHÃES, A. R., 2016, *Drought in Brazil: Proactive management and policy*, chapter 1, CRC Press.
- MARDIA, K. V, 1972, *Statistics of directional data Probability and mathematical statistics*, Academic Press, London. New York.
- MARENGO, J. A., BERNASCONI, M, 2015, “Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections”, *Climatic Change*, 129(1-2), pp. 103-115.
- MARENGO, J. A., ALVES, L. M., SOARES, W. R. *et al.*, 2013, “Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in northeast Brazil”, *Journal of Climate*, 26(22), pp. 9137-9154.
- MARENGO, J. A., NOBRE, C. A., SELUCHI, M. E. *et al.*, 2015, “A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo”, *Revista USP*, (106), pp. 31-44.

- MARENGO, J. A., ALVES, L. M., ALVALA, R. *et al.*, 2018, “Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region”, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90(2), pp. 1973-1985.
- MARTINY, N., RICHARD, Y., CAMBERLIN, P., 2005, “Interannual persistence effects in vegetation dynamics of semi-arid Africa”, *Geophysical Research Letters*, 32(24).
- MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J., GONZÁLEZ-ZAMORA, A., SÁNCHEZ, N. *et al.*, 2016, “Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of the SMOS derived Soil Water Deficit Index”, *Remote Sensing of Environment*, 177, pp. 277-286.
- MBOW, C., FENSHOLT, R., RASMUSSEN, K. *et al.*, 2013, “Can vegetation productivity be derived from greenness in a semi-arid environment? Evidence from ground-based measurements”, *Journal of Arid Environments*, 97, pp. 56-65.
- MCKEE, T. B., DOESKEN, N. J., KLEIST, J., 1993, “The relationship of drought frequency and duration to time scales”, *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17, 22, pp. 179-183.
- MENESES, P. R., ALMEIDA, T. D., 2012, *Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto*. Universidade de Brasília, Brasília.
- MENEZES, R. S. C., SAMPAIO, E. V. S. B., GIONGO, V. 2012. “Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome”, *Brazilian Journal of Biology*, 72(3), pp. pp.643-653.

- MENG, L., FORD, T., GUO, Y, 2017, “Logistic regression analysis of drought persistence in East China”, *International Journal of Climatology*, 37(3), pp. 1444-1455.
- MENZEL, A., SPARKS, T. H., ESTRELLA, N. *et al.*, 2006, “European phenological response to climate change matches the warming pattern”, *Global Change Biology*, 12(10), pp. 1969-1976.
- MIGLIAVACCA, M., SONNENTAG, O., KEENAN, T. F. *et al.*, 2012, “On the uncertainty of phenological responses to climate change, and implications for a terrestrial biosphere model”, *Biogeosciences*, 9(6), pp. 2063-2083.
- MISHRA, A. K., SINGH, V. P, 2010, “A review of drought concepts”, *Journal of Hydrology*, 391(1-2), pp. 202-216.
- MISHRA, A. K., SINGH, V. P, 2011, “Drought modeling - A review”, *Journal of Hydrology*, 403(1-2), pp. 157-175.
- MO, K. C., CHELLIAH, M, 2006, “The modified Palmer drought severity index based on the NCEP North American Regional Reanalysis”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(10), pp. 1362-1375.
- MO, K. C., LETTENMAIER, D. P, 2014, “Objective drought classification using multiple land surface models”, *Journal of Hydrometeorology*, 15(3), pp. 990-1010.
- MO, K. C., CHEN, L. C., SHUKLA, S, 2012, “Uncertainties in North American land data assimilation systems over the contiguous United States”, *Journal of Hydrometeorology*, 13(3), pp. 996-1009.

- MORELLATO, L. P. C., TALORA, D. C., TAKAHASI, A., 2000, "Phenology of Atlantic rain forest trees: a comparative study", *Biotropica*, 32(4b), pp. 811-823.
- MORELLATO, L. P. C., ALBERTI, L. F., HUDSON, I. L., 2010, "Applications of circular statistics in plant phenology: a case studies approach". In: HUDSON, I. L., KEATLEY, M. R., *Phenological Research*, Springer, Dordrecht, pp. 177-208.
- MOURA, B.P. , F., MALHADO, A. M., LADLE, R. J., 2013, "Nursing the caatinga back to health", *Journal of Arid Environments*, 90, pp. 67-68.
- MU, Q., ZHAO, M., RUNNING, S. W., 2011, "Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm", *Remote Sensing of Environment*, 115(8), pp. 1781-1800.
- MU, Q., ZHAO, M., KIMBALL, J. S., MCDOWELL, N. G. *et al.*, 2013, "A remotely sensed global terrestrial drought severity index", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(1), pp. 83-98.
- MUKHERJEE, S., MISHRA, A., TRENBERTH, K. E., 2018, "Climate change and drought: a perspective on drought indices", *Current Climate Change Reports*, 4(2), pp. 145-163.
- NARASIMHAN, B., SRINIVASAN, R., 2005, "Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring", *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1-4), pp. 69-88.

- NASSER, B, 2000, “Economia regional, desigualdade regional no Brasil e o estudo dos eixos nacionais de integração e desenvolvimento”, *Revista do BNDES*, 7(14), pp. 176-178..
- NAUMANN, G., ALFIERI, L., WYSER, K., *et al.* 2018, “Global changes in drought conditions under different levels of warming”, *Geophysical Research Letters*, 45(7), pp. 3285-3296.
- NEMANI, R. R., KEELING, C. D., HASHIMOTO, H. *et al.*, 2003, “Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999”, *Science*, 300(5625), pp. 1560-1563.
- NEPSTAD, D. C., KLINK, C. A., UHL, C. *et al.*, 1997, Land-use in Amazonia and the cerrado of Brasil. Embrapa Amazônia Oriental-Artigo em periódico indexado. *Journal of the Brazillian Association for the Advancemete of Science*. 49, pp. 73-86.
- NETO, J. L. S. A, 2005, “Decálogo da climatologia do sudeste brasileiro”, *Revista Brasileira de Climatologia*, 1(1), pp. 43-60.
- NEVES, E. L. D., FUNCH, L. S., VIANA, B. F, 2010, “Comportamento fenológico de três espécies de *Jatropha* (Euphorbiaceae) da Caatinga, semi-árido do Brasil”, *Brazilian Journal of Botany*, 33(1), pp. 155-166.
- NICOLAI-SHAW, N., GUDMUNDSSON, L., HIRSCHI, M, 2016, “Long-term predictability of soil moisture dynamics at the global scale: Persistence versus large-scale drivers”, *Geophysical Research Letters*, 43(16), pp. 8554-8562.

- NIJSSEN, B., SHUKLA, S., LIN, C., 2014, “A prototype global drought information system based on multiple land surface models”, *Journal of Hydrometeorology*, 15(4), pp. 1661-1676.
- NOBRE, P., MARENGO, J. A., CAVALCANTI, I. F. A, 2006, “Seasonal-to-decadal predictability and prediction of South American climate”, *Journal of Climate*, 19(23), pp. 5988-6004.
- NOBRE, C. A., MARENGO, J. A., SELUCHI, M. E. *et al.*, 2016, “Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015”, *Journal of Water Resource and Protection*, 8(02), pp. 252.
- NOGUEIRA, F. C. B., DE SOUSA PACHECO FILHO, A. J., GALLÃO, M. I. *et al.*, 2013, “Fenologia de *Dalbergia cearensis* Ducke (Fabaceae) em um fragmento de floresta estacional, no semiárido do Nordeste, Brasil”, *Revista Árvore*, 37(4), pp. 657-667.
- OGLESBY, R. J., ERICKSON III, D. J, 1989, “Soil moisture and the persistence of North American drought”, *Journal of Climate*, 2(11), pp. 1362-1380.
- OLIVEIRA, L. M. T., FRANÇA, G. B., NICÁCIO, R. M. *et al.*, 2010, “A study of the El Niño-Southern Oscillation influence on vegetation indices in Brazil using time series analysis from 1995 to 1999”, *International Journal of Remote Sensing*, 31(2), pp. 423-437.
- OLIVEIRA, C. C., ZANDAVALLI, R. B., de LIMA, A. L. A. *et al.*, 2015, “Functional groups of woody species in semi-arid regions at low latitudes”, *Austral Ecology*, 40(1), pp. 40-49.

- OLIVEIRA, G., MORAES, E.C., BRUNSELL, N.A. *et al.* 2016. “Analysis of Precipitation and Evapotranspiration in Atlantic Rainforest Remnants in Southeastern Brazil from Remote Sensing Data”. In: BLANCO, J. A., LO, Y. H., CHANG, S. C., 2016, *Tropical Forests: The Challenges of Maintaining Ecosystem Services while Managing the Landscape*. BoD–Books on Demand.
- OLIVEIRA-FILHO, A. T., FONTES, M. A. L, 2000, “Patterns of floristic differentiation among Atlantic Forests in Southeastern Brazil and the influence of climate”, *Biotropica*, 32(4b), pp. 793-810.
- OLSEN, J. L., MIEHE, S., CECCATO, P. *et al.*, 2015, “Does EO NDVI seasonal metrics capture variations in species composition and biomass due to grazing in semi-arid grassland savannas?” *Biogeosciences*, 12(14), pp. 4407-4419.
- OLSSON, L., EKLUNDH, L., ARDÖ, J, 2005, “A recent greening of the Sahel—trends, patterns and potential causes”, *Journal of Arid Environments*, 63(3), pp. 556-566.
- OTKIN, J. A., ANDERSON, M. C., HAIN, C. *et al.*, 2014, “Examining the relationship between drought development and rapid changes in the evaporative stress index”, *Journal of Hydrometeorology*, 15(3), pp. 938-956.
- ÖZGER, M., MISHRA, A. K., SINGH, V. P, 2009, “Low frequency drought variability associated with climate indices”, *Journal of Hydrology*, 364(1-2), pp. 152-162.
- PALMER, W. C, 1968, “Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index”, *Weatherwise*, 21, p.156-161

- PAPAIOANNOU, G., LOUKAS, A., VASILIADES, L., 2017, "Sensitivity analysis of a probabilistic flood inundation mapping framework for ungauged catchments", *Eur. Water*, 60, pp. 9-16.
- PAREDES-TREJO, F. J., BARBOSA, H. A., KUMAR, T. L., 2017, "Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil", *Journal of Arid Environments*, 139, pp. 26-40.
- PARMESAN, C., YOHE, G., 2003, "A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems", *Nature*, 421(6918), pp. 37.
- PARUELO, J. M., LAUENROTH, W. K., 1998, "Interannual variability of NDVI and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands", *Journal of Biogeography*, 25(4), pp. 721-733.
- PEÑA-GALLARDO, M., VICENTE-SERRANO, S. M., QUIRING, S. *et al.*, 2019, "Response of crop yield to different time-scales of drought in the United States: Spatio-temporal patterns and climatic and environmental drivers". *Agricultural and Forest Meteorology*, 264, pp. 40-55.
- PEÑUELAS, J., FILELLA, I., 2009, "Phenology feedbacks on climate change", *Science*, 324(5929), pp. 887-888.
- PEREIRA, H. M., FERRIER, S., WALTERS, M. *et al.*, 2013, "Essential biodiversity variables", *Science*, 339(6117), pp. 277-278.
- PEREIRA, M. P. S., JUSTINO, F., MALHADO, A. C. M. *et al.*, 2014, "The influence of oceanic basins on drought and ecosystem dynamics in Northeast Brazil", *Environmental Research Letters*, 9(12), pp. 124013.

- PEREIRA, V. R., BLAIN, G. C., AVILA, A. M. H. D. *et al.*, 2018, “Impacts of climate change on drought: changes to drier conditions at the beginning of the crop growing season in southern Brazil”, *Bragantia*, 77(1), pp. 201-211.
- PEREZ-MARIN, A. M., CAVALCANTE, A. D. M. B., MEDEIROS, S. S. D. *et al.*, 2013, “Núcleos de desertificação do semiárido brasileiro: ocorrência natural ou antrópica?”, *Parcerias Estratégicas*, 17(34), pp. 87-106.
- PETROPOULOS, G., CARLSON, T. N., WOOSTER, M. J. *et al.* “A review of Ts/VI remote sensing based methods for the retrieval of land surface energy fluxes and soil surface moisture”, *Progress in Physical Geography*, 33(2), pp. 224-250.
- PETTITT, A. N, 1979, “A non-parametric approach to the change-point problem”, *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, pp. 28(2), pp. 126-135.
- PETTORELLI, N., WEGMANN, M., SKIDMORE, A. *et al.*, 2016, “Framing the concept of satellite remote sensing essential biodiversity variables: challenges and future directions”, *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2(3), pp. 122-131.
- PIAO, S., FANG, J., ZHOU, L. *et al.*, 2006, “Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation”, *Global Change Biology*, 12(4), pp. 672-685.
- PIERRE, C., GRIPPA, M., MOUGIN, E. *et al.*, 2016, “Changes in Sahelian annual vegetation growth and phenology since 1960: A modeling approach”, *Global and Planetary Change*, 143, pp. 162-174.

- POTTER, C., BORIAH, S., STEINBACH, M. *et al.*, 2008, “Terrestrial vegetation dynamics and global climate controls”, *Climate Dynamics*, 31(1), pp. 67-78.
- POUNDS, J. A., FOGDEN, M. P., CAMPBELL, J. H. *et al.*, 1999, “Biological response to climate change on a tropical mountain”, *Nature*, 398(6728), pp. 611.
- POWELL, T. L., GALBRAITH, D. R., CHRISTOFFERSEN, B. O. *et al.*, 2013, “Confronting model predictions of carbon fluxes with measurements of Amazon forests subjected to experimental drought”, *New Phytologist*, 200(2), pp. 350-365.
- PRESS, W. H., TEUKOLSKY, S. A, 1990, “Savitzky-Golay smoothing filters”, *Computers in Physics*, 4(6), pp. 669-672.
- PRIVETTE, J. L., MYNENI, R. B., KNYAZIKHIN, Y. *et al.*, 2002, “Early spatial and temporal validation of MODIS LAI product in the Southern Africa Kalahari”, *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), pp. 232-243.
- QUIRING, S. M., GANESH, S, 2010, “Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas”, *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(3), pp. 330-339.
- RAJSEKHAR, D., SINGH, V. P., MISHRA, A. K, 2015, “Integrated drought causality, hazard, and vulnerability assessment for future socioeconomic scenarios: An information theory perspective”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(13), pp. 6346-6378.
- RAMILLIEN, G., FRAPPART, F., GÜNTNER, A. *et al.*, 2006, “Time variations of the regional evapotranspiration rate from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite gravimetry”, *Water Resources Research*, 42(10).

- BRAHMANANDA RAO, V., de LIMA, M. C., e FRANCHITO, S. H, 1993, “Seasonal and interannual variations of rainfall over eastern northeast Brazil”, *Journal of Climate*, 6(9), pp. 1754-1763.
- RAY, D. K., GERBER, J. S., MACDONALD, G. K. *et al.*, 2015, “Climate variation explains a third of global crop yield variability”, *Nature Communications*, 6, 5989.
- REBOITA, M. S., GAN, M. A., da ROCHA, R. P. *et al.*, 2010, “Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica”, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(2).
- REBOITA, M. S., KRUSCHE, N., AMBRIZZI, T. *et al.*, 2012, “Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul”. *TERRÆ DIDATICA* 8(1), pp. 34-50
- REBOITA, M. S., OLIVEIRA, D. D., FREITAS, C. H. *et al.*, 2015, “Anomalias dos Padrões Sinóticos da Atmosfera na América do Sul nos Meses de Janeiro de 2014 e 2015”, *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 4(4).
- REBOITA, M. S., RODRIGUES, M., ARMANDO, R. *et al.*, 2016, “Causas da semi-aridez do sertão nordestino”, *Revista Brasileira de Climatologia*, 19.
- RECHID, D., RADDATZ, T. J., JACOB, D, 2009, “Parameterization of snow-free land surface albedo as a function of vegetation phenology based on MODIS data and applied in climate modelling”, *Theoretical and Applied Climatology*, 95(3-4), pp. 245-255.

- REED, B. C., BROWN, J. F., VANDERZEE, D. *et al.*, 1994, “Measuring phenological variability from satellite imagery”, *Journal of Vegetation Science*, 5(5), pp. 703-714.
- REED, B. C., 2006, “Trend analysis of time-series phenology of North America derived from satellite data”, *GIScience e Remote Sensing*, 43(1), pp. 24-38.
- REES, W. G., 2013, *Physical principles of remote sensing*. Cambridge University Press.
- REICH, P. B., BORCHERT, R., 1984, “Water stress and tree phenology in a tropical dry forest in the lowlands of Costa Rica”, *The Journal of Ecology*, pp. 61-74.
- REICHLER, R. H., CROW, W. T., KOSTER, R. D. *et al.*, 2008, “Contribution of soil moisture retrievals to land data assimilation products”, *Geophysical Research Letters*, 35(1).
- REMBOLD, F., ATZBERGER, C., SAVIN, I. *et al.*, 2013, “Using low resolution satellite imagery for yield prediction and yield anomaly detection”, *Remote Sensing*, 5(4), pp. 1704-1733.
- RIBBE, L., FORMIGA-JOHANSSON, R. M., DUVAL, J. L. R., 2019, “Water Security in Rio de Janeiro State”. In: NEHREN, U., SCHLÖTTER, S., RAEDIG, C. *et al.*, 2018, *Strategies and Tools for a Sustainable Rural Rio de Janeiro*. Springer.
- RIBEIRO, M. C., METZGER, J. P., MARTENSEN, A. C. *et al.*, 2009, “The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation”, *Biological Conservation*, 142(6), pp. 1141-1153.

- RICHARDSON, A. D., KEENAN, T. F., MIGLIAVACCA, M. *et al.*, 2013, “Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system”, *Agricultural and Forest Meteorology*, 169, pp. 156-173.
- de RIDDER, K, 1998, “The impact of vegetation cover on Sahelian drought persistence”, *Boundary-Layer Meteorology*, 88(2), pp. 307-321.
- RINEAU, F., MALINA, R., BEENAERTS, N. *et al.*, 2019, “Towards more predictive and interdisciplinary climate change ecosystem experiments”, *Nature Climate Change*, 1-8.
- RODELL, M., HOUSER, P.R., JAMBOR, U.E.A. *et al.* 2004, “The global land data assimilation system”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), pp.381-394.
- RODELL, M., VELICOGNA, I., FAMIGLIETTI, J.S, 2009, “Satellite-based estimates of groundwater depletion in India”, *Nature*, 460(7258), pp. 999–1002.
- RODELL, M., MCWILLIAMS, E.B., FAMIGLIETTI, J.S. *et al.*, 2011, “Estimating evapotranspiration using an observation based terrestrial water budget”, *Hydrological Processes*, 25(26), pp. 4082–4092.
- RODELL, M, 2012, “Satellite Gravimetry Applied to Drought Monitoring”. In: WARDLOW, B. D., ANDERSON, M. C., VERDIN, J. P. *Remote sensing of drought: Innovative monitoring approaches*, chapter 11, CRC Press.
- RODELL, M., FAMIGLIETTI, J. S., WIESE, D. N. *et al.*, 2018, “Emerging trends in global freshwater availability”, *Nature*, 557(7707), pp. 651-659.

- ROOT, T. L., PRICE, J. T., HALL, K. R. *et al.*, 2003, “Fingerprints of global warming on wild animals and plants”, *Nature*, 421(6918), pp. 57.
- RUNNING, S. W., NEMANI, R. R., HEINSCH, F. A. *et al.*, 2004, “A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production”, *Bioscience*, 54(6), pp. 547-560.
- RYU, Y., BERRY, J. A., BALDOCCHI, D. D., 2019, “What is global photosynthesis? History, uncertainties and opportunities”, *Remote Sensing of Environment*, 223, pp. 95-114.
- SANCHEZ-AZOFEIFA, A., KALACSKA, M. E., QUESADA, M. *et al.*, 2003, “Tropical dry climates”. In: SCHWARTZ, M. D., *Phenology: An integrative environmental science*, pp. 121-137, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- SANDHOLT, I., RASMUSSEN, K. ANDERSEN, J., 2002, “A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status”, *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3), pp. pp. 213–224.
- SANTOS, P., NEGRI, A. J., 1997, “A comparison of the normalized difference vegetation index and rainfall for the Amazon and northeastern Brazil”, *Journal of Applied Meteorology*, 36(7), pp. 958-965.
- SANTOS-FILHO, F. S., ALMEIDA JÚNIOR, E. B., SOARES, C. J. R. S., 2013, “Cocais: zona ecotonal natural ou artificial?”, *Revista Equador*, 2(1), pp. 02-13.
- SARMAH, S., JIA, G., ZHANG, A., 2018, “Satellite view of seasonal greenness trends and controls in South Asia”, *Environmental Research Letters*, 13(3), pp. 034026.

- SAVAGE, J. A., CLEARWATER, M. J., HAINES, D. F. *et al.*, 2016, “Allocation, stress tolerance and carbon transport in plants: how does phloem physiology affect plant ecology?”, *Plant, Cell and Environment*, 39(4), pp. 709-725.
- SAVITZKY, A., GOLAY, M. J, 1964, “Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures”, *Analytical Chemistry*, 36(8), pp. 1627-1639.
- SCARANO, F. R, 2002, “Structure, function and floristic relationships of plant communities in stressful habitats marginal to the Brazilian Atlantic rainforest”, *Annals of Botany*, 90(4), pp. 517-524.
- Van der SCHRIER, G., BARICHIVICH, J., BRIFFA, K. R. *et al.*, 2013, “A scPDSI-based global data set of dry and wet spells for 1901–2009”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(10), pp. 4025-4048.
- SCHUT, A. G., IVITS, E., CONIJN, J. G. *et al.*, 2015, “Trends in global vegetation activity and climatic drivers indicate a decoupled response to climate change”, *PloS one*, 10(10), pp. e0138013.
- SCHWARTZ, M. D., AHAS, R., AASA, A, 2006, “Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere”, *Global Change Biology*, 12(2), pp. 343-351.
- SENEVIRATNE, S. I., CORTI, T., DAVIN, E. L. *et al.*, 2010, “Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review”, *Earth-Science Reviews*, 99(3-4), pp. 125-161.
- SEPULCRE-CANTO, G., HORION, S. M. A. F., SINGLETON, A. *et al.*, 2012, “Development of a Combined Drought Indicator to detect agricultural drought in Europe”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(11), pp. 3519-3531.

- SETH, A., FERNANDES, K., CAMARGO, S. J, 2015, “Two summers of São Paulo drought: Origins in the western tropical Pacific”, *Geophysical Research Letters*, 42(24), pp. 10-816.
- SHAH, R. D., MISHRA, V, 2015, “Development of an experimental near-real-time drought monitor for India”, *Journal of Hydrometeorology*, 16(1), pp. 327-345.
- SHEFFIELD, J., ANDREADIS, K. M., WOOD, E. F. *et al.*, 2009, “Global and continental drought in the second half of the twentieth century: Severity–area–duration analysis and temporal variability of large-scale events”, *Journal of Climate*, 22(8), pp. 1962-1981.
- SHEFFIELD, J., WOOD, E. F., RODERICK, M. L., 2012, “Little change in global drought over the past 60 years”, *Nature*, 491(7424), pp. 435-438.
- SHUKLA, S., MCNALLY, A., HUSAK, G. *et al.*, 2014, “A seasonal agricultural drought forecast system for food-insecure regions of East Africa”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(10), pp. 3907-3921.
- SILVA, V.D.P.R., 2004. “On climate variability in Northeast of Brazil”. *Journal of Arid Environments*, 58(4), pp. pp.575-596.
- SILVA, B. B., WILCOX, B. P., da SILVA, V. D. P. R, 2015, “Changes to the energy budget and evapotranspiration following conversion of tropical savannas to agricultural lands in São Paulo State, Brazil”, *Ecohydrology*, 8(7), pp. 1272-1283.
- SILVEIRA, A. P., MARTINS, F. R., ARAÚJO, F. S, 2013, “Do vegetative and reproductive phenophases of deciduous tropical species respond similarly to rainfall pulses?”, *Journal of Forestry Research*, 24(4), pp. 643-651.

- SIMON, M. F., PROENÇA, C, 2000, “Phytogeographic patterns of Mimosa (Mimosoideae, Leguminosae) in the Cerrado biome of Brazil: an indicator genus of high-altitude centers of endemism?”, *Biological Conservation*, 96(3), pp. 279-296.
- SINGH, A., SEITZ, F., SCHWATKE, C. *et al.*, 2013, “Application of multi-sensor satellite data to observe water storage variations”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(3), pp. 1502-1508.
- SNYDER, P. K., DELIRE, C., FOLEY, J. A, 2004, “Evaluating the influence of different vegetation biomes on the global climate”, *Climate Dynamics*, 23(3-4), pp. 279-302.
- SOUZA, R., FENG, X., ANTONINO, A. *et al.*, 2016, “Vegetation response to rainfall seasonality and interannual variability in tropical dry forests”, *Hydrological Processes*, 30(20), pp. 3583-3595.
- SPENNEMANN, P. C., SAULO, A. C., 2015, "An estimation of the land-atmosphere coupling strength in South America using the Global Land Data Assimilation System", *International Journal of Climatology*, 35(14), pp. 4151-4166.
- STERN P.C., EASTERLING, W.E, 1999, “Making climate forecasts matter”, *National Research Council*, National Academies Press.
- SU, Z, 2002, “The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1), pp. pp. 85–100.

- SUN, D., KAFATOS, M, 2007, “Note on the NDVI-LST relationship and the use of temperature-related drought indices over north America”, *Geophysical Research Letters*, 34, 24.
- SUN, J., SALVUCCI, G. D., ENTEKHABI, D, 2012, “Estimates of evapotranspiration from MODIS and AMSR-E land surface temperature and moisture over the Southern Great Plains”, *Remote Sensing of Environment*, 127, pp. 44-59.
- SVOBODA, M., Le COMTE, D., HAYES, M. et al., 2002, “The drought monitor”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), pp. 1181-1190.
- SYED, T. H., FAMIGLIETTI, J. S., RODELL, M. et al., 2008, “Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS”, *Water Resources Research*, 44(2).
- TALLAKSEN, L. M., HISDAL, H., VAN LANEN, H. A., 2009, “Space–time modelling of catchment scale drought characteristics”, *Journal of Hydrology*, 375(3-4), pp. 363-372.
- TAPLEY, B. D., BETTADPUR, S., RIES, J. C. et al, 2004, “GRACE measurements of mass variability in the Earth system”, *Science*, 305(5683), pp. 503-505.
- TEIXEIRA, A. M. G., SOARES-FILHO, B. S., FREITAS, S. R. et al., 2009, “Modeling landscape dynamics in an Atlantic Rainforest region: implications for conservation”, *Forest Ecology and Management*, 257(4), pp. 1219-1230.
- THOMAS, C. D., CAMERON, A., GREEN, R. E. et al., 2004, “Extinction risk from climate change”, *Nature*, 427(6970), pp. 145.

- THOMAS, A. C., REAGER, J. T., FAMIGLIETTI, J. S. *et al.*, 2014, “A GRACE-based water storage deficit approach for hydrological drought characterization”, *Geophysical Research Letters*, 41(5), pp. 1537-1545.
- THOMAS, B. F., FAMIGLIETTI, J. S., LANDERER, F. W. *et al.*, 2017, “GRACE groundwater drought index: Evaluation of California Central Valley groundwater drought”, *Remote Sensing of Environment*, 198, pp. 384-392.
- TOMASELLA, J., VIEIRA, R. M. S. P., BARBOSA, A. A. *et al.*, 2018, “Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, pp. 197-206.
- TONG, X., BRANDT, M., HIERNAUX, P. *et al.*, 2017, “Revisiting the coupling between NDVI trends and cropland changes in the Sahel drylands: A case study in western Niger”, *Remote Sensing of Environment*, 191, pp. 286-296.
- TRENBERTH, K. E., DAI, A., Van der SCHRIER, G. *et al.*, 2014, “Global warming and changes in drought”, *Nature Climate Change*, 4(1), pp. 17-22.
- TSAKIRIS, G., VANGELIS, H. J. E. W, 2005, “Establishing a drought index incorporating evapotranspiration”, *European Water*, 9(10), pp. 3-11.
- TSAKIRIS, G., PANGALOU, D., VANGELIS, H, 2007, “Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI)”, *Water Resources Management*, 21(5), pp. 821-833.
- TUCKER, C. J., SLAYBACK, D. A., PINZON, J. E. *et al.*, 2001, “Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999”, *International journal of Biometeorology*, 45(4), pp. 184-190.

- UVO, C. B., REPELLI, C. A., ZEBIAK, S. E. *et al.*, 1998, “The relationships between tropical Pacific and Atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation”, *Journal of Climate*, 11(4), pp. 551-562.
- VAREJÃO-SILVA, M. A., 2006, *Meteorologia e climatologia*. Versão digital, 2, 463.
- VERBESSELT, J., ZEILEIS, A., HEROLD, M., 2012, “Near real-time disturbance detection using satellite image time series”, *Remote Sensing of Environment*, 123, pp. 98-108.
- VERMOTE, E. F., VERMEULEN, A., 1999, *Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09)*. ATBD version, 4, pp. 1-107.
- VERNER, D., 2016, “Voices of the People: Socioeconomic Implications of Drought in Northeast Brazil”. In: de NYS, E., ENGLE, N., MAGALHÃES, A. R., 2016, *Drought in Brazil: proactive management and policy*, chapter 10, CRC Press.
- VICENTE-SERRANO, S. M., LASANTA, T., ROMO, A., 2004, “Analysis of spatial and temporal evolution of vegetation cover in the Spanish Central Pyrenees: role of human management”, *Environmental Management*, 34(6), pp. 802-818.
- VICENTE-SERRANO, S. M., 2007, “Evaluating the impact of drought using remote sensing in a Mediterranean, semi-arid region”, *Natural Hazards*, 40(1), pp. 173-208.
- VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S., LÓPEZ-MORENO, J. I. *et al.*, 2010a, “A new global 0.5 gridded dataset (1901–2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index”, *Journal of Hydrometeorology*, 11(4), pp. 1033-1043.

- VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S., LÓPEZ-MORENO, J. I., 2010b, “A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index”, *Journal of Climate*, 23(7), pp. 1696-1718.
- VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S., LORENZO-LACRUZ, J. *et al.*, 2012, “Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications”, *Earth Interactions*, 16(10), pp. 1-27.
- VICENTE-SERRANO, S. M., GOUVEIA, C., CAMARERO, J. J. *et al.*, 2013, “Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(1), pp. 52-57.
- VICENTE-SERRANO, S. M., Van der SCHRIER, G., BEGUERÍA, S. *et al.*, 2015, “Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates”, *Journal of Hydrology*, 526, pp. 42-54.
- VIEIRA, R. M. D. S. P., CUNHA, A. P. M. D. A., ALVALÁ, R. C. D. S. *et al.*, 2013, “Land use and land cover map of a semiarid region of Brazil for meteorological and climatic models”, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(2), pp. 129-138.
- VIEIRA, R. D. S. P., TOMASELLA, J., ALVALÁ, R. C. S. *et al.*, 2015, “Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast”, *Solid Earth*, 6(1), pp. 347-360.
- WADA, Y., VAN BEEK, L. P., VAN KEMPEN, C. M. *et al.*, 2010, “Global depletion of groundwater resources”, *Geophysical Research Letters*, 37(20).

- WALKER, J., de BEURS, K., WYNNE, R., 2015, “Phenological response of an Arizona dryland forest to short-term climatic extremes”, *Remote Sensing*, 7(8), pp. 10832-10855.
- WALLACE, C. S., THENKABAIL, P., RODRIGUEZ, J. R. *et al.*, 2017, “Fallow-land Algorithm based on Neighborhood and Temporal Anomalies (FANTA) to map planted versus fallowed croplands using MODIS data to assist in drought studies leading to water and food security assessments”, *GIScience e Remote Sensing*, 54(2), pp. 258-282.
- WERTH, S., GÜNTNER, A., PETROVIC, S. *et al.*, 2009, “Integration of GRACE mass variations into a global hydrological model”, *Earth and Planetary Science Letters*, 277(1-2), pp. 166–173.
- WHITE, M. A., DE BEURS, K. M., DIDAN, K. *et al.*, 2009, “Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006”, *Global Change Biology*, 15(10), pp. 2335-2359.
- WILHITE, D. A., Ed., 2012, “Drought assessment, management, and planning: theory and case studies: theory and case studies”, Springer Science & Business Media.
- WRIGHT, S. J., CORNEJO, F. H., 1990, “Seasonal drought and leaf fall in a tropical forest”, *Ecology*, 71(3), pp. 1165-1175.
- WRIGHT, S. J., 1991, *Seasonal drought and the phenology of understory shrubs in a tropical moist forest*, *Ecology*, 72(5), pp. 1643-1657.

- WU, W., GELLER, M. A., DICKINSON, R. E, 2002, The response of soil moisture to long-term variability of precipitation, *Journal of Hydrometeorology*, 3(5), pp. 604-613.
- WU, C., GONSAMO, A., CHEN, J. M. *et al.*, 2012, “Interannual and spatial impacts of phenological transitions, growing season length, and spring and autumn temperatures on carbon sequestration: A North America flux data synthesis”, *Global and Planetary Change*, 92, pp. 179-190.
- WU, D., QU, J.J., HAO, X, 2015, “Agricultural drought monitoring using MODIS-based drought indices over the USA corn belt”, *International Journal of Remote Sensing*, 36(21), pp. 5403–5425.
- YAO, Y., LIANG, S., QIN, Q, 2011, “Monitoring global land surface drought based on a hybrid evapotranspiration model”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(3), pp. 447-457.
- YU, C., LI, C., XIN, Q, 2014, “Dynamic assessment of the impact of drought on agricultural yield and scale-dependent return periods over large geographic regions”, *Environmental modelling and Software*, 62, pp. 454-464.
- YUAN, X., WOOD, E. F., CHANEY, N. W, 2013, “Probabilistic seasonal forecasting of African drought by dynamical models”, *Journal of Hydrometeorology*, 14(6), pp. 1706-1720.
- ZAITCHIK, B.F., RODELL, M., REICHLER, R.H, 2008, “Assimilation of GRACE terrestrial water storage data into a land surface model: Results for the Mississippi river basin”, *Journal of Hydrometeorology*, 9(3), pp. 535–548.

- ZAR, J. H., 2010, *Biostatistical analysis*. Pearson Prentice-Hall. Upper Saddle River, NJ.
- ZENG, N., 2003, "Drought in the Sahel", *Science*, 302(5647), pp. 999-1000.
- ZENG, F. W., COLLATZ, G., PINZON, J. *et al.*, 2013, "Evaluating and quantifying the climate-driven interannual variability in Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI3g) at global scales", *Remote Sensing*, 5(8), pp. 3918-3950.
- ZHANG, X., FRIEDL, M. A., SCHAAF, C. B. *et al.*, 2003, "Monitoring vegetation phenology using MODIS", *Remote Sensing of Environment*, 84(3), pp. 471-475.
- ZHANG, X., FRIEDL, M. A., SCHAAF, C. B., 2006, "Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements", *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111(G4).
- ZHANG, Q., XIAO, M., CHEN, X., 2012, "Regional evaluations of the meteorological drought characteristics across the Pearl River Basin, China", *American Journal of Climate Change*, 1(01), pp. 48.
- ZHANG, X., SUSAN MORAN, M., ZHAO, X. *et al.*, 2014, "Impact of prolonged drought on rainfall use efficiency using MODIS data across china in the early 21st century", *Remote Sensing of Environment*. 150, pp. 188–197.
- ZHAO, M., RUNNING, S. W., 2010, "Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009", *Science*, 329(5994), pp. 940-943.

ZHOU, J., LAU, K. M, 2001, "Principal modes of interannual and decadal variability of summer rainfall over South America", *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 21(13), pp. 1623-1644.

ZINK, M., SAMANIEGO, L., KUMAR, R. *et al.*, 2016, "The German drought monitor", *Environmental Research Letters*, 11(7), pp. 074002.