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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/08.15.16.51-TDI

CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DAS SECAS SOBRE O BRASIL NAS ÚLTIMAS DÉCADAS (1981-2016)

Tamires Alybia Gomes de Lira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. Caio Augusto dos Santos Coelho, aprovada em 14 de agosto de 2019.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TRGGPL>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

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

Membros:

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

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

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

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

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

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

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/08.15.16.51-TDI

CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DAS SECAS SOBRE O BRASIL NAS ÚLTIMAS DÉCADAS (1981-2016)

Tamires Alybia Gomes de Lira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. Caio Augusto dos Santos Coelho, aprovada em 14 de agosto de 2019.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TRGGPL>

INPE
São José dos Campos
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Lira, Tamires Alybia Gomes de.

Li67c Caracterização espaço-temporal das secas sobre o Brasil nas últimas décadas (1981-2016) / Tamires Alybia Gomes de Lira. – São José dos Campos : INPE, 2019.

xxiv + 134 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/08.15.16.51-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientador : Dr. Caio Augusto dos Santos Coelho.

1. Secas. 2. Índice da Saúde da Vegetação (ISV). 3. Diagnóstico climático. I.Título.

CDU 551.577.38(81)

Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aluno (a): *Tamires Alybia Gomes de Lira*

Título: "CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DAS SECAS SOBRE O BRASIL NAS ÚLTIMAS DÉCADAS (1981-2016)"

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

Meteorologia

Dr. José Antonio Aravéquia

Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

( ) Participação por Video - Conferência

(x) Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Caio Augusto dos Santos Coelho

Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

( ) Participação por Video - Conferência

(x) Aprovado ( ) Reprovado

Dra. Renata Libonati dos Santos

Convidado(a) / UFRJ / Rio de Janeiro - RJ

(x) Participação por Video - Conferência

(x) Aprovado ( ) Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(x) unanimidade

São José dos Campos, 14 de agosto de 2019

The Spacious Firmament on high,
With all the blue Ethereal Sky,
And spangled Heav'ns, a Shining Frame,
Their great Original proclaim:
Th' unwearied Sun, from day to day,
Does his Creator's Pow'r display,
And publishes to every Land
The Work of an Almighty Hand.
Soon as the Evening Shades prevail,
The Moon takes up the wondrous Tale,
And nightly to the list'ning Earth
Repeats the Story of her Birth:
Whilst all the Stars that round her burn,
And all the Planets, in their turn,
Confirm the Tidings as they rowl,
And spread the Truth from Pole to Pole.
What though, in solemn Silence, all
Move round the dark terrestrial Ball?
What tho' nor real Voice nor Sound
Amid their radiant Orbs be found?
In Reason's Ear they all rejoice,
And utter forth a glorious Voice,
For ever singing, as they shine,
The Hand that made us is Divine.

- Joseph Addison

À minha família: mainha, painho, Tassy, Thaisa, Thiago e o gato

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus.

À meus pais, Maria Gomes e José Lira, também às minhas irmãs Tassiana e Thaisa e ao meu brother-in-law Thiago, por me manterem com os pés no chão.

Ao professor Caio Coelho pela orientação e por ser um profissional admirável.

Aos meus amigos que por incrível que pareça são muitos, alguns em especial

Eudes, Valdir, Yan, Alex e Eric (Rocky)!

Ao Mateus e à Stefane por toda ajuda que foram muitas! Aos demais componentes dos RETARD'S pela companhia e amizade nesse período de mestrado: Rafael, Ivete, Rapahel, Fabíola, Milena e Regi.

Aos demais amigos que encontrei e fiz por aqui. Muito obrigada! :)

Também aos professores do instituto.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

RESUMO

Fenômenos de seca frequentemente são alvos de estudos meteorológicos devido à severidade de seus impactos tanto ao meio ambiente quanto à sociedade em geral. Ultimamente, alguns desses estudos, realizados para as regiões Nordeste, Sudeste e região Norte Brasil, com objetivo de investigar as secas através de perspectivas tais como a frequência de ocorrência, duração e intensidade, aparentemente demonstram que as áreas atingidas pelas secas têm aumentado a cada evento. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar as secas em seu aspecto espacial e temporal para todo território brasileiro nas últimas décadas (1981 - 2016). Para isso, foram utilizados dados de precipitação, precipitação-evaporação e o Índice de Saúde da Vegetação (ISV) estimado a partir de dados de satélite. Além de diagnosticar esse aspecto do fenômeno, também propõe-se a investigar a expansão espacial das secas ao longos dos anos sob o ponto de vista de possíveis mudanças nos padrões de circulação atmosférica, variação na distribuição de precipitação ou ainda alterações no comportamento da TSM (Temperatura da Superfície do Mar). Como material de estudos das conexões dos eventos de secas e as demais variáveis meteorológicas foram utilizados dados de circulação atmosférica do CFSR (Climate Forecast System Reanalysis), de precipitação do MSWEP (Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation), precipitação-evapotranspiração e velocidade vertical (omega) da reanálise ERA-Interin e de TSM da série de Reynolds. Os resultados mostraram que os índices de vegetação e de umidade indicam aumento das áreas de seca no Brasil para as últimas décadas, principalmente para o período decenal de 2008 - 2016. O trimestre DJF mostrou tendências lineares mais marcadas para este mesmo período, indicando um aumento das áreas atingidas por condições de seca em todo o país durante o verão. As análises das anomalias de TSM e circulação indicaram condições de La Niña ou El Niño atuando em sete dos noves anos da série decenal. As análises das circulações locais (para a América do Sul) e dos movimentos verticais indicaram que além das anomalias de circulação provocada por eventos ENOS na circulação geral da atmosfera (ramo descendente da célula de Walker no Brasil) a atuação de anomalias de circulação anticiclônica, principalmente nos últimos anos da década, contribuíram para o aumento das áreas de seca no país.

Palavras-chave: Secas. Índice da Saúde da Vegetação (ISV). Diagnóstico climático.

SPATIAL AND TEMPORAL CHARACTERIZATION OF DROUGHT OVER BRAZIL IN THE LAST DECADES (1981 - 2016)

ABSTRACT

Drought events have caused severe impacts to the environment and society being therefore subject of several studies. Recently, some researches were performed aiming to investigate droughts throughout their frequency of occurrence, duration and intensity for the Northeast, Southeast and the Northern regions of Brazil. Results have shown that affected areas increased each year. However, how large was the increase over the whole country has not been explored. Thus, this research aims to characterize droughts events in their spatial and temporal aspects over all Brazilian territory during the last decades (1981 - 2016). In addition, possible changes in the atmospheric circulation patterns, modifications in the distribution of the precipitation and changes in the Sea Surface Temperature (SST) patterns were also investigated. For such purposes various datasets were used, including precipitation data from the Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP), Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) for the atmospheric circulation data, precipitation-evaporation and vertical velocity (omega) data from the ERA-Interim reanalysis, SST data from Reynolds series and the Vegetation Health Index (VHI) estimated from satellite data. Analyses for the vegetation, precipitation and precipitation-evaporation data were based on statistic aspects such as angular coefficients and p value of their quarterly and annual temporal series, which were created using a threshold to specify, in percentage, drought conditions over the country. Temporal series that pointed out an increase in the drought areas were chosen to create composites for the other variables, such as circulation, SST and vertical velocity. An expressive increase of the areas affected by droughts conditions was showed in the anual VHI series for the entire period of study, as well as for the last decade in the decenal VHI series. These aspects were reproduced in the quarterly series for the austral summer (DJF), in all indexes analyzed, specially in the last decenal period (2007/08 - 2015/16). The composites for the SST and atmospheric circulation anomalies indicated that ENSO (El Niño-Southern Oscillation) events were associated with anomalous anticyclonic circulation patterns, especially in the last three years of the decenal serie (2014, 2015 and 2016). Its combined occurrence played an important role in the maintenance and expansion of the areas affected by drought conditions during the summer of the last decenal period, contributing to the increasing of the total area.

Keywords: Drought. Vegetation Health Index (VHI). Climatic diagnostic.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

5.1 Fração da área com ISV anual < 40 para o período a) 1982 - 2015, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2015. 38
5.2 Fração da área com precipitação anual inferior ao limiar de precipitação equivalente ao ISV = 40 para o período a) 1982 - 2015, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2015. 39
5.3 Fração da área com IPP anual < -0.9 para o período a) 1982 - 2015, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2015. 41
5.4 Fração da área com P-E inferior ao limiar de P-E anual equivalente ao ISV = 40 para o período a) 1982 - 2015, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2015. 42
5.5 Fração da área com IPPE anual < -1 para o período a) 1982 - 2015, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2015. 43
5.6 Fração da área com ISV < 40 para o trimestre DJF para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 45
5.7 Fração da área com precipitação inferior ao limiar de precipitação equivalente ao ISV = 40 para o trimestre DJF para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 46
5.8 Fração da área com IPP < -0.8 para o trimestre DJF para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 47
5.9 Fração da área com P-E inferior ao limiar de P-E equivalente ao ISV = 40 para o trimestre DJF para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 48
5.10 Fração da área com IPPE < - 0.8 para o trimestre DJF para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 49
5.11 Fração da área com ISV < 40 para o trimestre MAM para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 51
5.12 Fração da área com precipitação inferior ao limiar de precipitação equivalente ao ISV = 40 para o trimestre MAM para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 52
5.13 Fração da área com IPP < -0.8 para o trimestre MAM para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 53
5.14 Fração da área com P-E inferior ao limiar de P-E equivalente ao ISV = 40 para o trimestre MAM para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 55

5.15 Fração da área com IPPE < -1 para o trimestre MAM para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 56
5.16 Fração de área com ISV < 40 para o trimestre JJA para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 57
5.17 Fração da área com precipitação inferior ao limiar de precipitação equivalente ao ISV = 40 para o trimestre JJA para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 59
5.18 Fração da área com IPP < -0.9 para o trimestre JJA para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 60
5.19 Fração da área com P-E inferior ao limiar de P-E equivalente ao ISV = 40 para o trimestre JJA para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 61
5.20 Fração da área com IPPE < -0.9 para o trimestre JJA para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 62
5.21 Fração da área com ISV < 40 para o trimestre SON para o período a) 1981 - 2016, b) 1981 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 64
5.22 Fração da área com precipitação inferior ao limiar de precipitação equivalente ao ISV = 40 para o trimestre SON para o período a) 1981 - 2016, b) 1981 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 65
5.23 Fração da área com IPP < -0.8 para o trimestre SON para o período a) 1981 - 2016, b) 1981 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 67
5.24 Fração de área com P-E inferior ao limiar de P-E equivalente ao ISV = 40 para o trimestre SON para o período a) 1981 - 2016, b) 1981 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 68
5.25 Fração da área com IPPE < -0.8 para o trimestre SON para o período a) 1981 - 2016, b) 1981 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 69
5.26 Distribuição espacial dos compostos dos índices para DJF (2007/08 - 2008/09): a) Estresse da saúde da vegetação (vermelho) associado à condições de seca através do ISV, b) Condições de deficit (excesso) de precipitação em vermelho (azul) através do IPP, c) Condições de P-E (IPPE), d) Anomalia de ISV. 75
5.27 Distribuição espacial dos compostos dos índices para DJF (2009/10): a) Estresse da saúde da vegetação (vermelho) associado à condições de seca através do ISV, b) Condições de deficit (excesso) de precipitação em vermelho (azul) através do IPP, c) Condições de P-E (IPPE), d) Anomalia de ISV. 77

5.28 Distribuição espacial dos compostos dos índices para DJF (2010/11 - 2013/14): a) Estresse da saúde da vegetação (vermelho) associado à condições de seca através do ISV, b) Condições de deficit (excesso) de precipitação em vermelho (azul) através do IPP, c) Condições de P-E (IPPE), d) Anomalia de ISV. 79
5.29 Distribuição espacial dos compostos dos índices para DJF (2014/15 - 2015/16): a) Estresse da saúde da vegetação (vermelho) associado à condições de seca através do ISV, b) Condições de deficit (excesso) de precipitação em vermelho (azul) através do IPP, c) Condições de P-E (IPPE), d) Anomalia de ISV. 81
5.30 Fração da área com anomalia de ISV < -0.5 para o trimestre DJF para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016. 82
5.31 a) Anomalias de TSM (C°), b) Composto de Circulação (m/s) em 850mb e c) Composto de Circulação (m/s) em 200mb para os verões (DJF) 2007/08 - 2008/09. 85
5.32 a) Anomalias de TSM (C°) b) Circulação (m/s) em 850mb e c) Circulação (m/s) em 200mb para os verões DJF 2009/10. 87
5.33 a) Anomalias de TSM (C°) b) Circulação (m/s) em 850mb e c) Circulação (m/s) em 200mb para os verões DJF 2010/11 - 2013/14. 89
5.34 a) Anomalias de TSM (C°), b) Circulação (m/s) em 850mb e c) Circulação (m/s) em 200mb para os verões DJF 2014/15 - 2015/16. 91
5.35 Composto de circulação (m/s) para DJF 2007/08 - 2008/09 a) em 850mb e b) 200mb. 93
5.36 Perfis verticais (lat/lon x omega (Pa/s) para o primeiro período composto, DJF 2007/08 - 2008/09 em 30°S (paines a e b) 53°W (paineis c e d), entre 1000 e 200 hPa. 95
5.37 Perfis verticais (lat/lon x omega (Pa/s)) para o primeiro período composto, DJF 2007/08 - 2008/09 em 10°S (paineis a e b) e 41°W (paineis c e d), entre 1000hPa e 200hPa. 98
5.38 Circulação (m/s) para DJF 2009/10 a) em 850mb e b) em 200mb. 99
5.39 Perfis verticais (lat/lon x omega (Pa/s)) para DJF 2009/10 em 8°S (paineis a e b) e 41°W (paineis c e d), entre 1000hPa e 200hPa. 101
5.40 Perfis verticais (lat/lon x omega (Pa/s)) para DJF 2009/10 em 15°S (paineis a e b) e 48°W (paineis c e d), entre 1000hPa e 200hPa. 104
5.41 Composto de circulação (m/s) para DJF 2010/11 - 2013/14 a) em 850mb e b) 200mb. 105

5.42 Perfis verticais (lat/lon x omega (Pa/s)) para o segundo período composto, DJF 2010/11 - 2013/14 em 10ºS (painies a e b) e 40ºW (painies c e d), entre 1000hPa e 200hPa. 107
5.43 Perfis verticais (lat/lon x omega (Pa/s)) para o segundo período composto, DJF 2010/11 - 2013/14 em 21ºS (paineis a e b) e 48ºW (paineis c e d), entre 1000hPa e 200hPa. 108
5.44 Composto de circulação (m/s) para DJF 2014/15 - 2015/16 a) em 850mb e b) 200mb. 111
5.45 Perfis verticais (lat/lon x omega (Pa/s)) para o terceiro período composto 2014/15 - 2015/16 em 19ºS (paineis e b) e 53ºW (paineis d e e), climatologia de omega em 19ºS (c), entre 1000hPa e 200hPa. 112
5.46 Perfis verticais (lat/lon x omega (Pa/s)) para o terceiro período composto DJF 2014/15 - 2015/16 em 9ºS (paineis a e b) e 41ºW (paineis c e d), entre 1000hPa e 200hPa. 115
5.47 Climatologia do vento (m/s) para DJF sobre a América do Sul em a) 850mb, b) 200mb. 116

LISTA DE TABELAS

Pág.

4.1 Categoria e classificação do IPP e IPPE. 30
4.2 Períodos anuais e aproximadamente decenais utilizados nas análises. . . . 31
4.3 Regiões (latitude vs longitude) das seções verticais para os compostos de omega e anomalia e omega. 36

5.1 Coeficientes angular (β) e valores p (em parênteses) das séries temporais anuais e trimestrais de ISV, precipitação, IPP, P-E e IPPE para todos os períodos analisados. Os valores destacados em negrito representam os coeficientes identificados apresentando tendências lineares significativa ao nível de 15% (negrito preto) e 20% (negrito vermelho). Para cada índice a linha superior apresenta o coeficiente angular e o valor p da série anual ou trimestral completa, as três colunas da linha inferior representam os coeficientes angulares e os valores p do índice para cada um dos três períodos decenais. 72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMRS	–	Advanced Microwave Scanning Radiometer
AVHRR	–	Advanced Very High Resolution Radiometer
CEPED	–	Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil
CFSR	–	Climate Forecast System Reanalysis
DNOCS	–	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
EUA	–	Estados Unidos da América
EVI	–	Enhanced Vegetation Index
IRV	–	Índice de Realce da Vegetação
ENOS	–	El Niño Oscilação Sul
GOES	–	Geostationary Orbiting Environmental Satellite
IV	–	canal do infravermelho térmico
ICT	–	Índice de Condição da Temperatura
TCI	–	Temperature Condition Index
ICV	–	Índice de Condição da Vegetação
VCI	–	Vegetation Condition Index
IPP	–	Índice Padronizado de Precipitação
SPI	–	Standardized Precipitation Index
IPPE	–	Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração
SPEI	–	Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index
ISV	–	Índice de Saúde da Vegetação
VHI	–	Vegetation Health Index
IVP	–	canal do infravermelho próximo
ISSP	–	Índice de Severidade de Seca de Palmer
PDSI	–	Palmer Drought Severity Index
IVDN	–	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NDVI	–	Normalized Difference Vegetation Index
ION	–	Índice Oceânico Niño
ONI	–	Oceânic Niño Index
MSWEP	–	Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation
NASA	–	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	–	National Center for Atmospheric Research
NCEP	–	National Center for Environmental Prediction
NEB	–	Nordeste do Brasil
NOAA	–	National Oceanic and Atmospheric Administration
STAR	–	Center for Satallite Applications and Research
TB	–	Temperatura de Brilho
TSM	–	Temperatura da Superfície do Mar
VIIRS	–	Visible Infrared Imager Radiometer Suite
VIS	–	canal do visível
ZCAS	–	Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

Pág.

1 INTRODUÇÃO **1**
1.1 Objetivos 3

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **5**
2.1 Satélites e sensores 6
2.2 Índice de Vegetação 7
2.3 Clima do Brasil e mecanismos geradores de seca no país 11
2.3.1 Região Norte 12
2.3.2 Região Nordeste 14
2.3.3 Região Centro-Oeste 17
2.3.4 Região Sudeste 18
2.3.5 Região Sul 19

3 DADOS **21**
3.1 Índices de Vegetação 21
3.2 Precipitação 23
3.3 Diferença entre precipitação e evapotranspiração 23
3.4 Circulação atmosférica (850mb e 200mb) 24
3.5 Temperatura da Superfície do Mar (TSM) 24
3.6 Velocidade vertical (Omega) 24

4 METODOLOGIA **27**
4.1 Pré-processamento do ISV 27
4.2 Índice Padronizado de Precipitação (IPP) e Índice Padronizado de Precipitação menos Evapotranspiração (IPPE) 28
4.3 Definição de períodos decenais 30
4.4 Análise das séries temporais 31
4.4.1 Análise de tendência através de regressão linear 31
4.4.2 Coeficiente de determinação 32
4.4.3 Teste de Hipóteses 33
4.5 Compostos 34
4.6 Circulação, TSM e Velocidade vertical (Omega) 35

5 RESULTADOS 37
5.1 Caracterização das séries temporais de fração do território nacional sob condições de seca 37
5.1.1 Séries temporais anuais 37
5.1.2 Séries temporais trimestrais 43
5.1.3 Caracterização dos períodos quanto aos valores p e do coeficiente angular 70
5.2 Análise dos compostos 73
5.2.1 Verões (DJF) 2007/08 - 2008/09 73
5.2.2 Verão (DJF) 2009/10 74
5.2.3 Verões (DJF) 2010/11 - 2013/14 76
5.2.4 Verões (DJF) 2014/15 - 2015/16 78
5.2.5 Série temporal da fração do território nacional com anomalias de ISV inferiores a -0.5 82
5.3 Compostos globais da Anomalia de TSM e Circulação (vento em 850mb e 200mb) 83
5.3.1 Anomalias de TSM e circulação 83
5.3.1.1 Verões (DJF) 2007/08 - 2008/09 84
5.3.1.2 Verão (DJF) 2009/10 86
5.3.1.3 Verões (DJF) 2010/11 - 2013/14 86
5.3.1.4 Verões (DJF) 2014/15 - 2015/16 90
5.4 Circulação e velocidades verticais (omega) sobre a América do Sul 92
5.4.1 Compostos de circulação (850mb e 200mb) e omega para DJF 2007/08 - 2008/09 92
5.4.2 Circulação (850mb e 200mb) e omega para DJF 2009/10 98
5.4.3 Circulação (850mb e 200mb) e omega para DJF 2010/11 - 2013/14 . . 105
5.4.4 Circulação (850mb e 200mb) e omega para DJF 2014/15 - 2015/16 . . 110
5.5 Discussões e Considerações Finais 116

6 CONCLUSÃO 123

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 127

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas têm ocorrido vários eventos de secas em várias regiões do mundo inclusive no Brasil e muitos estudos têm buscado caracterizar esses eventos através do uso de índices de vegetação combinado com análise de variáveis meteorológicas (COVELE, 2011; PANISSET, 2015; BOKUSHEVA et al., 2016; BRITO et al., 2017).

A região Oeste dos Estados Unidos da América (EUA) esteve sob um longo período de secas severas entre os anos de 2006 e 2016. Kogan and Guo (2015) estudando esse evento concluíram que essa seca foi o segundo evento mais intenso e duradouro dos últimos anos na região. Porém, outra característica importante observada nesse fenômeno foi sua extensão espacial, sendo essa seca considerada a segunda mais extensa em termos de área atingida pelo deficit de chuvas desde 1934 quando uma área 0,3% maior da região foi afetada.

Estudos para diferentes regiões do Brasil mostraram que essas mesmas características têm sido observadas no país, que vem experimentando secas mais intensas, duradouras e extensas nas últimas décadas (PANISSET et al., 2018; BRITO et al., 2017; COELHO et al., 2012). Há, portanto, uma percepção que ao longo dos anos, principalmente nas últimas décadas do século passado e todo o século XXI, os eventos de secas estão se expandindo espacial e temporalmente.

A região Amazônica experimentou três grandes períodos de secas severas somente no presente século nos anos de 2005, 2010 e 2015 (PANISSET et al., 2018; COELHO et al., 2012). Panisset (2015) verificou que apesar dos eventos de seca dos anos de 2005, 2010 e 2015 terem diferentes origens, as áreas da bacia Amazônica atingidas pela seca apresentaram um gradativo aumento sendo 2015 o ano em que a seca atingiu sua maior extensão espacial.

Aspectos semelhantes foram encontrados na região Nordeste do Brasil (NEB). Brito et al. (2017) examinando os eventos de secas nos últimos 36 anos para a região verificaram que entre os anos 2011 e 2016 ocorreu a seca mais extensa que o NEB já experimentou assim como a mais severa.

Martins et al. (2018) também estudaram esse evento ocorrido no NEB no período de 2012 - 2016 e confirmaram que esse foi um fenômeno de seca excepcional e prolongado. Os resultados do estudo sugerem que o período de seca foi prolongado devido à um mecanismo de retroalimentação positivo do ciclo hidrológico. Nesse período de seca, o sistema de abastecimento de água da região, a bacia do Rio São

Francisco, chegou em janeiro de 2016 à apenas 5% do volume de capacidade.

A região Sudeste do Brasil não apresenta histórico de secas severas e frequentes como a região do NEB (MARTINS et al., 2018). No entanto, desde os anos 1999/2000 a região tem apresentado um padrão de deficit de precipitação (COELHO et al., 2016a) e em 2013/2014 experimentou um período de seca intensa. Nesses anos um dos principais sistemas de abastecimento de água da cidade de São Paulo alcançou a marca de apenas 5% da capacidade devido à falta de chuvas (OTTO et al., 2015). Essa seca foi considerada a mais severa nas últimas décadas para aquela região. Esse evento foi classificado como raro e notável pois um dos fatores a contribuir com a seca foi o término precoce da estação chuvosa do ano anterior (COELHO et al., 2016a).

Nota-se, portanto, que nas últimas décadas o Brasil, assim como outras partes do globo, tem experimentado longos e frequentes períodos de extensas secas. As variações que ocorrem na vegetação nos períodos de seca podem levar a mudanças irreversíveis no ecossistema local atingido pelo fenômeno. Além disso, os impactos das secas também podem ser observados na economia do país que ainda é muito dependente de recursos agrícolas, assim como na população em geral que se vê privada das condições básicas de sobrevivência.

No Brasil, devido à frequente ocorrência de secas, no começo do século passado foi criado o Departamento Nacional de Obras Contra a Secas (DNOCS), em virtude do grave problema que as secas representava para o país (BRASIL, 2013a). Em 2013, o Ministério da Integração Nacional através do programa Água para Todos, destinou cerca de R$ 130 milhões de reais para o abastecimento de água em 300 municípios atingidos pelas seca (BRASIL, 2013b). Em 2012 esse valor chegou a R$ 2,7 bilhões de reais somente para a região Nordeste (BRASIL, 2012).

O monitoramento desses eventos é de grande interesse para a meteorologia e aos setores afetados pelas secas, pois o conhecimento prévio de suas características físicas torna mais viável a tomada de decisões assertivas para a mitigação dos problemas causados e diminuição dos impactos.

Apesar que uma precisa definição de seca seja um problema levantado desde o início dos estudos desse fenômeno (YEVJEVICH, 1969), a ocorrência desse tipo de fenômeno tem sido bem documentada na literatura quanto às suas características temporais, frequência e intensidade (BRITO et al., 2017; KOGAN, 1997; MARENGO et al., 2017; COELHO et al., 2012). No entanto, outra característica importante da seca que deve ser levada em consideração é a extensão espacial atingida por cada evento. Alguns

dos trabalhos citados anteriormente foram realizados para regiões específicas do Brasil. Há portanto a necessidade de realizar estudos com uma maior abrangência territorial para, assim, fornecer um diagnóstico da dimensão espacial das secas sobre o Brasil.

A escassez de dados meteorológicos com grande cobertura espacial é um impedimento no desenvolvimento de melhores técnicas de avaliação dessas características. Todavia, dados de satélite são uma boa alternativa de monitoramento das secas pois possuem alta resolução espacial e temporal que permitem acompanhar as mudanças ocorridas em diferentes tipos de vegetação, além de possuir cobertura global abrangendo áreas remotas do planeta. Sendo assim, os eventos de secas que ocorrerem na era dos satélites podem ser melhores estudados e caracterizados através dessa ferramenta.

Em vista do exposto acima, esse trabalho levanta algumas questões a serem investigadas:

- Está havendo expansão espacial e temporal das secas no Brasil nas últimas décadas?
- Quais características climáticas podem estar contribuindo para a expansão dos eventos de secas no Brasil?

1.1 Objetivos

Essa dissertação tem como objetivo principal analisar a resposta da vegetação aos eventos de seca que ocorreram no Brasil nas últimas décadas quanto as suas características espaciais e temporais. Para este propósito foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar as características espaço - temporais dos eventos de secas no Brasil no período de 1981 a 2016, através do Índice de Saúde da Vegetação (ISV, em inglês Vegetation Health Index, VHI), do Índice Padronizado de Precipitação (IPP, em inglês Standardized Precipitation Index, SPI) e do Índice Padronizado de Precipitação - Evapotranspiração (IPPE, em inglês, Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index, SPEI);
- Analisar dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM), circulação atmosférica e velocidades verticais (omega) com objetivo de investigar pos-

síveis relações com os índices de vegetação e precipitação durante os períodos de seca identificados e caracterizar os padrões climáticos associados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Eventos de seca são fenômenos climáticos de grande impacto para a sociedade, principalmente aquelas que tem como economia de subsistência a produção agrícola. Países mais desenvolvidos como o Brasil também são afetados por extremos climáticos como as secas. É estimado (BRASIL, 2013b; BRASIL, 2012) que alguns milhões ou bilhões de reais são gastos anualmente para reparar os danos causados direta ou indiretamente por eventos de seca no Brasil. Estudos mostraram que mais de 50% dos desastres naturais ocorridos no Brasil no período de 1991 a 2012 estiveram, de alguma forma, relacionados aos períodos de seca ocorridos entre esses anos (CEPED, 2013).

No Brasil, algumas regiões tem registros históricos de grandes secas severas que foram responsáveis pela desertificação e descaracterização da vegetação nativa e por determinar o modo de vida da pouca população que conseguiu sobreviver aos extremos climáticos ocorridos. Alguns desses eventos foram de tão grande impacto que ocasionaram um êxodo dos habitantes locais e, consequentemente, superlotou algumas áreas urbanas aumentando o número de desempregados e desabitados nas cidades (CEPED, 2013).

Segundo Wilhite e Glantz (1985), secas podem ser definidas a partir de suas características meteorológicas, hidrológicas, agrícola e socio-econômicas. A seca meteorológica diz respeito à condição da precipitação de uma determinada região, frequentemente caracterizada pelo desvio da precipitação em relação à climatologia, ou à taxa de evapotranspiração (WILHITE; GLANTZ, 1985). Outras definições de seca tomam como parâmetro a temperatura da superfície ou o vigor da vegetação atingida. As secas hidrológicas podem ser definidas de acordo com diminuição da capacidade dos reservatórios de água, assim como do nível médios de rios e lagos por um período longo de tempo. A seca agrícola está associada à deficiência da umidade do solo devido ao deficit de água disponível para a cultura, induzindo à uma redução da biomassa. Seca socio-econômico está associada ao impacto da redução dos recursos hídricos nas atividades humanas. Wilhite e Glantz (1985) afirmam que "episódios de secas ocorridos em sequência em uma determinada região provavelmente terão efeitos diferentes, mesmo que tenham características espaciais, intensidade e duração semelhantes".

O território brasileiro já experimentou alguns episódio de secas severas, sendo muito desses eventos relatado em obras literárias como "Os Sertões" de Euclides da Cunha (CUNHA, 1902), registrados em dados meteorológicos como temperatura e precipi-

tação, ou até mesmo através de registros de vazão de rios (FISCH et al., 1998). No entanto, apesar dos esforços para se conhecer as secas do ponto de vista científico, a escassez de dados meteorológicos disponíveis em estações de coleta e a extensa área atingida por cada episódio de seca torna seu monitoramento, apenas utilizando dados de superfície, uma tarefa desafiadora.

Satélites meteorológicos são, portanto, ferramentas indispensáveis para complementar estudos das secas, pois possuem grande cobertura espacial permitindo que áreas onde não há dados de superfície sejam analisadas homogeneamente além de possuírem uma coleta regular de dados sobre os mesmos pontos da superfície terrestre. Outro aspecto positivo da utilização de dados de satélites é quanto às suas resoluções espaciais e temporais. A vegetação de uma região pode ter um grande contraste com a vegetação de uma região vizinha. Por exemplo, o Estado e Alagoas tem um pouco mais de 27 mil km^2 e apresenta pelo menos três tipos de vegetação nativa. Satélites com alta resolução espacial captam as mudanças ocorridas em cada tipo de vegetação e nas regiões de transição entre um bioma e outro. O mesmo pode ser atribuído à resolução temporal dos satélites, pois captam adequadamente as variações ocorridas em pouco espaço de tempo. Para a vegetação essa resolução temporal é muito importante, pois mudanças na aparência das plantas podem ocorrer entre 3 e 7 dias (KOGAN, 1997) em respostas a fatores externos como a precipitação ou a atuação de outros sistemas sinóticos e, portanto, precisam ser registradas pelo satélite.

2.1 Satélites e sensores

Satélites meteorológicos, tais como os da série do GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), o Terra pelo projeto Earth Observing System (EOS), Suomi entre outros, têm sido amplamente utilizados para o monitoramento das secas e outros fenômenos climáticos (COVELE, 2011; PANISSET, 2015; BOKUSHEVA et al., 2016). Esses satélites tem em seus sistemas sensores de radiação que permitem coletar informações sobre as condições da vegetação na superfície. Os dados obtidos através desses sensores são aplicados no monitoramento do início da seca, a intensidade de cada evento, a área atingida entre outros aspectos do fenômeno, assim como para estudar o estresse das plantas causados pelo excesso de umidade (KOGAN; GUO, 2016).

O Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) é um dos muitos sensores que são utilizados para o monitoramento das secas. Esse sensor esteve acoplado a bordo dos satélites de órbita polar - Polar Orbiting Environment Satellites - da

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) por 35 anos, desde 1981, e coletou informações de reflectância em 6 canais do espectro eletromagnético, três nas bandas termais (IV térmico) e três no visível (VIS) e infravermelho próximo (IVP), porém somente 5 desses canais foram transmitidos para armazenamento de dados em tempo real. Sua resolução espacial é de 1,09 km e o satélite orbita a Terra cerca de 14 vezes ao dia (NOAA, 2014). O sensor ficou em órbita por quase quatro décadas permitindo a elaboração de uma série histórica de dados de reflectância que foi utilizada para desenvolver índices de vegetação.

Outro sensor que tem características semelhantes ao AVHRR, é o sensor VIIRS (Visible Infrared Imager Radiometer Suite) a bordo do Suomi NPOESS (National Polar-orbiting Operational Satellite System) Preparatory Plataform. O satélite foi lançado em 2012 tendo uma série de dados ainda pequena. Assim como os sensores anteriores, o VIIRS tem uma órbita polar sincronizada com a órbita solar, é operacional e amplamente utilizado para monitorar processos da superfície. Porém, algumas de suas características superam os demais sensores. Por exemplo, fornece observações em 22 canais de refletividade e reflectância. Alguns desses canais são de alta resolução espacial (375 m) incluindo os mesmos 5 canais que o AVHRR fez as observações.

A partir desses sensores foi possível desenvolver índices de vegetação baseados nas propriedades de reflectância da vegetação. Esses índices foram calculados a partir de algoritmos de tratamento dos dados que permitem ter uma melhor descrição da variável observada e se tornaram os principais recursos para descrever o comportamento da vegetação em anos de seca, assim como para estabelecer um padrão da vegetação em anos sem ocorrência das secas (KOGAN; GUO, 2016).

2.2 Índice de Vegetação

Existem diversos índices que descrevem a resposta da vegetação à forçante de radiação e disponibilidade de água e, assim, conseguem caracterizar as mudanças ocorridas na vegetação devido ao estresse térmico ou hídrico. A condição base para o desenvolvimento da maioria desses índices leva em consideração a propriedade da planta em absorver e refletir radiação solar. A vegetação de cor verde absorve altamente a radiação solar (AVHRR canal visível do vermelho: 0.62 μm - 0.7 μm, VIS) e a utiliza para realizar a fotossíntese, enquanto que a estrutura celular das folhas reflete a luz no infravermelho próximo (0,7 μm - 1,1 μm, IVP) (STÖCKLI; VIDALE, 2004). Quando a vegetação está em boas condições esta reflete a luz visível com intensidade menor que no IVP, ou seja, a planta está processando a maior parte da

radiação recebida. O contrário ocorre quando a plantação está sob estresse, onde a refletividade no canal visível aumenta e a no IVP diminui. A razão entre os valores do canal visível e do IVP indica a capacidade da vegetação em realizar fotossíntese e, assim, determina a densidade daquela vegetação, consequentemente, também, a produtividade da vegetação.

Índices como o IVDN (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, em inglês Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) são resultantes da diferença normalizada dos valores de reflectância desses dois canais. Esse índice é utilizado como parâmetro de estudo da dinâmica da vegetação, mas sua principal aplicação é como indicador de secas (NASA, 2018).

Kogan e Guo (2016) utilizaram esse índice para estudar secas ocorridas no início do século nos EUA, Rússia, Austrália e no Chifre da África e concluíram que os eventos de secas não somente foram mais intensos e duradouros, mas também atingiram áreas mais extensas, afetando a produção agrícola e os recursos alimentícios das regiões afetadas.

No entanto, índices vegetativos como o NDVI e o IRV (Índice de Realce da Vegetação, em inglês Enhanced Vegetation Index, EVI) representam as secas somente quanto ao estresse hídrico sofrido pela plantação. O IRV, assim como o NDVI, é um índice que reflete os parâmetros biofísicos da vegetação porém é mais sensível às mudanças que ocorrem na estrutura da vegetação e não na quantidade de clorofila produzida por estas.

A exemplo das limitações desse tipo de índice um estudo de monitoramento do estresse da vegetação relacionado à eventos de seca realizado por Kogan (1995) investigou o estresse hídrico na região Norte dos EUA em 1993 através da análise de um índice composto apenas pela componente de vegetação. Concluiu-se nesse estudo que a vegetação estava sob estresse, no entanto o estresse observado foi devido ao excesso de chuvas ocorridas na região e não devido à deficit de chuvas. Anderson et al. (2010) ao analisarem a seca que atingiu Amazônia em 2005 notaram que o IRV não representava adequadamente as regiões sob estresse hídrico. Os resultados foram comparados com dados de mortalidade de árvores para o mesmo período e constatou-se que a intensidade da seca não poderia ser estimada somente utilizando o IRV.

Sendo assim, nota-se a necessidade de que pelo menos uma outra variável que represente a condição climática envolvida na seca a fim de que o índice possa identificar

melhor os períodos de seca e determinar corretamente seus impactos na vegetação. Para isso foram desenvolvidos índices que utilizam a Temperatura de Brilho (TB) como indicador da temperatura da vegetação assim como sua influência em condições de estresse da vegetação, sendo esta uma estimativa da temperatura de superfície (ou da radiação) e, portanto, representa a componente atmosférica do índice.

Os índices de vegetação que têm a componente da temperatura combinam os valores de reflectância dos canais do visível, infravermelho próximo e infravermelho térmico, resultando em um índice que mede o quanto as condições de temperatura e condições hídricas da vegetação sob estresse se desviam das condições limites normais para determinada região.

Kogan (1997) desenvolveu um estudo baseado nos índices de Condições da Temperatura (ICT, em inglês Temperature Condition Index, TCI) e de Condições da Vegetação (ICV, em inglês Vegetation Condition Index, VCI) para investigar o estresse térmico e hídrico, respectivamente, da vegetação em diferentes ecossistemas para quase todos os continentes. A utilização desses índices mostrou uma forte correlação entre eles e a produção agrícola, indicando que podem ser utilizados para estimar os impactos da escassez de água ou estresse de temperatura na produtividade das plantações, principalmente na época de crescimento da cultura. Outro estudo apontou a eficácia dos índices ICT, ICV e ISV em caracterizar os impactos das secas quando estas coincidem com o início da estação chuvosa de determinada região atingida (PANISSET, 2015).

Nas últimas décadas, várias regiões do planeta têm experimentado longos períodos de seca que vêm sendo estudados a partir de índices de vegetação que combinam dados de reflectância e de emissão no infravermelho próximo, como o Índice de Saúde da Vegetação (ISV). Esse índice combina o Índice de Condição da Vegetação (ICV) e o Índice de Condição da Temperatura (ICT), sendo empregado principalmente para estimar as condições totais da saúde da vegetação (KOGAN; GUO, 2015).

Considerando sua característica híbrida em representar as condições térmicas e hídricas, o ISV pode ser utilizado para identificar a gênese da seca através de sua componente térmica que indica se a vegetação esta sob estresse devido às altas temperaturas e, portanto, altas taxas de evapotranspiração. O ISV pode também ser utilizado para avaliar se determinado evento de seca ocorre devido às condições relacionadas ao estresse hídrico causado por outros fatores à parte das condições de temperaturas, ou ainda se a seca é causada pela combinação desses dois fatores (KOGAN; GUO, 2016). Além disso, o ISV é útil na identificação da extensão de áreas

afetadas pela seca através de um limiar (ISV < 40) que estabelece o início de um evento de seca (KOGAN; GUO, 2015; KOGAN; GUO, 2016).

Alguns estudos utilizando o ISV constataram sua eficácia em determinar a duração, intensidade, gênese e extensão geográfica alcançada pelas secas (DUTTA et al., 2015; COVELE, 2011). Kogan e Guo (2016), estudaram a mega-seca que ocorreu no Oeste dos EUA entre 2006 - 2015 e concluíram, a partir da percentagem de área que apresentou ISV inferior ou igual à 40, que todos os estados que compõe a região Oeste estiveram sob condições de secas severas durante esse período. Nos anos de maior intensidade da seca, 2012 - 2014, alguns desses estados tiveram 100% de suas áreas atingidas pela seca, e no total cerca de 71,3% de área da região foi afetada pela seca. Esse valor só foi inferior à outra grande seca que ocorreu nos EUA em 1934 em que, segundo análises do Índice de Severidade de Seca de Palmer (ISSP, em inglês Palmer Drought Severity Index, PDSI), aproximadamente 71,6% da área da mesma região foi afetada pela seca.

Ainda utilizando índices de vegetação que contém componentes climáticas e vegetativas, estudos foram realizados com o objetivo de analisar os períodos de seca para o Brasil. Panisset (2015) estudou eventos de secas que ocorreram na região Amazônica nos anos de 2005, 2010 e 2015. O índice de vegetação utilizado foi uma adaptação do ISV onde foram utilizadas as Temperaturas da Superfície e o Índice Vegetativo por Diferença Normalizada para calcular a ICT e ICV, respectivamente, os resultados foram validados com análises de precipitação, radiação solar e temperatura da superfície. Essa avaliação determinou as características espaciais adquiridas pelas secas em cada um dos anos estudados assim como o impacto de cada uma das variáveis meteorológicas envolvidas, diferenciando os eventos entre si. Foi constatado que em 2005 apenas 38% da área da bacia Amazônica foi afetada pelas secas enquanto que em 2010 este valor subiu para 43%. Em 2015, ano que houve o episódio de seca considerado mais intenso entre os três anos analisados, cerca de 80% da área de toda bacia experimentou condições de secas. Esses resultados, quando comparados com análises feitas das variáveis meteorológicas, mostraram a contribuição de cada uma dessas variáveis, sendo que em 2015 todas as variáveis colaboraram para o estresse da vegetação.

Brito et al. (2017) estudaram os eventos de seca na região Nordeste utilizando um Índice Padronizado de Precipitação (IPP) e o ISV para um período de 36 anos (1981 a 2016) e constaram que entre os anos de 2011 e 2016 a região apresentou maior frequência de secas quando comparado com todo o período de estudo. Além disso, es-

ses 5 anos foram os anos com maior intensidade e maior extensão espacial do evento. Empregando o limiar de ISV que indica o início de condições de seca, verificou-se que nesses mesmos anos cerca de 97% da área do NEB esteve sob condições de seca. Desta forma, esses e outros trabalhos confirmam a efetiva utilização dos índices de vegetação como ferramenta para a identificação e caracterização de eventos de seca.

2.3 Clima do Brasil e mecanismos geradores de seca no país

O território brasileiro abrange cerca de 47% de toda região continental da América do Sul. Nessa grande extensão espacial são observadas diferentes características climáticas nas cinco regiões do país, com a manifestação de mecanismos atmosféricos que atuam nos períodos de secas (SILVA; SILVA, 2009). Os mecanismos atmosféricos que influenciam o clima de cada região podem ser estudados a partir da circulação geral da atmosfera, por exemplo, a atuação das células de circulação de Hadley e Walker no Brasil, assim como os sistemas de alta e baixa pressão associados. Além da circulação geral da atmosfera ainda nota-se as influências de sistemas de escala sinóticas como os sistemas frontais e outros sistemas de meso e micro escala que caracterizam o clima das regiões brasileiras.

As características do clima de cada região também tem influência dos efeitos de suas localizações geográficas. As regiões Norte e Nordeste do Brasil estão localizadas na faixa tropical do planeta e apresentam clima úmido e semiárido, respectivamente. As regiões Centro-Oeste e Sudeste estão em uma zona de transição entre a faixa equatorial e o Trópico de Capricórnio, apresentam assim características climáticas inerentes às duas regiões. A região Sul do Brasil localiza-se no extremo sul do território brasileiro e apresenta características climáticas mais próximas do clima temperado, com um regime homogêneo de precipitação ao longo do ano.

Entende-se, no entanto, que as características particulares de cada região como os diferentes regimes de precipitação e estações secas podem influenciar em uma análise geral abrangendo todo o território nacional, de forma que algumas características mais acentuadas de cada região sejam atenuadas. Além disso, compreende-se que os avanços das atividades agrícola, assim como as mudanças no uso do solo provocadas por outros fatores durante o período de estudo podem resultar em deterioração da vegetação e consequentemente regiões com características de um clima mais seco. Contudo, esses respectivos aspectos não são relevantes para o estudo e não foram considerados nas análises.

Portanto, a fenomenologia das secas para o Brasil deve ser abordada a partir da

climatologia de cada região. Os regimes de precipitação no território brasileiro são condicionados à características como a grande extensão latitudinal do país, às várias formas de relevo existente, assim como à floresta Amazônica. A circulação atmosférica contribui para o desenvolvimento de diferentes sistemas atmosféricos. Esses sistemas podem ser modificados e, assim, a precipitação regional alterada quando são afetados por mudanças na circulação geral.

Para cada região do país, diferentes mecanismos podem afetar o regime de precipitação local. Em geral, os mecanismos associados à redução da precipitação estão relacionados à flutuações da intensidade da circulação de Hadley e Walker assim como flutuações nas fontes de calor latente. Alguns fenômenos, como os ENOS (El Niño-Oscilação Sul), a Madden-Julian e anomalias das temperaturas nos oceanos Atlântico e Pacífico também podem alterar os regimes de precipitação no Brasil.

As seguintes seções irão abordar as condições climatológicas de cada região destacando-se os mecanismos que ocasionam secas.

2.3.1 Região Norte

A região Norte do Brasil é compreendida por aproximadamente 60% da maior floresta tropical do mundo - a floresta Amazônica. Esse fato a torna a região com os maiores valores médios anuais de chuvas em todo o país totalizando mais de 2000mm por ano (SALATI et al., 1979). Os mecanismos atuantes na região Norte que determinam o seu regime de precipitação são em grande parte devido ao aquecimento da superfície e formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), linhas de instabilidade, aglomerados convectivos e na porção norte devido a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (FISCH et al., 1998; HASTENRATH; HELLER, 1977).

O aquecimento superficial que ocorre na região Norte libera calor sensível e latente na atmosfera, "este último devido à condensação da umidade através de toda coluna troposférica" (MOLION, 1987) e, consequentemente, favorece a convecção e formação de nuvens de chuva. Em altos níveis esse ar se resfria e diverge formando, nas regiões adjacentes, a leste e oeste da região convectiva, uma corrente de subsidência que inibe a formação de nuvens (REBOITA et al., 2010). Essa circulação é denominada célula de Walker, e manifesta-se sobre a região central-ocidental da região Norte. No entanto, "a circulação termicamente forçada sobre a região aquecida induz convergência de ar e baixa pressão atmosférica nos baixos níveis, e divergência e alta pressão em altos níveis" (MOLION, 1987). Assim, um anticiclone de altos níveis

é formado sobre o altiplano boliviano (Alta da Bolívia), o qual é responsável pelos máximos de precipitação observados na região. A Alta da Bolívia tem sua atividade definida pela sazonalidade da radiação solar. No verão tem sua maior intensidade e ocorre no centro da região Norte. Durante o inverno está mais deslocada para o norte da América do Sul, fazendo com que a porção norte e noroeste da região Norte não apresente um período de seca definido.

A ZCIT é um fenômeno de grande escala e consiste na confluência dos ventos Alísios de nordeste e sudeste provenientes dos sistemas de alta pressão subtropical no Atlântico Sul e Norte. Esse fenômeno é caracterizado pela banda de nebulosidade com orientação zonal paralela à linha do equador no norte da América do Sul. Segundo Hastenrath e Heller (1977), devido à sua migração na direção norte-sul, a ZCIT é responsável pelo segundo máximo de precipitação no norte da Amazônia.

Além dos mecanismos de grandes escala, a região Norte recebe precipitação devido à manifestação de Linhas de Instabilidade (LI) originadas na costa norte da região, no oceano Atlântico. Essas linhas de instabilidade são formadas a partir do escoamento dos ventos Alísios em confluência com a brisa marítima. Com a convergência do vento alimentando a umidade, as LIs adentram no continente propagando-se para oeste, podendo chegar até a região dos Andes. As LIs são formadas por uma banda de nebulosidade de até 1500 km de comprimento e 170 km de largura, podendo apresentar grandes conglomerados de nuvens cumulonimbus que contribuem com aproximadamente 45% da precipitação da região Norte no período chuvoso (COHEN et al., 1989), entre os meses de Novembro e Março.

Além desses mecanismos de meso escala, a região Norte do Brasil ainda tem influência de sistemas frontais que conseguem penetrar o continente até o noroeste do país, os quais são denominados fenômenos de friagem (FISCH et al., 1998). Esses sistemas se originam no sul da América do Sul e quando muito intenso podem se estender até a parte ocidental da Amazônia onde se associam com aglomerados convectivos de meso escala e resultam em intensos volumes de chuva.

O período chuvoso da região ocorre entre os meses de Novembro a Março, onde há maior atividade convectiva. Entre os meses de Maio e Setembro grande parte da região apresenta diminuição da atividade convectiva e os volumes anuais de precipitação ficam em torno de 900 mm, caracterizando o período menos chuvoso da região. Segundo Fisch et al. (1998) a porção noroeste da região Norte não tem um período seco definido.

Apesar disso, a região experimenta períodos em condições de seca quando os sistemas tem sua atuação modificada e o regime de precipitação é alterado. Alteração na posição climatológica da ZCIT induz deficit de chuva na região e é o principal fator responsável por períodos de seca no Norte do país. Alterações no padrão de circulação da célula de Walker também pode influenciar negativamente os valores de precipitação, pois afeta diretamente a atuação da Alta da Bolívia. Alguns mecanismos atmosféricos de grande escala, como os El Niños e anomalias na temperatura da superfície do Atlântico, podem provocar essas alterações. Deficit de chuva na região durante eventos El Niños estão relacionadas às anomalias na célula divergente de Walker, onde há predominância de subsidência desde o Nordeste até o leste da Amazônia, alterando a região de atuação da ZCIT e, portanto, provocando períodos mais secos na região Norte.

Entretanto, outros mecanismo também podem influenciar os regimes de precipitação como um gradiente meridional de anomalias de TSM no Atlântico Tropical referido na literatura como "padrão de dipolo", particularmente no leste da Amazônia (NOBRE, 1996; NOBRE; SHUKLA, 1996). As anomalias de TSM no Atlântico tem influência na região leste da Amazônia onde a ZCIT tem importância fundamental para o regime de chuva da região. A variação da temperatura da superfície do mar no oceano Atlântico subtropical Norte e Sul quando associada com a circulação de Hadley provoca fortes movimentos subsidentes sobre o leste da Amazônia e bloqueios no escoamento troposférico. Em anos com alta frequência de bloqueio, um número menor de sistemas frontais alcançam a Amazônia e a precipitação é reduzida (MOLION, 1987).

2.3.2 Região Nordeste

A região Nordeste do Brasil (NEB) tem seu regime de precipitação intrinsecamente ligado aos mecanismo da circulação geral da atmosfera, "fenômenos de escala global, resultantes da interação complexa entre a superfície do planeta, particularmente a distribuição de continentes e oceanos com fornecimento desigual de energia solar, topografia e cobertura vegetal" (MOLION; BERNARDO, 2002). Em geral, os mecanismos atmosféricos que determinam o regime de chuva no NEB são a ZCIT, sistemas de brisas, perturbações dos Alísios, convecção local e resíduos de sistemas frontais.

A ZCIT é responsável por cerca de 30% a 80% dos totais pluviométricos da região Nordeste (MOLION; BERNARDO, 2002). A variabilidade anual da posição da ZCIT é determinada pela intensidade da zona de confluência dos Alísios (ZCA) de sudeste e nordeste. Ou seja, nos meses de verão do Hemisfério Sul a ZCIT tende a atingir

sua posição máxima ao sul, cerca de 4ºS e entre os meses de agosto a setembro atinge sua posição mais ao norte, cerca de 14ºN. Segundo alguns estudos (HASTENRATH; GREISCHAR, 1993), a variabilidade anual das chuvas no NEB associadas à ZCIT parece estar relacionada às anomalias de temperatura da superfície do oceano Atlântico, quando essas são positivas (negativas) no Atlântico Sul e negativas (positivas) no Atlântico Norte há a ocorrência de anos chuvosos (secos) no NEB.

Outro mecanismo importante no regime de precipitação do Nordeste são os sistemas frontais que conseguem atingir latitudes mais baixas, podendo chegar até entre as latitudes 5ºS e 18ºS. Esses sistemas tem origem em regiões de latitude mais altas e, geralmente, penetram até parte da região Nordeste nos meses de inverno quando a ZCIT está posicionada mais ao norte. Associado com a penetração de sistemas frontais pode ocorrer a presença de um vórtice ciclônico nos altos níveis (VCAN) onde o centro do vórtice é frio com predominância de movimentos subsidentes e em sua periferia desenvolve-se nebulosidade. A combinação desses sistemas pode aumentar os totais pluviométricos durante a estação seca.

Os sistemas de meso e micro-escala que atua na região Nordeste são as brisas de mar e terrestre, perturbação ondulatória nos Alísios e convecção local. As brisas de mar e terrestre são sistemas de circulação local que se desenvolvem na costa do Nordeste durante todo o ano e são produzidos devido ao aquecimento e resfriamento diferencial do continente e do oceano. Esse mecanismo é responsável pela convecção de meso-escala da região. Quando associados aos Alísios podem provocar chuvas intensas, porém a precipitação induzida pelas brisas são fracas e de curta duração.

"O campo dos ventos Alísios são frequentemente perturbados por penetrações de sistemas frontais em latitude baixa" (MOLION; BERNARDO, 2002). Essas perturbações são denominadas de Perturbações Ondulatórias nos Alísios (POA). As POAs propagam-se para o oeste imersas no campo dos ventos à superfície como linhas de convecção que podem penetrar até 300km continente adentro, sendo que quando confluem com as brisas terrestres se intensificam e podem gerar volumes de precipitação superiores a 100 mm por dia com rajadas de vento acima de 50 km/hora. Segundo Cohen et al. (1989) as perturbações, associadas à brisas marítimas, são o principal fator responsável pelo máximo pluviométrico na região costeira entre os meses de maio a junho no NEB.

Além desses mecanismo, o Nordeste ainda apresenta uma outra importante fonte de precipitação, que são as convecções locais. Essas convecções ocorrem devido ao aquecimento da superfície e à convergência de umidade transportada pelos Alísios.

Esses são mecanismos locais de curta duração e baixos volumes de chuva mas que são de fundamental importância para a região semi-árida do Nordeste MOLION and Bernardo (2002).

As secas na região Nordeste são eventos recorrentes e que estão ligados à alteração no regime de precipitação em diferentes escalas. Modificações no padrão de atuação dos sistemas atuantes no Nordeste pode levar a região à condições de seca. Por exemplo, quando a ZCIT tem sua variabilidade alterada de forma que sua atuação no norte do NEB é reduzida, na região, observa-se a ocorrência de períodos secos. Além disso, mudanças nos padrões de circulação que afetam o desenvolvimento da convecção local assim como o transporte de umidade através do ventos Alísios, levam a região à deficit de precipitação característicos de seca. Mecanismos oceano-atmosféricos como os El Niños e anomalias na TSM do Atlântico Tropical são os principais responsáveis por essas modificações no regime de precipitação da região.

De acordo com alguns estudos (MOLION; BERNARDO, 2002; KOUSKY et al., 1984) o mecanismo atmosférico mais importante que afeta os regimes de precipitação da região Nordeste são associadas aos fenômenos ENOS. Em particular, as anomalias negativas de chuva associadas aos eventos El Niño - ou seja, condições de seca - estão relacionadas à anomalias de circulação e transporte de umidade. Em anos de El Niño, o ramo ascendente da célula de Walker se desloca zonalmente para a leste de sua posição climatológica movendo, assim, o ramo descendente da célula também para leste. Esse processo gera uma situação de estabilidade atmosférica sobre o norte da América do Sul, onde o ar superior subside e inibe a formação de nuvens de chuva, além de limitar a atuação da ZCIT ao norte da Amazônia e do NEB (MOLION, 1987). Entretanto, Kane (2000) mostrou que a correlação entre o fenômeno e os totais anuais de precipitação são mais importantes no norte do NEB e que as demais partes da região não respondem linearmente à mudança da circulação devido ao aquecimento superficial do Pacífico equatorial. Os eventos de El Niño podem ser influenciados por outros fenômenos de escala globais como a Oscilação Decenal do Pacífico (ODP). Na fase quente da ODP, em média, os eventos de El Niño tem maior frequência e são mais fortes (KAYANO; ANDREOLI, 2007; KAYANO; ANDREOLI, 2009).

As temperaturas do Oceano Atlântico Tropical também desempenham papel importante na variabilidade das chuvas no NEB e podem induzir a região à períodos de seca. Segundo alguns estudos (NOBRE, 1996; CHU, 1984), além dos fenômenos no oceano Pacífico, os fenômenos atmosféricos e oceânicos sobre o Atlântico tropical

são de grande importância para a variabilidade interanual das chuvas no Nordeste. Quando as temperaturas do Atlântico Norte estão mais aquecidas a ZCIT se posiciona ao norte de sua posição climatológica, sendo a porção norte do Nordeste, sua principal região de atuação, afetada por deficit de chuvas (NAMIAS, 1972). Em outro estudo, Markham e Mclain (1977) encontraram uma relação entre as temperaturas da superfície do Atlântico Sul e Norte e as chuvas no norte do Nordeste. Os autores concluíram que quando há anomalias positivas de TSM do Atlântico equatorial as probabilidades encontradas indicam condições de seca em algumas regiões do norte do Nordeste. Em anos secos no Nordeste, que estão associados à anomalias de TSM sobre o Atlântico Tropical Norte, a ZCIT, além de se posicionar mais ao norte, permanece por menos tempo no hemisfério sul. Nos anos em que ela retorna em março para o hemisfério Norte, período da estação chuvosa na maior parte do Nordeste, a região apresenta condições de seca.

2.3.3 Região Centro-Oeste

O clima da região Centro-Oeste é predominantemente seco no inverno e úmido nas outras estações do ano. Devido à sua localização entre as latitudes de 10ºS e 30ºS, a região recebe influência de sistemas originados em latitudes médias como os sistemas frontais e de regiões tropicais como a ZCAS e Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) tropicais (QUADRO et al., 1996; REBOITA et al., 2010). O verão é a estação chuvosa da região, estando sob influência da precipitação da ZCAS e do sistema de monções da América do Sul. O aquecimento convectivo da região da Alta da Bolívia resulta em grandes volumes de chuvas para a região Centro-Oeste durante o verão (VIRJI, 1981). Apesar dos mínimos de precipitação ocorrerem no inverno e atingirem valores menores que 300 mm, a região tem uma precipitação anual de cerca de 1500 mm.

A região apresenta condições de seca quando a ZCAS tem seu padrão de atuação alterado devido à anomalias no transporte de umidade e de circulação. A ocorrência dessas anomalias no Centro-Oeste está, geralmente, relacionada à mecanismos atmosféricos que atuam diretamente nas regiões adjacentes mas que também tem influência na região mais central do país, especificamente os ENOS.

As anomalias da célula de Walker em anos de El Niño afetam o regime de precipitação do Centro-Oeste, pois em baixos níveis predominam anomalias anticiclônicas. Também em anos de El Niño, "há fortalecimento da baixa térmica continental subtropical, pelo aquecimento anômalo da superfície durante a primavera" que está associado à deficit de precipitação na região (GRIMM, 2009b).

2.3.4 Região Sudeste

A região Sudeste está geograficamente localizada em uma zona de transição entre os trópicos e subtrópicos sendo assim uma faixa de conflito entre sistemas tropicais e extratropicais. Apesar dessa região sofrer a influência de sistemas como a ZCAS e da Alta Subtropical (ASAS), os seus "mecanismos de circulação estão sob o controle da dinâmica da frente polar" (NUNES et al., 2009). A região caracteriza-se por ter o período chuvoso no verão, com precipitação anual de aproximadamente 1500 mm, e seco no inverno. Outros sistemas que atuam na região durante todo o ano são os CCMs, instabilidade pré-frontais - que trazem grandes volumes de chuva e tempo severo para a região, bloqueios atmosféricos e brisas marítima (REBOITA et al., 2010).

Os períodos de seca que a região Sudeste experiencia estão relacionados à anomalias na circulação atmosférica em baixos níveis e ao transporte de umidade para a região. Além disso, existem mecanismos que atuam diminuindo a frequência de sistemas frontais na região. Mais especificamente, as secas são induzidas por anomalias positivas das TSM sobre o Pacífico e anomalias no oceano Atlântico Sul. Ainda há também a influência de padrões de trem de ondas, como no evento de seca ocorrido em 2014 e sistemas de bloqueios que atuam no Sul da América do Sul.

Alguns estudos mostraram a existência de uma conexão entre a precipitação na região Sudeste e as anomalias de TSM sobre o Pacífico em anos de ocorrência do fenômeno La Niña (COELHO et al., 2002). Embora essa relação não seja tão forte quanto às que são encontradas entre o evento e outras regiões do Brasil, nos anos de ocorrência da fase fria do ENOS - La Niña, em geral, observa-se deficit de precipitação no Sudeste do país. No entanto, esta correlação está condicionada à alguns outros fatores como a intensidade do evento e época do ano que este ocorre.

Anomalias de TSM do Atlântico Sul próximo à costa sudeste do Brasil também estão relacionadas à redução da precipitação nessa região. Coelho et al. (2016a) analisaram anomalias de temperatura sobre essa região oceânica para um evento de seca ocorrido em 2014 e encontraram uma forte associação negativa entre as variáveis, indicando que um aumento das TSM no Atlântico Sul corresponde à diminuição dos totais pluviométricos na região Sudeste.

Outro mecanismo que induz períodos de seca na região Sudeste são padrões de trem de ondas originados devido à convecções anômalas próximo à região da Indonésia e Austrália associados à um cavado mais acentuado nos dois hemisférios (CAVALCANTI; KOUSKY, 2004) além de sistemas de bloqueios nos oceanos Pacífico e Atlântico (CO-

ELHO et al., 2016a; COELHO et al., 2016b). No episódio da seca de 2014, além dessas características, ainda houve a atuação anômala da ASAS que transportava ar mais quente que o normal para o continente desviando a umidade da Amazônia para a região Sul e impedindo a atuação da ZCAS na região.

Sistemas de bloqueios que atuam diminuindo a frequência da passagem de sistemas frontais na região também causam deficit de chuva no Sudeste do Brasil. Cavalcanti e Kousky (2004) estudaram um evento de seca que ocorreu na região Sudeste em 2001 e concluíram que além desses bloqueios, o aumento da atividade de vórtices ciclônicos de altos níveis associado à forte atividade da ASAS sobre o continente também contribui para diminuição da precipitação. Em termos de escala global, em geral, a ocorrência de eventos La Niña e a atuação da oscilação Madden-Julian estão associado à deficits de precipitação na região.

2.3.5 Região Sul

A região Sul do Brasil apresenta condições climáticas características dos trópicos e de latitudes médias. Seu regime de precipitação exibe transições claras. No norte da região a precipitação é determinada pelos sistemas de monções com estação chuvosa começando na primavera e estendendo-se até o outono. Na parte sul da região a precipitação é mais homogênea com regime de chuva característicos de latitudes médias (GRIMM, 2009a). Os principais sistemas atuantes na região são os sistemas frontais que atingem a região durante todo o ano, com maior frequência no outono e inverno (REBOITA et al., 2010). Ciclones baroclínicos que tem origem em regiões polares deslocam-se para latitudes mais baixas atingindo a região Sul, trazendo chuva fortes, rajadas de vento intensas e diminuição da temperatura. O extremo sul da região Sul é uma região ciclogenética, por isso a alta frequência da ocorrência de ciclones. Os complexo convectivos como CCMs, linhas de instabilidade e outros também contribuem para determinar o clima da região Sul, no entanto a predominância das chuvas se dá pela entrada de sistemas frontais.

Sendo os sistemas frontais os principais responsáveis pelo regime de precipitação da região Sul, quando estes têm seu padrão alterado a região sofre com episódios de seca. Modificações nesse padrão incluem bloqueio da passagem de frentes e diminuição da frequência que estas ocorrem na região, e, consequentemente, deficit de precipitação e condições de seca. Alguns mecanismo atmosféricos como a fase positiva da Oscilação Sul (La Niña) (GRIMM; DIAS, 1995) induzem anomalias positivas de radiação de onda longa sobre a região sul durante períodos de seca.

Quando as águas superficiais do Oceano Pacífico equatorial estão mais frias e os ventos Alísios mais intensos, a circulação de Walker se desloca para regiões mais centrais do oceano Pacífico. Com essa condição atmosférica estabelecida a passagem de frente frias na região Sul são mais rápidas diminuindo, assim, a precipitação, principalmente nos meses entre setembro e fevereiro (MARENGO; OLIVEIRA, 1998). Casarin e Kousky (1986) concluíram que períodos de seca no sul do Brasil também estão ligadas à anomalias de nebulosidade devido à mudanças no escoamento a nível global. Os autores estudaram anomalias de Radiação de Onda Longa (ROL) entre os anos 1979 e 1985 e analisaram as condições do escoamento global em 200mb. Nesse estudo concluíram, a partir de um índice de seca, que as secas no Sul do Brasil também estão relacionadas à anomalias que ocorrem na atmosfera a nível global com variações intrasazonais, no caso das anomalias de ROL, de duração de aproximada de 30 a 60 dias.

3 DADOS

Para a caracterização espaço-temporal das condições de seca nas últimas décadas foram utilizados dados do ISV, índice de precipitação, índice de precipitação-evapotranspiração (P-E) dado pela diferença entre os valores de precipitação e evapotranspiração, dados de circulação atmosférica, velocidade vertical e de TSM, analisados a partir de médias anuais e sazonais. As análises foram realizadas para o período entre 1981 e 2016. A região de estudo limita-se ao território brasileiro.

3.1 Índices de Vegetação

Os produtos do ISV têm origem nos dados dos sensores AVHRR e VIIRS. A série temporal do AVHRR possui 35 anos (1981 - 2016) de dados e a série temporal do VIIRS 7 anos (2012 - presente) de dados. Ambos os sensores estão a bordo de satélites de órbita polar com resolução temporal diária. A resolução espacial dos dados obtidos através do AVHRR é de 1.09Km (no nadir) e do VIIRS é de 357m (no nadir). Esses sensores coletam dados de reflectância nos canais do visível (vermelho, 0.58 μm - 0.68 μm), infravermelho próximo (0.71 μm -1.1 μm) e de emissão no canal do infravermelho térmico (10.3 μm - 11.3 μm). Os produtos utilizados para o cálculo do índice de vegetação são resultados do processamentos dos dados de reflectância obtidos através desses sensores (AVHHR e VIIRS) onde os dados das médias diárias são compilados em médias semanais para que seja filtrado o efeito de contribuição das nuvens. A resolução espacial do dados também é resultado do processamento onde a resolução final do ISV é uma projeção de 16km dos dados originais de 1.09km ou 357m. Portanto, os dados do ISV utilizados neste trabalho estão disponibilizados no endereço eletrônico https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/index.php, nas resoluções espacial de 16km e resolução temporal semanal.

O índice utiliza o método conhecido como Método de Saúde da Vegetação (em inglês Vegetation Health method, VH) que é baseado nas propriedades da vegetação em refletir a luz solar e emitir a radiação solar absorvida no espectro do infravermelho próximo. A vegetação saudável é verde e robusta sendo essas características identificadas através dos valores de reflectância no VIS e IVP. A partir dessas informações é calculado a razão entre esses dois canais, esta razão representa o IVDN. Para a vegetação saudável o IVDN é alto. No canal do IV térmico, quando a vegetação está em boas condições, os valores de TB são baixos indicando vegetação mais fria. O oposto ocorre em anos de seca onde o IVDN tem valores mais baixos - pois a vegetação contém menos água e produz menos clorofila - e a TB é mais alta.

Essas variações nos valores de reflectância do VIS e IVP são medidos pelo ICV que é baseado no IVDN. O ICV quantifica o desvio do IVDN atual do valor máximo da série temporal de IVDN. O ICV indica a deterioração da vegetação devido ao estresse hídrico. Por outro lado, os valores da temperatura de brilho são utilizados para calcular o ICT, que quantifica o estresse térmico da vegetação ao indicar a variação da temperatura de brilho atual em relação ao valor máximo da série temporal.

O ISV é a combinação dos dois índices (ICT e ICV), incluindo as condições temperatura e de estresse da vegetação derivadas do ICT e ICV, caracterizando, assim, a saúde da vegetação.

Essa relação entre os valores de TB e IVDN e as condições da vegetação é estabelecida a partir das seguintes equações:

$$ICV = 100\frac{sIVDN - sIVDNmin}{sIVDNmax - sIVDNmin} \tag{3.1}$$

$$ICT = 100\frac{sTB - sTBmax}{sTBmax - sTBmin} \tag{3.2}$$

$$ISV = \alpha \times ICV + (1 - \alpha) \times ICT \tag{3.3}$$

Onde o prefixo s indica que são os valores de IVDN e TB da série temporal, o subscrito min. e max. indicam que são os máximos e mínimos absolutos da série temporal em que os ruídos de alta frequência foram filtrados, α é o coeficiente que quantifica a contribuição do ICT e ICV para o ISV, e é, portanto, a média ponderada dos dois. Quando essa contribuição não é conhecida para uma localização específica é adotado a definição padrão do ISV onde $\alpha = 0{,}5$ (RAHMAN et al., 2009). Os dados de ISV utilizados estão disponíveis já com o índice calculado onde o coeficiente de contribuição é determinado para as diferentes regiões do planeta levando em consideração o tipo de vegetação local.

Todos os três índices variam entre 0 e 100. Para o ISV os valores próximos à zero indicam que a vegetação está sob estresse, e próximos a 100 em ótimas condições.

A comparação dos índices com a produtividade da safra de algumas culturas em países ao redor do mundo mostrou que a partir do valor de 40 do ISV, em ordem decrescente, o rendimento da plantação começa a diminuir resultando em produtivi-

dade abaixo da média (KOGAN; GUO, 2016). Assim, foi definido que o valor de ISV igual a 40 é o indicador de início de condições de seca (KOGAN; ZHU, 2001).

3.2 Precipitação

Os dados de precipitação utilizados são do conjunto de dados do Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) disponibilizados no endereço eletrônico https://platform.princetonclimate.com/PCA_Platform/index.html. O MSWEP é um conjunto de dado histórico global com cobertura temporal desde 1979 até o presente (2019), e resolução temporal de 3 horas, sendo também disponibilizado através de médias mensais. A resolução espacial é de 0.1º x 0.1º de latitude e longitude, cobrindo todo o globo, incluindo áreas oceânicas. O MSWEP combina um amplo conjuntos de dados de satélite, dados de pluviomêtros e dados de reanálise para fornecer estimativas de precipitação para todo o globo, fatores que o tornam um dado robusto e confiável para caracterizar a precipitação a nível global (BECK et al., 2017).

Os dados que foram utilizados no trabalho para composição do Índice Padronizado de Precipitação (IPP) (MCKEE et al., 1993) e demais análises da precipitação - como confecção de mapas da porcentagem de área afetada pelo deficit de chuva e comparação com os dados de saúde da vegetação, apresentam resolução espacial de 0.1º x 0.1º, resolução temporal mensal e foram utilizados a partir do ano de 1981.

3.3 Diferença entre precipitação e evapotranspiração

Os dados de diferença Precipitação e Evapotranspiração (P-E) utilizados no trabalho são do conjunto de dados de reanálise do ERA-Interim fornecidos pelo Centro Europeu de Previsão de Tempo de Médio Prazo (em inglês, European Centre for Medium-Range Weather Forecast, ECMWF) (DEE et al., 2014). Estes dados foram escolhidos por apresentarem a facilidade de serem previamente calculadas as diferenças entre precipitação e evapotranspiração.

O conjunto de dados de reanálise do ERA-Interim é amplamente conhecido e utilizado em pesquisas climáticas. Estes dados estão disponíveis na resolução espacial de 0.75º x 0.75º e resolução temporal mensal. Os dados utilizados abrangem o período de janeiro de 1981 a dezembro de 2016. Esses dados foram utilizados para a confecção de mapas das médias trimestrais e anuais de P-E assim como no cálculo do Índice Padronizado de Precipitação menos Evapotranspiração (IPPE) com a escala temporal para 3 e 12 meses (VICENTE-SERRANO et al., 2010).

3.4 Circulação atmosférica (850mb e 200mb)

Os dados de circulação utilizados foram os do Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) que faz parte da terceira geração de dados de reanálise do National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) (SAHA et al., 2014). O sistema inclui acoplamento entre oceano e atmosfera.

O período de abrangência dos dados é de 1979 até o presente, com domínio global, resolução espacial de 0.5º x 0.5º. A resolução temporal utilizada foi mensal. Uma das vantagens da utilização desse conjunto de dado encontra-se na base de dados utilizado como entrada para composição das séries, que inclui radiância de satélite, precipitação, radiossonda, dados de superfície e outros.

3.5 Temperatura da Superfície do Mar (TSM)

Para a análise da temperatura da superfície do mar (TSM), foram utilizados os dados da série Reynolds SST Versão 2 (REYNOLDS et al., 2007). Estes dados são resultantes da união de dois produtos de alta resolução que foram interpolados utilizando o algoritmo de dados de interpolação ótima (OI). Um dos produtos é a TSM proveniente do AVHRR e o outro é uma combinação dos dados do AVHRR com o Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMRS) acoplado no satélite NASA Earth Observing System. Em todos os dois produtos são utilizados dados de superfície, de bóias e de navios, sendo ainda aplicado um ajuste de grande escala do viés do satélite em relação ao dados in situ. O dado é global com resolução espacial de 0.25º x 0.25º, e resolução temporal mensal. Estão disponíveis dados mensais de 12/1981 até 04/2019, médias mensais e anomalias.

3.6 Velocidade vertical (Omega)

Como complemento às análises de circulação e anomalias de circulação foram utilizados dados de velocidade vertical (omega) para investigar os movimentos verticais da atmosfera. Os dados de omega utilizados também foram os da reanálise do ERA-Interim disponibilizados pelo Centro Europeu de Previsão de Tempo de Médio Prazo (em inglês, European Centre for Medium-Range Weather Forecast, ECMWF) (DEE et al., 2014). Os dados estão disponíveis em médias mensais para os níveis de pressão de 1000mb a 1mb. Os níveis utilizados no trabalho foram de 1000mb até 200mb. A resolução espacial é de 0.75º x 0.75º e as médias mensais estão disponíveis desde 01/1979. O período utilizado nas análises de omega e anomalia de omega foi de de-

zembro de 2007 a fevereiro de 2016, as anomalias foram feitas em relação ao período de 1981 a 2016.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada para a realização do trabalho consistiu em analisar a dimensão espacial e temporal das secas através do ISV, IPP e do IPPE e na sequência analisar os compostos de circulação atmosférica, velocidade vertical (omega) e TSM para períodos anuais ou trimestrais específicos identificados com expansão de áreas de seca.

As próximas seções irão tratar de como foram os processos adotados para a aplicação dessa metodologia. As análises foram realizados na seguinte ordem: tratamento e processamento dos dados de ISV, cálculo dos índices IPP e IPPE, análises estatística de tendência linear aplicada em cada índice, assim como a identificação dos períodos representativos de área do território nacional sob condições de seca para a construção dos compostos de TSM, circulação e velocidade vertical (omega).

4.1 Pré-processamento do ISV

Os dados do ISV encontravam-se originalmente na resolução temporal semanal, contabilizando, assim, 52 semanas para cada ano. Inicialmente para a produção de uma série de dados mensais do ISV, para o período 1981-2016, os dados de 4 a 5 semanas (dependendo do número de dias de cada mês), foram agrupados através do cálculo do valor médio para essas semanas. Na sequência, foram calculadas as médias mensais e anuais, e também foram computadas as médias sazonais para os trimestres DJF - Verão, MAM - Outono, JJA - Inverno e SON - Primavera.

Os anos que apresentaram falta de dados para todas, ou ao menos uma semana do ano foram removidos da análise temporal anual, e apenas os trimestres que apresentaram todas as semanas para completar os períodos sazonais foram utilizados. Ou seja, se em determinado ano, ou trimestre, o dado apresentasse pelo menos uma semana faltante todo o ano ou trimestre foi removido da análise. Os anos removidos da análise anual foram: 1981, 1984, 1985, 1994 e 2004.

Para as médias anuais e sazonais foi calculado a frequência relativa de pixeis sob o território brasileiro que apresentam ISV abaixo do valor de 40. O limiar de ISV igual à 40 tem sido frequentemente utilizado em estudo de eventos de secas por todo o mundo (KOGAN, 1997; COVELE, 2011; PANISSET, 2015; BOKUSHEVA et al., 2016; BRITO et al., 2017). Esse procedimento foi realizado utilizando-se os dados sobre o território brasileiro onde contabilizou-se o número total de pixeis sobre o Brasil e o número de pixeis com ISV menor do que 40. Com os dois resultados foi então

calculada a razão entre o número de pixeis de ISV inferior a 40 e o número total de pixeis sobre o Brasil. O resultado final é um número decimal entre 0 e 1, onde 0 indica que nenhuma área teria sido atingida pela seca naquele ano ou trimestre e 1 indica que toda área teria sido atingida. Esses cálculos foram utilizados para as médias trimestrais e anuais, obtendo assim uma série temporal da fração (ou porcentagem) de área do território brasileiro atingida por secas, seguindo o limiar do ISV, a cada ano e a cada trimestre.

4.2 Índice Padronizado de Precipitação (IPP) e Índice Padronizado de Precipitação menos Evapotranspiração (IPPE)

Para a análise dos dados de precipitação e precipitação menos evapotranspiração (P-E), através de seus respectivos índices padronizados, foram inicialmente calculadas as séries temporais com as médias anuais e trimestrais dessas duas grandezas para cada ano. A partir dessas médias foram calculados os Índices padronizados de cada grandeza (precipitação e P-E).

O Índice Padronizado de Precipitação é um índice de monitoramento de intensidade de eventos seca e de excesso de precipitação em diferentes escalas temporais que permite a comparação das condições climáticas de diferentes regiões. O índice é baseado no ajuste dos dados de precipitação através da distribuição Gama, sendo na sequência mapeado os percentis correspondentes à cada valor de precipitação em uma distribuição gaussiana (Normal) com média zero e desvio padrão igual à um (MCKEE et al., 1993). Valores negativos correspondem à deficit de precipitação e, em algumas circunstâncias, condições de seca, enquanto que valores positivos à excesso de precipitação. O IPP pode ser calculado para diferentes escalas temporais, como a escala mensal, IPP-1, trimestral, IPP-3, anual, IPP-12 e outras. O IPPE foi calculado para as escalas trimestral, IPP-3 e anual, IPP-12. Na Tabela 4.1 são apresentados os valores de IPP e suas classificações quanto à intensidade, seja de condições de deficit ou excesso de umidade.

Assim como o IPP, o Índice Padronizado de Precipitação menos Evapotranspiração (IPPE), também é utilizado no monitoramento de secas, porém a variável utilizada, precipitação menos evapotranspiração permite quantificar de forma agregada o impacto da umidade associada à precipitação com o efeito da evapotranspiração associada à temperatura nas condições dos eventos de seca. De forma análoga ao IPP, o IPPE é um índice baseado no ajuste dos dados de P-E, porém através da distribuição log-logística, sendo na sequência mapeados os percentis correspondentes a cada valor de P-E em uma distribuição gaussiana (Normal) com média zero e

desvio padrão igual à um (VICENTE-SERRANO et al., 2010). As escalas e categorias de classificação dos eventos de seca ou de excesso de umidade do IPPE são as mesmas do IPP apresentadas na Tabela 4.1. O IPPE foi calculado para as escalas trimestral, IPPE-3 e anual, IPPE-12.

A escolha do IPP e IPPE deve-se ao fato de ambos serem índices amplamente utilizados no monitoramento de eventos de seca e por apresentarem potencial para validar as informações sobre a evolução temporal das áreas sob condições de seca no Brasil obtidas através do ISV. Uma vez que o ISV é um índice composto de duas componentes, umidade e temperatura de brilho, utilizando o IPP auxilia na avaliação da componente de umidade do ISV, enquanto que com a utilização do IPPE tem-se uma avaliação das duas componentes do ISV (umidade e temperatura, através da evapotranspiração).

Um procedimento semelhante ao aplicado ao ISV para a determinação da fração do território brasileiro sob condições de seca foi aplicado aos dados de precipitação e P-E. Esse procedimento consistiu em determinar os valores de precipitação e P-E correspondentes aos percentis associados ao valor de ISV igual à 40 em cada pixel, dentro da área do Brasil, através do uso da distribuição gama e log-logística. Em seguida, esses valores correspondentes ao ISV igual à 40 foram utilizados como limiares para a determinação da fração do território nacional sob condições de seca, da mesma forma como descrito na seção anterior (4.1) para o ISV. Para determinar a qual nível de severidade essa abordagem corresponde, calculou-se ainda a a fração do território nacional com valores de IPP e IPPE abaixo de limiares pré-definidos. As análises realizadas indicaram que o limiar de IPP e IPPE próximo à -1 reproduziram condições semelhantes às da abordagem da identificação do valor correspondente de fração de área associado ao valor de ISV igual à 40, sugerindo dessa forma que a abordagem utilizada corresponde ao nível moderado de seca, assim como indicado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Categoria e classificação do IPP e IPPE.

Classificação do IPP e IPPE	
Valor do índice	**Categoria**
>2.00	Extremamente Úmido
1.50 a 1.99	Severamente Úmido
1.00 a 1.49	Moderadamente Úmido
-0.99 a 0.99	Condições Normais
-1.00 a -1.49	Moderadamente Seco
-1.50 a -1.99	Severamente Seco
<-2.00	Extremamente Seco

Fonte: Adaptado de McKee, et al. (1993)

4.3 Definição de períodos decenais

A partir dos cálculos da fração da área do território nacional sob condições de seca através dos limiares de ISV, precipitação, P-E, IPP e IPPE foram obtidos série temporais de aproximadamente 30 anos da fração de área sob condições de seca para cada ano e para cada trimestre. Assim, em função da disponibilidade dos dados obteve-se uma série anual de fração de área de 29 anos, de 32 anos para DJF, de 34 anos para MAM, de 34 anos para JJA e de 35 anos para SON. Esses períodos foram, no entanto, divididos em períodos de aproximadamente uma década cada, seguindo a análise das séries temporais de fração de área sob condições de seca que revelou os possíveis inícios e fins de períodos de expansão de área afetada por estresse de vegetação. Essa abordagem teve como objetivo estudar a evolução da expansão espacial da área do território nacional sob condições de seca nas últimas três décadas.

A Tabela 4.2 apresenta todas os períodos das séries temporais completas e decompostas.

Para cada um desses períodos, incluindo todas as séries temporais anuais e trimestrais, foram elaborados mapas dos índices assim como da anomalia de ISV, e comparados entre si com objetivo de observar possíveis semelhanças entre os padrões espaciais e as séries referentes à cada valor de porcentagem de área abaixo do limiar característico de cada índice.

Tabela 4.2 - Períodos anuais e aproximadamente decenais utilizados nas análises.

PERÍODOS	ANO	DJF	MAM	JJA	SON
∼30 anos	1982 - 2015	1982 - 2016	1982 - 2016	1982 - 2016	1981 - 2016
1º Década	1982 - 1993	1982 - 1993	1982 - 1993	1982 - 1993	1981 - 1993
2º Década	1994 - 2007	1994 - 2007	1994 - 2007	1994 - 2007	1994 - 2007
3º Década	2008 - 2015	2008 - 2016	2008 - 2016	2008 - 2016	2008 - 2016

4.4 Análise das séries temporais

As séries temporais das frações de área do território nacional sob condições de seca, antes e após serem decompostas em períodos decenais, foram submetidas à análises estatísticas a fim de extrair informações sobre a significância estatística de possíveis tendências lineares. A seguir será apresentado cada estatística utilizada na análise de cada série temporal, anual ou trimestral (para os quatro trimestres).

4.4.1 Análise de tendência através de regressão linear

A análise de regressão linear é utilizada para estudar a relação entre uma variável chamada variável resposta e outra variável chamada variável explicativa.

Essa relação é representada pelo modelo de regressão linear que pode ser descrito pela equação:

$$y = \alpha + \beta x + \epsilon \tag{4.1}$$

Onde:

y: é a variável resposta, neste trabalho, a frequência relativa (ou fração) da área atingida por estresse seja de umidade ou vegetativo;

x: é a variável explicativa, no trabalho, os anos do estudo, desde 1981 a 2016, ou subperíodos para as análises decenais;

α: é um parâmetro da reta a ser estimado que representa o intercepto, ou seja, o ponto onde a reta intercepta o eixo das ordenadas;

β: é o coeficiente angular reta, um parâmetro que representa a taxa de variação da variável resposta y em relação à variável explicativa x;

ϵ: é o erro estocástico associado que representa quantitativamente todas as influên-

cias que interferem no comportamento da variável y e que não são explicadas linearmente pelo comportamento de x.

Os parâmetros α e β foram estimados através do método dos mínimos quadrados.

A partir dessas informações pode-se analisar o comportamento da variável y representativa da fração do território nacional sob condições de seca ao longo dos anos x através do ajuste da reta de regressão.

Ao ajustar uma reta de regressão linear à uma série temporal de dados pode-se investigar a existência de tendência linear, negativa, positiva ou ausência de tendência. Este ajuste auxilia quantificar a força da relação entre as variáveis x e y. O coeficiente angular da reta (β) indicará se há alguma tendência positiva ou negativa, sendo o valor positivo ($\beta > 0$) indicativo de tendência positiva, e o valor negativo ($\beta < 0$) indicativo de tendência negativa.

Foi aplicada a equação 4.1 às séries temporais de fração de área atingida por seca e construído gráficos exibindo as retas ajustadas aos dados e o valor dos coeficientes angular, representado pelo símbolo β.

4.4.2 Coeficiente de determinação

O coeficiente de determinação (r^2) é utilizado para determinar a porcentagem da variação de y que pode ser explicado pela variação em x (DOWNING et al., 2010).

Algumas características do coeficiente:

- Se $r^2 = 1$, toda variabilidade de y é explicada pela variável x;
- Se $r^2 = 0$, nenhuma porção da variabilidade de y é explicada pela variável x;
- $0 \leq r^2 \leq 1$.

O coeficiente de determinação (r^2) foi calculado para cada série temporal representativa da fração do território nacional sob condições de seca. Quando o valor de r^2 é próximo à 1 significa que a variação dos valores de fração de área afetada por estresse vegetativo ou de umidade podia ser compreendido pela variabilidade dos anos. Nos gráficos dos ajustes, apresentados no capítulo 5, o valor do coeficiente de determinação está representado por $\mathbf{r}^2$.

4.4.3 Teste de Hipóteses

Foi realizado também o teste de hipóteses para confirmar ou não a existência de tendência linear nas séries temporais de fração do território nacional sob condições de seca.

O teste de hipóteses consiste em uma análise estatística na qual uma decisão deve ser tomada a favor de uma hipótese em detrimento de outra através de um teste estatístico (DOWNING et al., 2010). Esse teste resulta em um valor de probabilidade calculado a partir dos dados analisados.

Para realizar o teste de hipóteses são necessárias algumas definições:

Hipótese nula ($\mathbf{H}_0$): é a hipótese que será testada, sendo portanto a hipótese que interessa ao estudo.

Hipótese alternativa ($\mathbf{H}_*$): hipótese contrária à hipótese nula que afirma "a hipótese nula é falsa".

Neste trabalho foram assumidas duas hipóteses:

$\mathbf{H}_0$: O coeficiente angular da reta de regressão (β) é zero, ou seja, a série temporal não apresenta tendência linear alguma, $\beta = 0$.

$\mathbf{H}_*$: O coeficiente angular (β) é diferente de zero, portanto, a série temporal apresenta alguma tendência linear, $\beta \neq 0$.

Entretanto, ao adotar-se as hipóteses que serão testadas, há a possibilidade que a decisão aceita seja errada. Ou seja, é possível que se rejeite a hipótese nula quando ela é, de fato, verdadeira, ou que não rejeite-a quando ela é, de fato, falsa.

O risco de cometer um desses dois erros pode ser quantificado, e é chamado de nível de **significância do teste**. Em geral o teste de hipóteses é planejado de forma a adotar um risco de cometer um desses erros à um nível de significância pré-definido, por exemplo, de 1%, para testes que exigem maior rigor, 5% ou 10% para testes mais flexíveis.

Isso significa que ao estabelecer o nível de significância desejado num teste assume-se que ao realizar o teste obteremos um valor de probabilidade que determinará, baseado no nível de significância, se a hipótese nula pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa, ou não. À essa probabilidade dá-se o nome de **valor p**. Quanto

menor for o valor p em relação ao nível de significância, mais rigoroso é o teste, ou seja, menor a probabilidade de cometer os erros descritos acima.

No presente trabalho, utilizou-se do teste de hipóteses para analisar o comportamento da evolução temporal das áreas atingidas pela seca. Os testes foram realizados para todas as estimativas de fração do território nacional sob condições de seca, assim como para cada período analisado (anual e trimestral). Os níveis de significância adotados foram de 5% e 10%. Os valores p de cada série temporal estará exibido no canto superior direito de cada gráfico, de modo que sendo esse valor menor do que 5% ou 10% foi possível rejeitar a hipótese nula de não existência de tendência linear em favor da hipótese alternativa de existência linear nas séries temporais analisadas.

4.5 Compostos

Uma vez identificado o período trimestral e a década que apresentou as mais importantes tendências lineares da fração do território nacional sob condições de seca foram construídos compostos das anomalias de TSM (dados pelas médias dos compostos de TSM). A similaridade dos padrões de anomalias positivas ou negativas de TSM na região equatorial do Pacífico determinou os anos selecionados para a construção dos compostos. A sequência de anos apresentando anomalias positiva (ou negativas) no Pacífico equatorial foi utilizada para definir um conjunto de dados para a construção do composto. Ou seja, dois ou mais anos em sequência apresentando o mesmo sinal de anomalia na região do Pacífico equatorial foram utilizados para definir um composto.

Dessa forma, foram determinados os períodos compostos a serem analisados seguindo a continuidade de um padrão encontrado nas anomalias de TSM para a região do Pacífico equatorial. As análises das séries temporais de fração do território nacional sob condições de seca indicaram que a última década do Verão (DJF) apresentou as mais importantes tendências lineares (ver capítulo 5).

Assim, aplicando o critério descrito acima foram formados três compostos para a última década a partir dos seguintes períodos:

1º período: DJF 2007/08 - 2008/09 (predomínio de anomalias negativas no Pacífico equatorial)

2º período: DJF 2010/11 - 2013/14 (predomínio de anomalias negativas no Pacífico equatorial)

3º período: DJF 2014/15 - 2015/16 (predomínio de anomalias positivas no Pacífico equatorial)

O período DJF 2009/10 foi analisado separadamente de todos os outros pois o padrão de TSM encontrado não condiz com nenhum dos dois períodos anterior e posterior à este.

Esses compostos foram utilizados em todas as análises para os períodos escolhidos, seja essas análises dos índices de vegetação ou de umidade (ISV, IPP e IPPE) ou nas análises de TSM, circulação da atmosfera e omega.

4.6 Circulação, TSM e Velocidade vertical (Omega)

Para complementar as análises dos índices de vegetação, precipitação e P-E (ISV, IPP e IPPE, respectivamente) foram produzidos compostos de TSM e circulação atmosférica, assim como de omega e de anomalias de omega para os três períodos do verão (DJF) da última década listados na seção anterior (seção 4.5). Esses compostos foram construídos a partir de médias trimestrais para o trimestre DJF.

Os compostos de TSM tem domínio global e, a partir das médias trimestrais para cada ano do período de estudo, com foco no último período decenal de DJF, foram analisadas as anomalias das temperaturas oceânicas principalmente na região do Pacífico equatorial. Os padrões de anomalias para aquela região foram utilizado como critério para a determinação dos compostos, porém também foi analisado a influência das anomalias de TSM do oceano Atlântico nas áreas afetadas por estresse de vegetação associado à secas no Brasil.

As análises da anomalia de circulação atmosférica foram feitas a partir dos compostos de vento nos níveis de 850mb e 200mb para os períodos determinados na seção anterior. As análises do vento nesses dois níveis escolhidos permitiram observar os padrões de circulação predominante nos baixos (850mb) e altos (200mb) níveis atmosféricos e assim inferir sobre a circulação geral da atmosfera nos períodos analisados.

As anomalias de circulação foram utilizadas para investigar os padrões atmosféricos predominantes a nível global. Ou seja, o objetivo consistiu em observar qual era o padrão climático das anomalias de circulação prevalente nos anos escolhidos para cada composto e como, a partir de uma escala global, a circulação regional (para a América do Sul) poderia ter sofrido alguma variabilidade que influenciasse nos índices analisados. Para a análise em escala regional com foco na América do Sul

e Brasil foram criados compostos de circulação para os mesmo níveis atmosféricos anteriores (850mb e 200mb).

Por fim, foram feitos compostos de omega assim como da anomalia de omega para determinadas regiões com o objetivo de analisar o movimento vertical da atmosfera e compará-lo com os padrões de circulação atmosférica encontrados, assim como os padrões espaciais de estresse de vegetação e estresse hídrico identificado nos índices utilizados.

As análises para esses compostos foram produzidas a partir de cortes verticais feitos em regiões que apresentaram estresse de vegetação ou estresse de umidade observados nos mapas de ISV, IPP, IPPE e anomalia de ISV. Ou seja, naquelas regiões onde, em todos esses mapas, ou pelo menos na maioria deles, houvesse índices abaixo do limiar de 40 (ISV) ou índices negativos (IPP, IPPE e anomalia de ISV) que indicasse estresse de vegetação foi escolhido uma latitude e longitude e feito um corte vertical que abrangesse os níveis superficiais da atmosfera (1000mb) até as camadas mais altas da troposfera (200mb). A escolha das regiões onde analisar os compostos de omega e anomalias de omega foi definida para cada composto de acordo com o padrão espacial de estresse de vegetação/umidade apresentado em cada composto.

As seções verticais com seus respectivos pontos e compostos são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Regiões (latitude vs longitude) das seções verticais para os compostos de omega e anomalia e omega.

COMPOSTOS	Seções verticais longitudinais	Seções verticais latitudinais
2007/08 - 2008/09	53ºW e 41ºW	30ºS e 10ºS
2009/10	48ºW e 41ºW	15ºS e 8ºS
2010/11 - 2013/14	48ºW e 40ºW	21ºS e 10ºS
2014/15 - 2015/16	53ºW e 41ºW	19ºS e 9ºS

5 RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados das análises das séries temporais anuais e trimestrais da fração do território nacional sob condições de seca utilizando-se os dados de ISV, precipitação, IPP, P-E e IPPE, para todo período de estudo (1981 - 2016) e para cada período decenal definido. Posteriormente são apresentadas as análises das anomalias de TSM, anomalias de circulação seguidas das análises dos campos de omega e anomalias de omega para os períodos compostos definidos na seção 4.5.

5.1 Caracterização das séries temporais de fração do território nacional sob condições de seca

Nesta seção são apresentadas as características das séries temporais das frações do território nacional sob condições de seca utilizados no trabalho, para cada período. As análises serão abordadas de acordo com: i) séries temporais anuais e ii) séries temporais trimestrais, começando sempre do ISV, seguido dos índices calculados utilizando-se precipitação,IPP, P-E e finalmente IPPE.

5.1.1 Séries temporais anuais

A Figura 5.1a apresenta a série temporal anual da fração de área do território nacional com ISV <40. A série apresenta tendência linear positiva ($\beta = 2.31$) e valor p igual a 0,03, sugerindo um aumento das áreas atingidas por condições de estresse da vegetação associada a seca nas últimas três décadas. Ao nível de significância de 5% a tendência linear encontrada é estatisticamente significativa e a hipótese nula de não existência de tendência linear pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa de que exista tendência linear na série temporal analisada.

As Figuras 5.1b, 5.1c e 5.1d apresentam a série anterior (Figura 5.1a) porém agora dividida em períodos decenais. Nota-se que a caraterística de tendência de aumento observado na série completa também é reproduzida nos três períodos decenais analisados.

A Figura 5.1b apresenta a série anual da fração da área com ISV < 40 para o primeiro período decenal (1982 - 1993). A tendência linear da série é positiva ($\beta = 2{,}31$), ou seja, há um aumento da fração de área em condições de seca. O valor p é igual a 0,04, significando que a tendência linear encontrada é estatisticamente significativa ao nível de significância de 5% e, portanto, a hipótese nula de não existência de tendência pode ser rejeitada.

A Figura 5.1c exibe o segundo período decenal (1994 - 2007) da série anual da fração do ISV < 40 e também apresenta tendência linear positiva ($\beta = 2{,}54$) e valor p igual a 0,03, podendo, portanto, ser rejeitada a hipótese nula ao nível de significância de 5%.

O último período decenal (2008 - 2015) da série é mostrado na Figura 5.1d e, assim como as décadas anteriores, apresenta tendência linear positiva ($\beta = 2{,}05$), com valor p igual a 0,09. Sendo assim, ao nível de significância de 10%, a hipótese nula também pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

Figura 5.1 - Fração da área com ISV anual < 40 para o período a) 1982 - 2015, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2015.

A Figura 5.2a apresenta a série temporal do período completo (1982 -2015) da fração de área do território nacional construída a partir do limiar de precipitação anual equivalente ao limiar de 40 do ISV. A série apresenta tendência linear negativa ($\beta =$ -1,42) e valor p igual a 0,17. A hipótese nula não pode ser rejeitada devido ao valor p ser elevado em relação ao níveis de significância de 5% e 10%.

O primeiro período decenal da série é apresentado na Figura 5.2b. A tendência linear

da série é positiva (β = 0,41) e o valor p igual a 0,71 (probabilidade de rejeição da hipótese nula). Esse é um valor elevado de probabilidade de rejeição da hipótese nula, baseado nos níveis de significância adotados no trabalho (5% e 10%) não se deve rejeitar a hipótese nula de não existência de tendência linear nesse caso.

A Figura 5.2c exibe o segundo período decenal (1994 - 2007) dessa mesma série de precipitação e apresenta tendência linear negativa (β = -0,12) com valor p de 0,91. Para esta série, a hipótese nula de não existência de tendência também não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa pois há 91% de probabilidade que a hipótese nula seja de fato verdadeira.

O período decenal de 2008 - 2015 desta série de precipitação é apresentado na Figura 5.2d. A tendência linear da série é positiva (β = 3,50) e o valor p é igual a 0,01, ou seja, ao nível de significância de 1% pode-se rejeitar hipótese nula em favor da hipótese alternativa.

Figura 5.2 - Fração da área com precipitação anual inferior ao limiar de precipitação equivalente ao ISV = 40 para o período a) 1982 - 2015, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2015.

A Figura 5.3a corresponde à série temporal da fração território nacional sob condições de seca empregando-se o limiar de IPP anual < -0.9. A série apresenta tendência linear negativa (β = -1,79) e valor p de 0,08. Ao nível de significância de 10% a hipótese nula de não existência de tendência na série pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.3b apresenta o primeiro período decenal (1982 - 1993). A série apresenta tendência linear positiva (β = 0,41) e valor p de 0,71. Para esse valor p a probabilidade de rejeição da hipótese nula é de 71% e, portanto, a hipótese nula não deve ser rejeitada.

O segundo período decenal (1994 - 2007) desta série temporal é mostrado na Figura 5.3c e apresenta tendência linear negativa (β = -0,32) e valor p de 0,76. Novamente, a hipótese nula de não existência de tendência não pode ser rejeitada pois há uma probabilidade de 76% que seja, de fato, verdadeira.

A Figura 5.3d exibe a série temporal do terceiro período decenal (2008 - 2015) da série do IPP anteriormente mencionada. A tendência linear da série é positiva (β = 2,77) e o valor p igual a 0,03, isso indica que ao nível de significância de 5% a hipótese nula de não existência de tendência pode ser rejeitada a favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.4 apresenta a série temporal anual da fração de área do território nacional sob condições de seca estimados através do limiar de P-E correspondente ao ISV = 40. A série apresenta tendência linear positiva (β = 0,45) e valor p igual a 0,66, ou seja, a tendência linear encontrada não é estatisticamente significativa à níveis de significância razoáveis de 5% e 10% e, portanto, a hipótese nula não pode ser rejeitada.

A Figura 5.4b apresenta a série temporal anual do primeiro período decenal (1982 - 1994) da série anterior. A tendência linear da série é positiva porém com o valor aproximadamente zero (β = 0,01) e valor p próximo de 1 (0,99), sendo assim, a hipótese nula de não existência de tendência na série não deve ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.4c exibe o segundo período decenal (1994 - 2007) da série temporal (Figura 5.4a) apresentada anteriormente. A série apresenta tendência linear positiva (β = 1,77) e valor p de 0,09, ou seja, ao nível de significância de 10% a hipótese nula de não tendência pode ser rejeitada para esse período.

Figura 5.3 - Fração da área com IPP anual < -0.9 para o período a) 1982 - 2015, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2015.

O terceiro e último período decenal (2008 - 2015) da série temporal de P-E (Figura 5.4d) apresenta tendência linear positiva (β = 2,84) e valor p de 0,03. Com esses valores a hipótese nula pode ser rejeitada ao nível de significância de 5% em favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.5a apresenta a série temporal do período anual do território nacional sob condições de seca estimada a partir do limiar de IPPE < -1. A série apresenta valor de tendência linear (β = 0,01) muito próximo à zero e valor p de 0,98. A tendência linear encontrada é virtualmente zero. O alto valor p confirma que a tendência não tem valor estatístico significativo. Sendo assim, a hipótese nula de não existência de tendência linear na série não pode ser rejeitada em favor da hipótese nula.

Os três períodos decenais da série temporal anual da fração do território nacional com IPPE < -1 são apresentados nas Figuras 5.5b, 5.5c e 5.5d, respectivamente.

O primeiro período decenal (1982 - 1993) da série é representado na Figura 5.5b e apresenta tendência linear negativa (β = -0,12) e valor p igual a 0,91. Semelhante à série de P-E para esse mesmo período (Figura 5.4b) a hipótese nula não pode ser

rejeitada devido ao elevado valor p, havendo 91% de probabilidade que a hipótese nula seja de fato verdadeira.

Figura 5.4 - Fração da área com P-E inferior ao limiar de P-E anual equivalente ao ISV = 40 para o período a) 1982 - 2015, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2015.

A Figura 5.5c apresenta a série anual do segundo período decenal (1994 - 2007) da série em questão (Figura 5.5a) e apresenta tendência linear positiva (β = 1,77) e valor p de 0,09. Ao nível de significância de 10% a hipótese nula de não existência de tendência na série pode ser rejeitada. Resultados similares foram obtidos na série de P-E mostrada na Figura 5.4c, para esse mesmo período.

O terceiro período decenal (2008 - 2015) desta série do IPPE é mostrado na Figura 5.5d e apresenta tendência linear positiva (β = 2,71) e valor p igual a 0,04. Dessa forma, ao nível de significância de 5% a hipótese nula de não existência de tendência na série pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

Figura 5.5 - Fração da área com IPPE anual < -1 para o período a) 1982 - 2015, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2015.

5.1.2 Séries temporais trimestrais

As séries temporais trimestrais são analisadas de acordo com cada trimestre do ano na ordem: DJF, MAM, JJA e SON.

- **Séries temporais para DJF**

As séries temporais do trimestre DJF são apresentadas a seguir.

A Figura 5.6a apresenta a série de fração de área do território nacional com ISV <40 para todo o período estudado (1982 - 2016). A série apresenta tendência linear positiva (β = 1,21) e valor p igual a 0,24, ou seja, tem 24% de probabilidade da rejeição da hipótese nula de não existência de tendência linear. De acordo com os níveis de significância adotados nos trabalho (5% e 10%) a hipótese nula não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

As Figuras 5.6b, 5.6c e 5.6d apresentam a mesma série temporal anterior (Figura 5.6a) dividida em três períodos decenais descritos na seção 4.3.

O primeiro período decenal (1982 - 2016) é mostrado na Figura 5.6b e apresenta tendência linear positiva (β = 1,56) e valor p de 0,15. Ao nível de significância de 5% e 10% a hipótese nula não pode ser rejeitada para essa série pois há 15% de probabilidade que a hipótese seja, de fato, verdadeira. Numa análise mais flexível o valor p apresentado pela série é razoável a um nível de significância de 15% e, portanto, a hipótese nula pode ser rejeitada.

A Figura 5.6c apresenta a série temporal do segundo período decenal (1994 - 2007) de fração de área do Brasil com ISV $<$ 40. A série apresenta tendência linear positiva (β = 0,49) e valor p igual a 0,64, ou seja, a probabilidade de rejeição da hipótese nula de não existência de tendência é de 64% e, portanto, a hipótese nula não deve ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.6d apresenta o último período decenal (2008 - 2016) da série da Figura 5.6a e apresenta valor positivo de tendência linear (β = 2,21) e valor p de 0,06. Ao nível de significância de 10% a hipótese nula de não existência de tendência na série pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

A série temporal da fração de área do território nacional construída a partir do limiar de precipitação equivalente ao limiar de ISV = 40 é apresentada na Figura 5.7a para todo o período de estudo (1982 - 2016). A série apresenta valor negativo de tendência linear (β = -1,29) e valor p de 0,21. Para este valor p a probabilidade de rejeição da hipótese nula é de 21% e é superior aos valores adotados para os níveis de significância (5% e 10%). Sendo assim, a hipótese nula de não existência de tendência linear na série não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.7b apresenta a série temporal para o primeiro período decenal (1982 - 1993) da série da Figura 5.7a. A série apresenta tendência linear positiva (β = 0,76) porém com valor p de 0,47, ou seja, a hipótese nula de não existência de tendência linear não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa a um nível de significância razoável devido ao alto valor p.

A Figura 5.7c apresenta o segundo período decenal (1994 - 2007) da série apresentada na Figura 5.7a. A tendência linear da série tem valor negativo (β = -0,43) e o valor p é de 0,68. Assim como a série do período anterior (Figura 5.7b) a hipótese nula não pode ser rejeitada devido ao elevado valor p.

O último período decenal (2008 - 2016) da série de precipitação (Figura 5.7a) é apresentado na Figura 5.7d e tem tendência linear positiva (β = 2,05) com valor

p igual a 0,08. Ou seja, ao nível de significância de 10% a hipótese nula pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

Figura 5.6 - Fração da área com ISV < 40 para o trimestre DJF para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

A Figura 5.8a exibe a série temporal da fração de área do território nacional sob condições de seca estimados a partir do limiar de IPP < -0.8. A série apresenta tendência linear negativa (β = -1,47) e valor p de 0,15. Considerando os níveis de significância adotados no trabalho (5% e 10%) a hipótese nula não deve ser rejeitada em favor da hipótese alternativa. No entanto, considerando uma maior flexibilidade no teste, o valor p de 0,15 é um valor razoável para um teste ao nível de significância de 15% e, assim, a hipótese nula pode ser rejeitada.

A série da Figura 5.8a foi dividida em três período decenais e os resultados de cada período são apresentados nas figuras 5.8b, 5.8c e 5.8d, a seguir.

A Figura 5.8b apresenta o primeiro período decenal (1982 - 1993), a série tem tendência linear positiva ($\beta = 0{,}79$) e o valor p é de 0,45. Assim como o primeiro período da série de precipitação (Figura 5.7b), a hipótese nula não pode ser rejeitada em

favor da hipótese alternativa devido ao elevado valor p.

Figura 5.7 - Fração da área com precipitação inferior ao limiar de precipitação equivalente ao ISV = 40 para o trimestre DJF para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

A Figura 5.8c exibe o segundo período decenal (1994 - 2007) da série de IPP (Figura 5.8a). A série temporal apresenta tendência linear negativa (β = -0,67) e valor p igual a 0,52. Novamente a hipótese nula de não existência de tendência na série não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa pois há 52% de probabilidade que a hipótese nula seja verdadeira.

O terceiro período decenal (2008 - 2016) é apresentado na série temporal da Figura 5.8d e possui tendência linear positiva (β = 1,49) com valor p igual a 0,18. Nesta série, a análise da distribuição dos valores de percentagem (fração de área sob condições de seca) permite notar que o valor do ano de 2010 se destaca como o mais alto valor de porcentagem da série, e estando posicionado no terceiro ano da série evidentemente influenciou o valor p, que, apesar de ser elevado em relação ao níveis de significância adotados no trabalho, é mais baixo em comparação com os demais valores p das séries decenais dos dois períodos anteriores analisados. Entretanto, a

hipótese nula ainda não deve ser rejeitada.

Figura 5.8 - Fração da área com IPP < -0.8 para o trimestre DJF para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

A série temporal da fração de área do território nacional construída a partir do limiar de P-E equivalente ao limiar de 40 do ISV é mostrada na Figura 5.9a. A série apresenta tendência linear negativa (β = -0,27) e valor p igual a 0,79, isso significa que aos níveis de significância de 5% e 10% a hipótese nula não deve ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

O primeiro (1982 - 1993) dos três períodos decenais no qual a série foi dividida é apresentado na série temporal da Figura 5.9b. A série apresenta tendência linear negativa (β = -1,21) e o valor p é de 0,25. Assim, levando em conta, o valor p (probabilidade de rejeição da hipótese nula, 25%) e os níveis de significância adotados (5% e 10%) a hipótese nula não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.9c mostra a série temporal do segundo período decenal (1994 - 2007) da série de P-E (Figura 5.9a). A tendência linear da série é positiva (β = 1,19) e o valor p é igual a 0,26, ou seja, a hipótese nula de não existência de tendência linear nessa

década também não pode ser rejeitada devido ao alto valor p.

A Figura 5.9d apresenta a série temporal do terceiro período decenal (2008 - 2016). A série apresenta tendência linear positiva (β = 4,77) e valor p de 2e-05, valor este muito menor que 0,01. Isso significa que, por o valor p ser tão pequeno, a hipótese nula de não existência de tendência linear pode ser rejeitada ao nível de significância de 1%.

Figura 5.9 - Fração da área com P-E inferior ao limiar de P-E equivalente ao ISV = 40 para o trimestre DJF para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

A Figura 5.10a exibe a série temporal da fração de área do território nacional sob condições de seca empregando-se o limiar de IPPE < -0.8. A série apresenta tendência linear positiva (β = 0,14) e valor p igual a 0,89. Tendo em vista o valor p da série, a hipótese nula não pode ser rejeitada pois há 89% de probabilidade que esta seja, de fato, verdadeira.

Esta série temporal, à semelhança de todas as demais analisadas, também foi dividida em três períodos decenais que são mostrados nas figuras 5.10b, 5.10c e 5.10d.

O primeiro período decenal (1982 - 1993) da série é apresentado na Figura 5.10b e tem tendência linear negativa (β = -1,04) com valor p igual a 0,32. A hipótese nula de não existência de tendência na série não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa pois o valor p é elevado.

A Figura 5.10c apresenta a série temporal do segundo período decenal (1994 - 2007). A série apresenta tendência linear positiva (β = 1,71) e o valor p é de 0,11. Tendo em vista o nível de significância de 15%, é razoável se rejeitar a hipótese nula quando adotado este nível moderado de significância.

A Figura 5.10d exibe o resultado para o último período decenal (2008 - 2016). A tendência linear da série é positiva (β = 5,21) e o valor p é extremamente pequeno, apenas 1e-04. Diante disso, assim como no terceiro período decenal da série temporal de P-E (Figura 5.9d), a hipótese nula pode ser rejeitada ao nível de significância de 1%.

Figura 5.10 - Fração da área com IPPE < - 0.8 para o trimestre DJF para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

Em vista do que foi apresentado, o trimestre DJF teve como principal característica as tendências lineares positivas estatisticamente significativas do último período decenal (2008 -2016) para todos os índices analisados (ISV, precipitação, IPP, P-E e IPPE). Essa característica também é encontrada na série anual onde para todos os parâmetros analisados as tendências foram significativas ao nível de 10% de significância.

- **Séries temporais para MAM**

As séries temporais do trimestre de MAM são apresentadas a seguir.

A Figura 5.11a corresponde à série temporal de todo período de estudo (1982 - 2016) da fração de área do território nacional com ISV < 40. A série apresenta tendência linear de valor positivo ($\beta = 1{,}89$) e valor p igual a 0,07. Esse valor p indica que a hipótese nula de não existência de tendência na série pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa ao nível de significância de 10%.

Semelhantemente às demais séries temporais apresentadas, a série temporal de ISV<40 (Figura 5.11a) também foi submetida à uma divisão de três período de aproximadamente uma década cada que são apresentados a seguir nas figuras 5.11b, 5.11c e 5.11d.

A Figura 5.11b mostra a série temporal do primeiro período decenal (1982 - 1993). A série apresenta tendência linear positiva ($\beta = 2{,}51$) com valor p igual a 0,03. Ao nível de significância de 5% a hipótese nula de não existência de tendência na série pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

O segundo período decenal (1994 - 2007) da série é apresentado na Figura 5.11c. A série exibe valores extremos de tendência linear (β) e valor p. A tendência linear da reta é virtualmente nula ($\beta \sim 0$) enquanto que o valor p é muito próximo à 1, indicando que a probabilidade de que a hipótese de não existência de tendência seja aproximadamente 100% e esta não pode, portanto, ser rejeitada.

A terceira década (2008 - 2016) é apresentada na Figura 5.11d e tem valor positivo de tendência linear ($\beta = 3{,}85$) com valor p igual a 0,01. Esse valor indica que ao nível de significância de 1% a hipótese nula pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

Figura 5.11 - Fração da área com ISV < 40 para o trimestre MAM para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

A Figura 5.12a apresenta a série temporal de fração da área do território nacional construída a partir do limiar de precipitação equivalente ao limiar de 40 do ISV. A série apresenta tendência linear negativa (β = -0.,4) e valor p igual a 0,39 (probabilidade de rejeição da hipótese nula de não existência de tendência linear), portanto a hipótese nula não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

As figuras 5.12b, 5.12c e 5.12d representam cada um dos três períodos decenais no qual a série temporal anterior (Figura 5.12a) foi submetida.

A Figura 5.12b corresponde ao primeiro período decenal (1982 - 1993) da série. A tendência linear apresentada pela série é positiva (β = 0,82) porém o valor p é elevado, 0,44. Isso significa que, aos níveis de significância de 5% e 10% a hipótese nula de não existência de tendência linear na série não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

Na Figura 5.12c é mostrada a série temporal do segundo período decenal (1994 - 2007) e esta apresenta tendência linear negativa (β = -0,29) com valor p igual a 0,77. Novamente, a hipótese nula para esta série não pode ser rejeitada em favor da

hipótese alternativa devido ao elevado valor p.

O terceiro período decenal (2008 - 2016) é apresentado na Figura 5.12d. A série temporal apresenta tendência linear positiva (β = 1,36) e valor p igual a 0,21. A hipótese nula também não pode ser rejeitada nessa série pois o valor p é relativamente alto em relação aos níveis de significância de 5% e 10%.

Figura 5.12 - Fração da área com precipitação inferior ao limiar de precipitação equivalente ao ISV = 40 para o trimestre MAM para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

A Figura 5.13a apresenta a série temporal da fração de área do território nacional sob condições de seca estimada a partir do limiar de IPP < -0.8. A série apresenta valor negativo de tendência linear (β = -0,72) e o valor p é 0,48. A probabilidade de rejeição da hipótese nula de não existência de tendência na série é de 48%, sendo assim, à um nível de significância razoável a hipótese nula não pode ser rejeitada.

A Figura 5.13b corresponde à série temporal do primeiro (1982 - 1993) dos três períodos decenais no qual a série do IPP (Figura 5.13a) foi dividida. A série apresenta tendência linear positiva (β = 0,62) e valor p de 0,55, ou seja, há 55% de probabili-

dade de não rejeição da hipótese nula. Aos níveis de 5% e 10% a hipótese nula não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.13c apresenta a série temporal para o segundo período decenal (1994 - 2007). A série apresenta valor negativo (β = -0,36) e valor p igual a 0,72. Também nesta série, a hipótese nula não pode ser rejeitada pois o valor p é elevado e, portanto, a probabilidade (72%) que a hipótese nula seja, de fato, verdadeira.

Por fim, a Figura 5.13d mostra a série temporal do terceiro período decenal (2008 - 2016). A série apresenta tendência linear positiva (β = 1,03) porém o valor p é de 0,35, ou seja é um valor de p elevado à níveis de significância razoáveis e, portanto, a hipótese nula de não existência de tendência na série não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

Figura 5.13 - Fração da área com IPP < -0.8 para o trimestre MAM para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

A Figura 5.14a exibe a série temporal da fração de área do território nacional construída a partir do limiar de P-E equivalente ao limiar de ISV = 40. A série apresenta tendência linear negativa (β = -0,17) e valor p de 0.87. Ou seja, a hipótese nula de

não existência de tendência na série não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa devido ao elevado valor p. De fato a tendência linear da série é quase inexistente.

Assim como as demais série temporais apresentadas, a série de P-E (Figura 5.14a) foi dividida em três períodos decenais que são apresentados nas figuras 5.14b, 5.14c e 5.14d.

A Figura 5.14b corresponde a série temporal do primeiro período decenal (1982 - 1993). A série apresenta tendência linear positiva (β = 2,57) e valor p igual a 0,03. Ao nível de significância de 5% a hipótese nula de não existência de tendência linear na série pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.14c apresenta o segundo período decenal (1994 - 2007) e tem tendência linear positiva (β = 1,16) com valor p igual a 0,27. A hipótese nula nessa série não pode ser rejeitada pois há 27% de probabilidade que hipótese nula seja, de fato, verdadeira.

A série temporal para o terceiro período decenal (2008 - 2016) é mostrada na Figura 5.14d. A série apresenta tendência positiva (β = 1,03) e valor p igual a 0,34. Considerando o valor p e os níveis de significância de 5% e 10%, a tendência da série não é estatisticamente significativa e, portanto, a hipótese nula não pode ser rejeitada.

A Figura 5.15a apresenta a série temporal da fração de área do território nacional sob condições de seca empregando-se o limiar de IPPE < -1. A série apresenta tendência linear negativa (β = -1,31) e valor p de 0,21, ou seja, a probabilidade de rejeição da hipótese nula é relativamente mais alta em relação aos níveis de significância adotados, dessa forma a hipótese nula não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

As figuras 5.15b, 5.15c e 5.15d correspondem aos três períodos decenais no qual foi dividido a série temporal de IPPE anteriormente analisada (Figura 5.15a).

A Figura 5.15b apresenta a série temporal do primeiro período decenal (1982 - 1993). A série possui tendência linear positiva (β = 0,22) porém o valor p é 0,83 indicando que essa tendência não é estatisticamente significativa e, portanto, a hipótese nula de não existência de tendência na série não pode ser rejeitada. A presença de um valor elevado de fração da área no início da série, ano de 1983, provavelmente, teve expressivo impacto no valor da tendência e, consequentemente, no valor p.

Figura 5.14 - Fração da área com P-E inferior ao limiar de P-E equivalente ao ISV = 40 para o trimestre MAM para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

O segundo período decenal (1994 - 2007) é mostrado na série temporal da Figura 5.15c. A série apresenta tendência linear positiva (β = 2,02) e valor p de 0,07. Ao nível de significância de 10% a hipótese nula pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.15d apresenta a série temporal do terceiro período (2008 - 2016). A série exibe valor positivo de tendência linear (β = 1,05) e valor p de 0,33. Apesar do aparente crescimento dos valores da série ao longo dos anos, a hipótese nula de não existência de tendência na série não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa devido ao elevado valor p.

Em síntese, o trimestre MAM teve, em dois dos três índices analisados, a primeira década com tendências lineares positivas detectáveis. Destaca-se que para a análise do ISV a primeira e a terceira década apresentaram tendências lineares positivas detectáveis. A série do IPPE (Figura 5.15a), assim como a do IPP (Figura 5.13a), foram caracterizadas pela influência dos valores do ano 1983, que pode ter amenizado o efeito da tendência linear positiva na primeira década.

Figura 5.15 - Fração da área com IPPE < -1 para o trimestre MAM para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

- **Séries temporais para JJA**

As séries temporais do trimestre JJA são apresentadas a seguir.

A série temporal da fração de área do território nacional com ISV < 40 é apresentada na Figura 5.16a. A série apresenta tendência linear positiva ($\beta = 2{,}89$) com valor p igual a 0.01. Ou seja, essa tendência tem significância estatística ao nível de significância de 1%, sendo assim a hipótese nula de não existência de tendência linear na série pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

No entanto, essa característica não foi reproduzida nas séries temporais dos períodos decenais que são apresentados nas figuras 5.16b, 5.16c e 5.16d, a seguir.

A Figura 5.16b apresenta o primeiro período decenal (1982 - 1993) da série e esta possui tendência linear positiva ($\beta = 1{,}57$) com valor p igual a 0,15. Ou seja, ao nível de significância de 5% e 10% a hipótese nula não pode ser rejeitada devido ao valor de p ser relativamente alto. Para um teste menos rigoroso, ao nível de significância

de 15% a tendência linear da série pode ser considerada estatisticamente significativa e a hipótese nula pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

A série temporal do segundo período decenal (1994 - 2007) é exibida na Figura 5.16c. A série apresenta tendência linear positiva ($\beta = 0{,}18$) porém muito próxima à zero e o valor p é de 0,86. O alto valor de probabilidade de rejeição da hipótese nula (86%) apresentado pela série concorda com o pequeno valor da tendência linear e, provavelmente, ambos os valores foram influenciados pela presença do valor de fração no ano de 1994, no início da série. Em todo caso, a hipótese nula não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.16d apresenta o terceiro período decenal (2008 - 2016). A série apresenta tendência linear positiva ($\beta = 1{,}43$) e valor p igual a 0,19. Aos níveis de significância adotados no trabalho (5% e 10%) a hipótese nula não pode ser rejeitada pois há 19% de probabilidade que esta seja de fato verdadeira. No entanto, destaca-se nesta série o alto valor de fração de área do ano de 2010 e sua respectiva posição na série que, provavelmente, teve expressiva influência nos resultados encontrados para tendência linear e valor p.

Figura 5.16 - Fração de área com ISV < 40 para o trimestre JJA para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

A Figura 5.17a apresenta a série temporal da fração de área do território nacional construída a partir do limiar de precipitação equivalente ao limiar de 40 do ISV. A série apresenta tendência linear positiva (β = 1,05) e valor p igual a 0,31. Ou seja, a tendência linear encontrada não é estatisticamente significativa à níveis de significância razoáveis, dessa forma, a hipótese nula de não existência de tendência na série não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

As três séries temporais mostradas nas figuras 5.17b, 5.17c e 5.17d correspondem aos três períodos decenais no qual a série da Figura 5.17a foi dividida.

A Figura 5.17b corresponde ao primeiro período decenal (1982 - 1993). A série apresenta valor de tendência linear muito baixo (β = 0,07) porém positivo, o valor p é igual a 0,95. Para estes valores de tendência linear e valor p a hipótese nula não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.17c exibe a série temporal para o segundo período decenal (1994 - 2007). A série apresenta tendência linear negativa (β = -1,48) e valor p igual a 0,17. Aos níveis e significância adotados no trabalho (5% e 10%) a tendência linear dessa série não é estatisticamente significativa e, portanto, a hipótese nula não pode ser rejeitada.

O terceiro período decenal (2008 - 2016) é apresentado na Figura 5.17d. A série apresenta tendência linear negativa (β = -0,45) e valor p de 0,66, isso significa que há 66% de probabilidade de rejeição da hipótese nula e à níveis de significância razoáveis (5% e 10%) esse valor é elevado e, portanto, a hipótese nula não pode ser rejeitada. Os anos 2010, 2011 e 2012 parecem desempenhar papel importante na determinação da tendência linear e, consequentemente, do valor p na série.

A Figura 5.18a apresenta a série temporal da fração de área do território nacional sob condições de seca estimadas a partir do limiar de IPP $<$ -0.9. A série apresenta tendência linear positiva (β = 0,96) e valor p igual 0,35. Assim como a série temporal de precipitação (Figura 5.17a), a tendência linear encontrada não é estatisticamente significativa pois apresenta 35% de probabilidade de rejeição da hipótese nula. Sendo assim, a hipótese nula de não existência de tendência na série não pode ser rejeitada.

Esta série temporal (Figura 5.18a) foi dividida em três períodos decenais que são apresentados nas figuras 5.18b, 5.18c e 5.18d.

Figura 5.17 - Fração da área com precipitação inferior ao limiar de precipitação equivalente ao ISV = 40 para o trimestre JJA para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

A Figura 5.18b apresenta a série temporal do primeiro período decenal (1982 - 1993). A tendência linear da série é negativa (β = -0,11) e tem valor muito pequeno, o valor p é de 0,92. Ou seja, devido ao elevado valor p a hipótese nula não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

O segundo período decenal (1994 - 2007) da série é apresentado na Figura 5.18c. A série possui valor negativo de tendência linear (β = -1,51) e valor p igual a 0,16, valores estes muito próximos aos encontrados no segundo período decenal da série de precipitação (Figura 5.17c). Assim como na série citada, esta série não apresenta tendência linear com significância estatística e, portanto, a hipótese nula não pode ser rejeitada.

A Figura 5.18d exibe a série temporal para o terceiro período decenal (2008 - 2016). A série apresenta tendência linear negativa (β = -0,39) e valor p igual a 0,71, indicando que a probabilidade de rejeição da hipótese nula é elevada (71%) e, portanto, também nessa série a hipótese nula não pode ser rejeitada.

Figura 5.18 - Fração da área com IPP < -0.9 para o trimestre JJA para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

A Figura 5.19a apresenta a série temporal da fração de área do território nacional construída a partir do limiar de P-E equivalente ao ISV = 40. A série apresenta tendência linear negativa (β = -0,24) e valor p igual a 0,81. Ou seja, essa tendência linear não é estatisticamente significativa, de fato 81% é um valor elevado de probabilidade de rejeição da hipótese nula e, portanto, esta não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

As figuras 5.19b, 5.19c e 5.19d exibem séries temporais correspondentes aos três períodos decenais que compõem a série de P-E na Figura 5.19a.

O primeiro período decenal (1982 - 1993) é mostrado na série temporal da Figura 5.19b e apresenta tendência linear positiva (β = 0,14) com valor p igual a 0,89. Novamente, a tendência linear da série não é estatisticamente significativa pois o valor p é elevado, sendo assim, a hipótese nula não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.19c apresenta o segundo período decenal (1994 - 2007) da série e possui valores de tendência linear (β = -0,15) e valor p (0,88) semelhantes aos valores

encontrados na série anterior (Figura 5.19b). A similaridade dos valores estatísticos encontrados nas duas séries enfatiza o comportamento da série do período completo de P-E (Figura 5.19a). Dessa forma, a hipótese nula de não existência de tendência na série não pode ser rejeitada.

A série temporal do terceiro período decenal (2008 - 2016) é apresentada na Figura 5.19d. A série apresenta tendência linear negativa (β = -0,55) e valor p igual a 0,61, ou seja, devido ao elevado valor p a hipótese nula não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa. Tal qual nas duas séries anteriores Figura 5.19b e Figura 5.19c, essa série evidencia o comportamento da série principal (Figura 5.19a).

Figura 5.19 - Fração da área com P-E inferior ao limiar de P-E equivalente ao ISV = 40 para o trimestre JJA para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

A Figura 5.20a exibe a série temporal da fração de área do território nacional sob condições de seca estimada a partir do limiar de IPPE< -0.9. A série apresenta tendência linear positiva (β = 0,09) porém com valor extremamente pequeno, o valor p é de 0,93. Ou seja, a tendência linear encontrada na série não é estatisticamente significativa e este comportamento é um padrão também constatado na série ante-

riormente analisada (Figura 5.19a). Dessa forma, a hipótese nula de não existência de tendência linear na série não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.20b apresenta a série temporal do primeiro período decenal (1982 - 1993). A tendência linear da série é próxima de zero (β = 0,04) porém positiva e o valor p é de 0,97, para um valor p tão elevado a tendência linear encontrada não tem significância estatística e, portanto, a hipótese nula não pode ser rejeitada.

A série temporal do segundo período decenal (1994 - 2007) é apresentada na Figura 5.20c. Os valores de tendência linear (β = -0,04) e valor p (0,97) da série são semelhantes aos da série do período anterior (Figura 5.20b), apenas com a tendência linear sendo negativa. Isso significa que, novamente, a tendência linear encontrada não é estatisticamente significativa e que a hipótese nula não pode ser rejeitada.

O terceiro período decenal (2008 - 2016) é apresentado na Figura 5.20d. A série apresenta tendência linear negativa (β = -0,32) e valor p igual a 0,76, apesar desse valor p encontrado não ser tão elevado quanto aos valores encontrados nas duas séries anteriores, ainda é um valor alto à níveis de significância razoáveis (5% ou 10%) e a hipótese nula também não pode ser rejeitada para essa série.

Figura 5.20 - Fração da área com IPPE < -0.9 para o trimestre JJA para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

Em resumo, o trimestre JJA caracterizou-se pela tendência positiva estatisticamente significativa, quando analisada a série temporal completa do ISV. A análise da série do ISV para a primeira e terceira décadas também identificou essa tendência positiva, porém com significância estatística reduzida. A análise considerando os índices de precipitação identificou tendência negativa durante a segunda década analisada, também com reduzida significância estatística.

- **Séries temporais para SON**

As séries temporais do trimestre SON são apresentadas a seguir.

A Figura 5.21a apresenta a série temporal da fração de área do território nacional com ISV <40. A série tem tendência linear positiva (β = 1,62) com valor p de 0,11, ou seja, a probabilidade de rejeição da hipótese nula é de 11%, valor aceitável ao nível de significância de 15%. Sendo assim, a hipótese nula de não existência de tendência na série pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa, quando adotado este nível moderado de significância.

As Figuras 5.21b, 5.21c e 5.21d correspondem aos períodos decenais no qual a série anterior foi dividida.

A série temporal mostrada na Figura 5.21b apresenta o primeiro período decenal (1982 -1993). A série possui tendência linear positiva (β = 1,54) e valor p igual a 0,15. Aos níveis de significância de 5% e 10% a tendência linear encontrada não é estatisticamente significativa, à um nível de significância mais moderado de 15% a tendência linear pode ser considerada significativa e a hipótese nula pode ser rejeitada.

O segundo período decenal (1994 - 2007) é apresentado na Figura 5.21c e, assim como na série anterior, tem tendência linear positiva (β = 1,41) porém com valor p igual a 0,18. Esse valor p é relativamente alto em relação aos níveis de significância de 5% e 10%, e até mesmo num teste mais moderado com nível de significância de 15%. O valor da fração de área do ano 1995, no início da série, pode ter influenciado o valor p pois em toda série, a partir desse ano, nota-se uma queda seguida de crescimento dos valores de fração de área.

A Figura 5.21d apresenta a série temporal do terceiro período decenal (2008 - 2016). A série apresenta tendência linear positiva (β = 0,79) porém com valor p elevado, de 0,46. O alto valor de probabilidade (46%) de rejeição da hipótese nula indica que

esta pode ser de fato verdadeira e portando não pode rejeitá-la em favor da hipótese alternativa.

Figura 5.21 - Fração da área com ISV < 40 para o trimestre SON para o período a) 1981 - 2016, b) 1981 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

A Figura 5.22a corresponde à série temporal de fração de área do território nacional construída a partir limiar de precipitação equivalente ao limiar de ISV = 40. A série apresenta tendência linear negativa (β = -1,18) e valor p igual a 0,24. Aos níveis de significância adotados de 5% e 10% o valor p é elevado e a hipótese nula não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

Esta série foi dividida em períodos decenais e os resultados são mostrados nas figuras 5.22b, 5.22c e 5.22d.

O primeiro período decenal (1981 - 1993) da série é mostrado na Figura 5.22b. A série possui tendência linear positiva (β = 0,26) e valor p de 0,79, ou seja, devido ao alto valor de p e, consequentemente, a probabilidade (79%) que a hipótese nula seja, de fato, verdadeira, não se pode rejeitá-la em favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.22c corresponde à série temporal do segundo período decenal (1994 - 2007). A série apresenta tendência linear positiva ($\beta = 0{,}32$) porém o valor p é alto, 0,75. A hipótese nula de não existência de tendência na série não pode ser rejeitada pois há 75% de probabilidade de que a hipótese nula seja de fato verdadeira. Nesta série a presença do alto valor de fração do ano 1997 no início da série desempenha papel importante na determinação da tendência linear e do valor p, e portanto, provavelmente, por isso o valor p seja tão elevado.

A Figura 5.22d refere-se à série temporal do terceiro período decenal (2008 - 2016). A série exibe valor positivo de tendência linear ($\beta = 1{,}59$) contudo o valor p é igual a 0,16, ou seja, um valor elevado para os parâmetros dos níveis de significância adotados (5% e 10%). Sendo assim, a hipótese nula não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa nessa série.

Figura 5.22 - Fração da área com precipitação inferior ao limiar de precipitação equivalente ao ISV = 40 para o trimestre SON para o período a) 1981 - 2016, b) 1981 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

A Figura 5.23a apresenta a série temporal da fração de área do território nacional sob condições de seca estimada a partir do limiar de IPP < -0.8. A série apresenta

tendência linear negativa (β = -1,19) e valor p igual a 0,24, valores muito próximos aos valores encontrados na série de precipitação analisada anteriormente (Figura 5.22a). Assim como na série mencionada, a hipótese nula de não existência de tendência na série não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa devido ao elevado valor p.

As Figuras 5.23b, 5.23c e 5.23d representam as três séries temporais correspondentes aos três períodos decenais que compõem a série do IPP apresentada anteriormente (Figura 5.23a).

A Figura 5.23b exibe a série temporal para o primeiro período decenal (1981 - 1993). A série apresenta características semelhantes ao primeiro período da série de precipitação (Figura 5.22b), a tendência linear é positiva (β = 0,34) e o valor p igual a 0,74. A hipótese nula também não pode ser rejeitada nessa série em favor da hipótese alternativa e também nesta série o valor da fração de área do ano 1982 se destaca no início da série.

O segundo período decenal (1994 - 2007) é mostrado na série temporal da Figura 5.23c. A série apresenta tendência linear negativa (β = -0,15) com valor p igual a 0,89, indicando que a tendência linear encontrada não tem significância estatística e, portanto a hipótese nula não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.23d apresenta a série temporal do terceiro período decenal (2008 - 2016). A série apresenta tendência linear de valor positivo (β = 1,44) e valor p igual a 0,19. Apesar do aparente crescimento dos valores de fração de área sob condições de seca ao longo da série, o valor p de 0,19 indica que esse crescimento não é estatisticamente significativo e a hipótese nula de não existência de tendência na série não pode ser rejeitada.

A Figura 5.24a apresenta a série temporal da fração de área do território nacional construída a partir do limiar de P-E equivalente ao ISV = 40. A série exibe tendência linear positiva (β = 1,32) e valor p igual a 0,19. A hipótese nula de não existência de tendência na série não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa pois o valor p encontrado é alto em relação aos níveis de significância de 5% e 10%.

A série temporal de P-E (Figura 5.24a) foi dividida em três períodos decenais que são apresentados nas figuras 5.24b, 5.24c e 5.24d.

Figura 5.23 - Fração da área com IPP < -0.8 para o trimestre SON para o período a) 1981 - 2016, b) 1981 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

A Figura 5.24b apresenta a série temporal para o primeiro período decenal (1981 - 1993). A série apresenta tendência linear negativa (β = -0,43) e valor p de 0,67. Devido ao elevado valor de p, a tendência linear encontrada na série não tem significância estatística e, portanto, a hipótese nula não pode ser rejeitada.

A série temporal do segundo período decenal (1994 - 2007) é mostrada na Figura 5.24c e apresenta tendência linear positiva (β = 2,98) com valor p igual a 0,01. Ao nível de significância de 1% a hipótese nula de não existência de tendência na série pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

A Figura 5.24d apresenta a série temporal para o terceiro período decenal (2008 - 2016). A série apresenta tendência linear positiva (β = 1,39) com valor p de 0,19, valor este que aos níveis de significância de 5% e 10% não é significativo e portanto a hipótese nula não pode ser rejeitada.

A Figura 5.25a apresenta a série temporal da fração de área do território nacional sob condições de seca estimadas a partir do limiar de IPPE < -0.8. A série apresenta tendência linear positiva (β = 1,31) e valor p de 0,21, ambos os valores são próximos

aos valores encontrados na série de P-E (Figura 5.24a). Tendo em vista o elevado valor p, a tendência linear não é estatisticamente significativa e, portando a hipótese nula de não existência de tendência na série não pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

Figura 5.24 - Fração de área com P-E inferior ao limiar de P-E equivalente ao ISV = 40 para o trimestre SON para o período a) 1981 - 2016, b) 1981 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

As figuras 5.25b, 5.25c e 5.25d correspondem aos três períodos decenais no qual a série da figura 5.25a foi dividida.

A Figura 5.25b corresponde à série temporal do primeiro período decenal (1981 - 2016). A série possui tendência linear negativa (β = -1,16) e valor p de 0,27, para esse valor p a tendência linear encontrada não tem significância estatística e a hipótese nula não pode ser rejeitada.

A Figura 5.25c representa o segundo período decenal (1994 - 2007) da série temporal e apresenta tendência linear positiva (β = 2,83), o valor p é de 0,02. Ou seja, a tendência encontrada é estatisticamente significativa ao nível de significância de 5% e, assim, a hipótese nula pode ser rejeitada em favor da hipótese alternativa.

O terceiro período decenal (2008 - 2016) é apresentado na série temporal da Figura 5.25d. A série apresenta tendência linear positiva (β = 1,25) e valor p de 0,25. As características apresentadas por essa série são semelhantes às encontradas no terceiro período decenal da série de P-E (Figura 5.24d), dessa forma, a hipótese nula não pode ser rejeitada.

Figura 5.25 - Fração da área com IPPE < -0.8 para o trimestre SON para o período a) 1981 - 2016, b) 1981 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

Para o trimestre SON a primeira década do ISV foi a que teve maior relevância para toda série sendo identificada com um tendência linear positiva. Para as análises envolvendo os índices que utilizam precipitação, o ano de 1982 na primeira década e o ano 1997 na segunda década foram os pontos marcantes que, provavelmente, influenciaram os valores das tendências linear. As análises baseadas nos índices que utilizaram P-E destacaram notadamente a segunda década com as tendências positivas mais significativas.

5.1.3 Caracterização dos períodos quanto aos valores p e do coeficiente angular

A seguir são apresentado as características mais marcantes e relevantes das análises das séries anuais e trimestrais.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados de cada trimestre e da série anual em termos do coeficiente angular da reta (β) e do valor p para todos os parâmetros analisados na seção anterior.

Foram destacados os períodos decenais e anuais que apresentaram valores p com significância estatística menor que o nível de significância de 20%. Os períodos que tiveram valores p menores que 0,15 estão destacados em negrito preto e os que apresentaram valores p menores que 0,20 estão destacados em negrito vermelho.

Assim, é possível destacar em todas as séries temporais analisadas quais destas apresentam comportamento da tendência linear que indique aumento das áreas sob estresse da vegetação associadas à secas. Ou seja, as séries em que o valor p é menor ou igual a 0,15 ou 0,20 as tendências encontradas tem significância estatística e, portanto, podem indicar aumento das áreas de seca no Brasil.

Analisando os valores apresentados na Tabela 5.1 nota-se que a série anual e a série do trimestre DJF apresentam os últimos períodos decenais (2008 - 2015/16) como o período mais marcado com valores p menores que 0,20 em todos os índices. De fato, com exceção do último período decenal da série do IPP de DJF, todas as demais séries desse período, tanto anual quanto de DJF, tiveram valores p menores que 0,10, ou seja, são estatisticamente significativos ao nível de significância de 10%. Essa característica é observada apenas para as séries anuais e do trimestre DJF, as séries dos demais trimestres não seguem um padrão semelhante ou mesmo padrão algum.

Além disso nota-se que apesar de o verão (DJF) ser a estação chuvosa em maior parte do Brasil (GRIMM, 2009b), na série temporal anual do ISV não é encontrado tendência linear estatisticamente significativa com o valor p sendo igual a 0.24 ((β) = 1.21). Esta característica é observada apenas no índice de vegetação, para o período anual e pode indicar o tempo de resposta da vegetação às condições de estresse de umidade e de temperatura. Segundo Vicente-Serrano et al. (2013) regiões semiáridas e tropicais tendem a ter respostas lentas às condições de estresse, em contraste com as regiões áridas e muito úmidas que a resposta às secas ocorre imediatamente após a

qualquer evento de precipitação. Sendo assim, nota-se que no trimestre posterior ao verão, MAM, a série temporal do ISV é estatisticamente significativa apresentando valor p igual a 0.07 ($(\beta) = 1.89$), porém essa característica novamente ocorre apenas na série do índice de vegetação.

Sendo assim, o trimestre DJF destaca-se entre os demais trimestres apresentando no terceiro período decenal tendências de aumento de área de seca sobre o Brasil, característica esta também notada no terceiro período da série anual. Assim, na próxima seção apresenta-se uma análise mais detalhada das condições de TSM, circulação atmosférica e velocidade vertical (omega) de forma a estabelecer as características climáticas atuantes neste período de estudo (2007/08 - 2015/16) marcado pela tendência de aumento da área de seca sobre o Brasil.

Tabela 5.1 - Coeficientes angular (β) e valores p (em parênteses) das séries temporais anuais e trimestrais de ISV, precipitação, IPP, P-E e IPPE para todos os períodos analisados. Os valores destacados em negrito representam os coeficientes identificados apresentando tendências lineares significativa ao nível de 15% (negrito preto) e 20% (negrito vermelho). Para cada índice a linha superior apresenta o coeficiente angular e o valor p da série anual ou trimestral completa, as três colunas da linha inferior representam os coeficientes angulares e os valores p do índice para cada um dos três períodos decenais.

	ANO			**DJF**			**MAM**			**JJA**			**SON**		
ISV	**2.31 (0.03)**			1.21 (0.24)			**1.89 (0.07)**			**2.89 (0.01)**			**1.62 (0.11)**		
	2.31 (0.04)	**2.54 (0.03)**	**2.05 (0.09)**	**1.56 (0.15)**	0.49 (0.64)	**2.21 (0.06)**	**2.51 (0.03)**	0.01 (0.99)	**3.85 (0.01)**	**1.57 (0.15)**	0.18 (0.86)	**1.43 (0.19)**	**1.54 (0.15)**	**1.41 (0.18)**	0.79 (0.46)
PREC.	**-1.42 (0.17)**			-1.29 (0.21)			-0.84 (0.39)			1.05 (0.31)			-1.18 (0.24)		
	0.41 (0.71)	-0.12 (0.91)	**3.50 (0.01)**	0.76 (0.47)	-0.43 (0.68)	**2.05 (0.08)**	0.82 (0.44)	-0.29 (0.77)	1.36 (0.21)	0.07 (0.95)	**-1.48 (0.17)**	-0.45 (0.66)	0.26 (0.79)	0.32 (0.75)	**1.59 (0.16)**
IPP	**-1.79 (0.08)**			**-1.47 (0.15)**			-0.72 (0.48)			0.96 (0.35)			-1.19 (0.24)		
	0.41 (0.71)	-0.32 (0.76)	**2.77 (0.03)**	0.79 (0.45)	-0.67 (0.52)	**1.49 (0.18)**	0.62 (0.55)	-0.36 (0.72)	1.03 (0.35)	-0.11 (0.92)	**-1.51 (0.16)**	-0.39 (0.71)	0.34 (0.74)	-0.15 (0.89)	**1.44 (0.19)**
P-E	0.45 (0.66)			-0.27 (0.79)			-0.17 (0.87)			-0.24 (0.81)			**1.32 (0.19)**		
	0.01 (0.99)	**1.77 (0.09)**	**2.84 (0.03)**	-1.21 (0.25)	1.19 (0.26)	**4.77 (2e-05)**	**2.57 (0.03)**	1.16 (0.27)	1.03 (0.34)	0.14 (0.89)	-0.15 (0.88)	-0.55 (0.61)	-0.43 (0.67)	**2.98 (0.01)**	**1.39 (0.19)**
IPPE	0.01 (0.99)			0.14 (0.89)			-1.31 (0.21)			0.09 (0.93)			1.31 (0.21)		
	-0.12 (0.91)	**1.77 (0.09)**	**2.71 (0.04)**	-1.04 (0.32)	**1.71 (0.11)**	**5.21 (1e-04)**	0.22 (0.83)	**2.02 (0.07)**	1.05 (0.33)	0.04 (0.97)	-0.04 (0.97)	-0.32 (0.76)	-1.16 (0.27)	**2.89 (0.02)**	1.25 (0.25)

5.2 Análise dos compostos

A seguir apresenta-se as análises dos compostos dos índices de vegetação, precipitação e P-E definidos em função das anomalias de TSM do Pacífico equatorial assim como descrito nas seção 4.5.

5.2.1 Verões (DJF) 2007/08 - 2008/09

A Figura 5.26a mostra o mapa de ISV para o primeiro composto, para os verões (DJF) 2007/08 e 2008/09. As regiões em azul representam as áreas com ISV acima do limiar de 40 e, portanto, em boas condições de saúde da vegetação; as regiões em vermelho corresponde as áreas com ISV menor que 40 e sob condições de estresse da vegetação. Nota-se que parte da região Nordeste e sul da região Sul, assim como o estado do Mato Grosso do Sul apresentam valores de ISV abaixo de 40, ou seja, nestas regiões a vegetação está sob estresse e em condições de seca.

A Figura 5.26b mostra o mapa do composto de IPP onde os índices positivos estão em azul e os negativos em vermelho. A região Sul destaca-se por apresentar índices negativos que indicam deficit de precipitação na área, assim como uma pequena parte da região Centro-Oeste. As demais regiões do país apresentam valores positivos indicando condições normais ou úmidas.

O mapa do composto de IPPE é apresentado na Figura 5.26c e tem mesma classificação dos valores do índice que o IPP. Regiões com índice positivo são apresentadas em azul e índices negativos em vermelho. Os índices negativos indicam que a taxa de evaporação é maior que a de precipitação e, portanto a região experimenta condições de secas, para os índices positivos a taxa de precipitação supera a de evapotranspiração e as condições da região são úmidas. Observa-se na Figura 5.26c que as região Sul novamente se destaca com índices negativos de IPPE indicando deficit de umidade, assim como parte da região Nordeste no estado da Bahia. As demais áreas apresentam índices positivos com condições úmidas ou próximos das condições normais.

A comparação dos três mapas indicadores de condições de seca (deficit) indica que o padrão espacial das regiões sob estresse de vegetação ou de umidade não é exatamente o mesmo em todos os mapas. As áreas de índices negativos na região Sul são mais evidentes nos mapas de IPP e IPPE, enquanto que a região de índices negativos no NEB está mais destacada no mapa de ISV, embora ainda nota-se essas regiões nos demais mapas.

A Figura 5.26d mostra o mapa de anomalia de ISV. Em vermelho são mostradas as anomalias negativas e azul as anomalias positivas. O mapa indica quais regiões do índice de vegetação apresentam condições anômalas de vegetação independentes do limiar de 40. Ou seja, mesmo que em algumas regiões o ISV não tenha atingido o limiar de 40 esta região pode apresentar condições anômalas de saúde da vegetação. Quando as anomalias são negativas as condições de saúde da vegetação estão abaixo das condições climatológicas para aquela região, o contrário ocorre quando as anomalias são positivas indicando que as condições de saúde da vegetação estão acima das condições normais para aquela região.

O mapa da Figura 5.26d mostra as anomalias negativas principalmente nas regiões Sul, parte dos estados do Mato Grosso do Sul e São Paulo além da região central do NEB. Outras regiões apresentam também anomalias negativas porém sem que tenham um padrão espacial definido. As anomalias positivas com padrão definido se concentram na região Norte e parte norte da região Centro-Oeste, assim como acontece com as anomalias negativas há também regiões com anomalias positivas sem padrão definido nas demais regiões do país.

Em vista disso, tem-se que no mapa da anomalias de ISV os padrões espaciais de estresse da vegetação ficam evidente e correspondem com os padrões encontrados nos mapas de IPP e IPPE.

5.2.2 Verão (DJF) 2009/10

O verão DJF 2009/10 não faz parte de nenhum dos compostos e foi analisado separadamente.

A Figura 5.27a apresenta o mapa de ISV para DJF dos anos 2009/10. As áreas em azul representam valores do índice maiores que 40 e em boas condições de saúde da vegetação. Em vermelho destacam-se as áreas sob condições de seca e com valores de ISV abaixo de 40. A região Sul, assim como quase toda região Centro-Oeste apresentam valores de ISV maiores que 40 indicando que a vegetação encontra-se em boas condições. O mesmo ocorre na região Sudeste. A costa leste do NEB e os estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e oeste da Bahia completam uma faixa com ISV acima de 40 e boas condições de vegetação que conecta o Nordeste às regiões do centro e sul do país com as mesmas características. Por fim, a costa sul do NEB e interior da Bahia, assim como parte da região Norte apresenta valores de ISV abaixo de 40 e, portanto, são regiões que estão sob estresse de vegetação associado à secas.

Figura 5.26 - Distribuição espacial dos compostos dos índices para DJF (2007/08 - 2008/09): a) Estresse da saúde da vegetação (vermelho) associado à condições de seca através do ISV, b) Condições de deficit (excesso) de precipitação em vermelho (azul) através do IPP, c) Condições de P-E (IPPE), d) Anomalia de ISV.

O mapa do composto de IPP é apresentado na Figura 5.27b e exibe padrão mais definido das regiões sob deficit ou excesso de precipitação. A região do extremo norte do país, desde oeste da Amazônia até o estado do Rio Grande do Norte, na faixa latitudinal de até aproximadamente 10ºS, os valores de IPP são negativos indicando condições de seca moderada. A região central do país, abrangendo os estados de Tocantins e Goiás, assim como a região sudeste também apresentam condições de estresse hídrico com valores negativos de IPP. A demais regiões do país apresentam índice positivo, ou seja condições de excesso de precipitação.

A Figura 5.27c exibe o mapa do IPPE para DJF de 2009/10. As regiões no mapa do IPPE que apresentam deficit de umidade (taxa de evapotranspiração maior que a taxa de precipitação) se concentram na costa leste do Brasil desde o norte da região Nordeste até próximo de São Paulo. Os valores mais negativos do índice são encontrados próximo a região do sul da Bahia e norte de Minas Gerais. Basicamente, toda região Nordeste e Sudeste, com exceção do estado de São Paulo, encontram-se sob condições de estresse hídrico. Também, na costa Norte do país e a região Sul, exceto o extremo sul do Rio Grande do Sul os valores de IPPE são negativos. A região Norte e praticamente todo Centro-Oeste apresentam valores positivos de IPPE.

O mapa de anomalia de ISV, apresentado na figura 5.27d, destaca as regiões no mapa de ISV sob condições de seca ao apresentar essas regiões com anomalias negativas. O padrões espaciais encontrados evidenciam as regiões na Bahia sob estresse de vegetação, além de mostrar anomalias negativas na região Norte que estão mais marcada nos mapas de IPP e IPPE.

5.2.3 Verões (DJF) 2010/11 - 2013/14

Os resultados das análises do segundo composto para os verões DJF 2010/11 - 2013/14 são apresentados a seguir.

A Figura 5.28a mostra o mapa do composto de ISV onde os valores abaixo de 40 (limiar do início de condições de seca) são indicados em vermelho. A figura apresenta a região Nordeste, parte central, com valores de ISV menores que 40 indicando estresse da vegetação. Também há outras regiões que apresentam condições de estresse porém sem um padrão espacial definido, sendo essas áreas notadas próximo ao Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. As demais regiões do país apresentam valores de ISV mais próximos de 100, principalmente na região Sul.

Figura 5.27 - Distribuição espacial dos compostos dos índices para DJF (2009/10): a) Estresse da saúde da vegetação (vermelho) associado à condições de seca através do ISV, b) Condições de deficit (excesso) de precipitação em vermelho (azul) através do IPP, c) Condições de P-E (IPPE), d) Anomalia de ISV.

A Figura 5.28b mostra o mapa do composto de IPP. A região em vermelho que abrange os estados desde o norte do Nordeste até São Paulo apresenta deficit de

precipitação associado à condições de seca. Nas demais regiões o índice é positivo indicando excesso de precipitação, mas ainda em algumas regiões, como a região Sul os valores estão próximo às condições normais.

A Figura 5.28c mostra o mapa para o composto de IPPE, o padrão espacial das regiões com índices negativos (vermelho) assemelha-se ao padrão encontrado no mapa de IPP, onde as regiões Nordeste e Sudeste apresentam índices negativos. No entanto, há algumas regiões como o nordeste da Bahia, norte do NEB e parte de São Paulo, onde os índices são positivos, porém próximos de zero, indicando que as condições de P-E eram próximas às condições normais. O norte da região Sul, por outro lado, apresentou índices negativos com condições de P-E de seca moderada. As regiões Centro-Oeste e Norte apresentaram índices positivos em quase sua totalidade.

A anomalia de ISV, mostrada na Figura 5.28d apresenta regiões com anomalias negativas que correspondem aos padrões espaciais dos índices de precipitação e P-E. A região Nordeste, principalmente o centro onde se localiza a maior parte do Polígono da Seca, apresenta as anomalias negativas mais marcantes sendo esta característica presente em todos os mapas. Na região Sudeste destaca-se o estado de São Paulo e parte de Minas Gerais com padrão de anomalias negativas mais definido e semelhante aos padrões encontrados nos demais mapas. A maior parte da região Sul também apresenta anomalias negativas porém não tão organizada como nos demais índices. Outras regiões do país apresentam anomalias positivas, destaca-se o norte do NEB assim como o norte da região Norte. As anomalias positivas indicam que as condições da vegetação nessas localidades estão acima das condições climatologicamente encontradas e anomalias negativas indicam que a saúde da vegetação está em condições abaixo que as encontradas normalmente.

5.2.4 Verões (DJF) 2014/15 - 2015/16

A seguir são apresentadas as análises dos índices para o último período composto (DJF 2014/15 - 2015/16).

A Figura 5.29a mostra os valores de ISV menores que 40 em cores vermelhas e nota-se que praticamente toda região Norte e Nordeste apresenta valores de ISV abaixo do limiar de 40, indicando que a vegetação encontra-se sob estresse associado à condições de seca. De fato, a região Centro-Oeste e alguns estados da região Sudeste, que estão abaixo da latitude de 20ºS apresentam condições de estresse da vegetação. A região Sul e o sul das regiões Centro-Oeste e Sudeste apresentam valores de ISV acima de 40 e, portanto, boas condições de vegetação.

Figura 5.28 - Distribuição espacial dos compostos dos índices para DJF (2010/11 - 2013/14): a) Estresse da saúde da vegetação (vermelho) associado à condições de seca através do ISV, b) Condições de deficit (excesso) de precipitação em vermelho (azul) através do IPP, c) Condições de P-E (IPPE), d) Anomalia de ISV.

No mapa do IPP na Figura 5.29b essas características encontradas no mapa de ISV se repetem para o norte e centro do país (abaixo de 20ºS) onde são encontrados os valores negativos do índice de precipitação. A região Nordeste também apresenta em alguns estados (Maranhão, Piauí, Ceará e parte de Pernambuco) IPP negativo associado à condições de deficit de precipitação. Outras regiões do país também apresentam índices negativos porém sem um padrão espacial bem definido. A costa da região Nordeste, o estado da Bahia assim como o extremo oeste da região Norte e os estados localizados acima de 20ºS apresentam padrão espacial de anomalias positivas indicando condições de precipitação acima da média climatológica

A Figura 5.29c apresenta o mapa do composto de IPPE para o período (2015 - 2016). A figura mostra as regiões com índices negativos (em vermelho) abrangendo o norte da região Norte e da região Nordeste em até aproximadamente 5ºS. Toda região central do país, assim como a região Sudeste com exceção do estado de São Paulo, também apresentam IPPE negativo indicando que essas áreas estavam sob estresse de umidade. O extremo sul do Rio Grande do Sul também apresenta valores negativos de IPPE. Por fim, os estados localizados acima de 20ºS, em sua maioria, e o extremo oeste da Amazônia, assim como a costa litorânea do NEB e o estado da Bahia apresentaram índices positivos indicando taxa de evapotranspiração maior que de precipitação.

Os mapas do composto para os três índices (ISV, IPP e IPPE) apresentam regiões sob estresse vegetativo ou de umidade com padrão espacial semelhante. Entretanto, o mapa de anomalias de ISV (Figura 5.29d)) evidencia essas características apresentando essas regiões sob estresse com anomalias negativas de ISV. Toda a região Norte e praticamente todo o NEB, com exceção de alguns estados na costa litorânea, apresentam anomalias negativas. Essas anomalias se estendem para as regiões Centro-Oeste e Sudeste, até latitudes próximas de 20ºS, de forma que as anomalias negativas mais acentuadas são observadas no norte do estado de Minas Gerais. A região Sul e os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul exibem anomalias negativas. Este mapa aponta para uma relação de consistência entre os três índices analisados.

Figura 5.29 - Distribuição espacial dos compostos dos índices para DJF (2014/15 - 2015/16): a) Estresse da saúde da vegetação (vermelho) associado à condições de seca através do ISV, b) Condições de deficit (excesso) de precipitação em vermelho (azul) através do IPP, c) Condições de P-E (IPPE), d) Anomalia de ISV.

5.2.5 Série temporal da fração do território nacional com anomalias de ISV inferiores a -0.5

As anomalias de ISV apresentadas nas seções anteriores apresentam semelhanças com os demais índices (IPP e IPPE) não apenas para os compostos do último período do trimestres DJF. A Figura 5.30a mostra a série temporal de todo o período de estudo (1981/82 - 2015/16) para a fração de área do território brasileiro com valores abaixo do limiar de anomalia de ISV correspondente ao limiar de 40 do ISV. Os valores de anomalias menores que -0.5 foram encontrados como sendo os valores que melhor reproduzem as série de fração do ISV e dos demais índices (ver seção 5.1.2). O valor p da série completa, assim como o coeficiente angular (β) se aproximam dos valores encontrados para a série de ISV. Os períodos descenais da série também têm características de valores p e coeficiente angular aproximados aos dos períodos decenais da série de ISV. A característica principal do trimestre DJF de ter o último período decenal (2008 - 2016) como o mais marcado de toda a série, também é reproduzida com clareza na série de anomalia do ISV Figura 5.30d.

Figura 5.30 - Fração da área com anomalia de ISV < -0.5 para o trimestre DJF para o período a) 1982 - 2016, b) 1982 - 1993, c) 1994 - 2007 e d) 2008 - 2016.

5.3 Compostos globais da Anomalia de TSM e Circulação (vento em 850mb e 200mb)

Tendo em vista os resultados obtidos a partir dos índices de ISV, IPP e IPPE, apresentados nas seções anteriores, as anomalias de TSM assim como as anomalias do vento, foram investigadas considerando as condições de estresse vegetativo e de umidade observados. Ou seja, procurou-se entender quais padrões de TSM e circulação estavam atuantes durante os períodos de estudo que podem ter influenciado no aumento das áreas atingidas por seca no território brasileiro como foi notado durante o período de verão da última década (Figuras 5.1 a 5.10 e Figura 5.30).

A partir das anomalias de TSM é possível observar as variações da temperatura da superfície do oceano que levam à mudanças nos padrões de circulação global e de precipitação. No caso do Oceano Pacífico equatorial, quando suas águas superficiais estão mais aquecidas ou resfriadas (anomalias positivas ou negativas, respectivamente) essas podem influenciar o sistema de convecção sobre o oceano intensificando-o ou enfraquecendo. Quando há anomalias positivas de TSM, há também maior evaporação e, portanto, maior área com precipitação (OLIVEIRA, 1999), o contrário ocorrendo quando da manifestação de anomalias negativas de TSM.

No entanto, as anomalias de TSM não são os únicos fatores que podem modificar o clima. Quando a TSM interage com as condições de vento (ventos alíseos) pode haver a manifestação de eventos ENOS e, consequentemente, modificar os padrões de precipitação em escala global. Tal qual foi apresentado na seção 2.3, os eventos ENOS são fenômenos na escala interanual que tem impostante influência nos regimes de precipitação no Brasil. Anomalias de TSM no Oceâno Atlântico também pode influenciar os regimes de precipitação no país principalmente o norte da região Nordeste.

Assim, a seguir são apresentados os resultados dos compostos de anomalias de TSM, seguidas das anomalias de circulação com a finalidade de verificar as condições dessas componentes durante o verão (DJF) do último período decenal (2007/08 - 2015/16).

5.3.1 Anomalias de TSM e circulação

As anomalias de TSM e circulação para DJF são apresentadas a seguir para cada composto definido.

5.3.1.1 Verões (DJF) 2007/08 - 2008/09

A Figura 5.31a mostra o composto da anomalia de TSM para o período DJF 2007/08 - 2008/09. Anomalias negativas de TSM são notadas na região do Pacífico equatorial desde a costa oeste da América do Sul até próximo à Oceânia. Essa anomalias negativas se estendem também ao longo da costa oeste dos Estados Unidos até o Pacífico Norte. Anomalias negativas indicam que as águas superficiais dos oceanos estão mais frias e portanto há menos evaporação sobre o oceano. No oceano Atlântico Norte também há a presença de anomalias negativas, assim como nas regiões das Altas subtropicais no hemisfério Sul.

Esse padrão de anomalia negativas de TSM nessas regiões do Pacífico equatorial é compatível com as condições de La Niña quando esta está estabelecida. Porém, sendo os eventos ENOS um fenômeno com características oceano-atmosféricas faz-se necessário a análise da componente atmosférica envolvida.

A Figura 5.31b mostra o composto das anomalias de circulação no nível de 850mb para DJF. Assim como para as anomalias de TSM na região do Pacífico equatorial (150ºE - 130ºW) são observadas fortes anomalias do vento alíseos (de leste) assim como a formação anômala de regiões de circulação anticiclônica em latitudes mais altas. O fortalecimento dos ventos alíseos de leste no Pacífico equatorial é uma característica típica comumente observada durante a manifestação de La Niña.

Em altos níveis da atmosfera (200mb), as anomalias do vento, mostradas na Figura 5.31c, são intensas entre as longitude de 150ºE e 100ºW sobre o Pacífico equatorial formando uma região com duas circulações ciclônicas anômalas simétricas à linha do equador, uma em cada hemisfério. Além das anomalias nas regiões do Pacífico equatorial, também nota-se a presença de circulações ciclônicas e anticlônicas anômalas em direção à América do Sul formando um padrão de trem de ondas em forma de U, como é conhecido na literatura (COELHO et al., 2012).

Essa configuração das anomalias de TSM em conjunto com o padrão das anomalias do vento em baixos e altos níveis correspondem às configurações de um evento de ENOS do tipo La Niña. De fato, nos dois anos que compõem o primeiro período composto ocorreram dois eventos de La Niña, sendo o do ano 2007/08 considerado de forte intensidade e o do ano 2008/09 de fraca intensidade.

Figura 5.31 - a) Anomalias de TSM (C°), b) Composto de Circulação (m/s) em 850mb e c) Composto de Circulação (m/s) em 200mb para os verões (DJF) 2007/08 - 2008/09.

0.5cm

0.5cm

5.3.1.2 Verão (DJF) 2009/10

As anomalias de TSM para o ano de 2010 são apresentadas a seguir. A Figura 5.32a mostra a região central (160ºW - 90ºW) do Pacífico equatorial com fortes anomalias positivas indicando que nessa região as TSMs estão mais aquecidas e, portanto, há mais evaporação e convecção. O oceano Atlântico também apresenta anomalias positivas de TSM, principalmente entre as latitudes 10ºS e 40ºS. As anomalias positivas no Pacífico apontam para a existência de um evento ENOS, fase quente, ocorrendo na naquele ano. Na costa oeste da América do Sul há uma região de notáveis anomalias negativas de TSM.

As anomalias de circulação em baixos níveis (850mb) são apresentadas na Figura 5.32b e reforçam o fato da ocorrência de um evento de El Niño no ano 2010. Com efeito, nas regiões oeste do Pacífico equatorial encontra-se anomalias de vento muito intensas de oeste representando o enfraquecimento dos ventos alíseos, confirmando o padrão dos ventos em 850mb quando um El Niño está estabelecido na atmosfera. Nota-se, também que anomalias ciclônicas muito intensas são vistas no hemisfério Norte que, provavelmente, teve alguma influência nas temperaturas positivamente anômalas da superfície do Atlântico Norte.

Em altos níveis (200mb) é observado uma região entre 170ºE e 120ºW no Pacífico equatorial, com a atuação de duas circulações anticiclônicas anômalas simétricas à linha do equador correspondentes com o padrão de circulação predominante em eventos El Niño (Figura 5.32c). A circulação anticiclônica localizada no hemisfério Norte é intensificada pela atuação também anômala do jato. O padrão de trem de ondas em direção à América do Sul também é observado nesse caso de El Niño porém com o sinal inverso, tendo uma região de circulação ciclônica, associada à alta pressão em altos níveis atuando no sul do Brasil.

No ano de 2010, de fato, ocorreu um evento de El Niño de intensidade moderada, com anomalias de TSM persistentes desde junho de 2009 a março de 2010. Nesse ano também ocorreu um evento de seca na região Norte onde 43% da bacia Amazônica esteve sob condições de seca (PANISSET, 2015).

5.3.1.3 Verões (DJF) 2010/11 - 2013/14

As Figuras 5.33a, 5.33b e 5.33c mostram os compostos das anomalias de TSM e do vento, respectivamente, para os verões 2010/11 - 2013/14.

Figura 5.32 - a) Anomalias de TSM (C°) b) Circulação (m/s) em 850mb e c) Circulação (m/s) em 200mb para os verões DJF 2009/10.

As anomalias negativas mostradas na Figura 5.33a, referente ao composto de anomalia de TSM, se concentram ao longo de toda região equatorial do Pacífico, se estendendo desde a costa oeste dos continentes americanos (Norte e Sul) até quase a costa leste da Austrália. Nas regiões centrais do oceano, entre 170°E e 100°W estão localizadas as anomalias mais intensas. O oceano Atlântico Sul, em até 30°S também apresenta anomalias negativas enquanto que no hemisfério Norte há anomalias positivas de TSM.

O composto de anomalia do vento em baixos níveis (850mb) é apresentado na Figura 5.33b. As anomalias do vento de leste não são tão intensas quanto dos anos anteriormente analisados na seção 5.3.1.1, porém nota-se que estas se concentram próximo às regiões centrais do Pacífico equatorial, assim como as anomalias de TSM para este composto. Destaca-se que o padrão da direção das anomalias também é semelhante aos encontrados para as anomalias de vento (850mb) do período de 2007/08 - 2008/09 (Figura 5.31b).

A Figura 5.33c mostra as anomalias do vento em 200mb e o padrão de circulação exibe fortes anomalias na região entre 170°E e 120°W na região equatorial do Pacífico associadas com as circulações ciclônicas anômalas simétricas à linha do equador estabelecidos nessas regiões. Novamente este é um padrão de circulação encontrado também no composto de anomalias para o período de 2007/08 - 2008/09 (Figura 5.31c) e associado à presença de eventos La Niña.

De fato, este período composto é formado por dois anos em que ocorreram eventos La Niña de intensidade forte e fraca, respectivamente, nos anos 2011/12 e 2012/13. As anomalias negativas no Pacífico equatorial persistiram pelo dois anos seguintes (2013 e 2014) porém de fraca intensidade ($<$ -0.5) impossibilitando o estabelecimento ou continuação do evento La Niña dos anos anteriores. Vale ressaltar que a região Sudeste, durante o verão de 2013/14 esteve sob condições de seca severa devido a atuação anômala de circulações anticiclônicas.

Figura 5.33 - a) Anomalias de TSM (C°) b) Circulação (m/s) em 850mb e c) Circulação (m/s) em 200mb para os verões DJF 2010/11 - 2013/14.

5.3.1.4 Verões (DJF) 2014/15 - 2015/16

As anomalias de TSM e circulação (850mb e 200mb) para o último período composto (DJF 2014/15 - 2015/16) são apresentadas a seguir.

A Figura 5.34a mostra o composto das anomalias de TSM. O padrão de anomalia encontrado na região do Pacífico equatorial corresponde às condições da TSM quando há a ocorrência de evento El Niño. As anomalias são positivas por toda a extensão da região equatorial do Pacífico tendo as anomalias mais fortes concentradas nas regiões próximas de 160ºE. As temperaturas superficiais do Pacífico ao longo das costa oeste dos Estados Unidos, assim como o Atlântico Norte também apresentam fortes anomalias positivas. No Atlântico Sul as anomalias de TSM são positivas porém de fraca intensidade.

O composto de anomalia dos ventos em 850mb, Figura 5.34b, mostra anomalias de oeste, indicando enfraquecimento dos ventos alíseos, nas regiões do Pacífico equatorial que são compatíveis com os padrões de circulação encontrados em anos com a ocorrência de eventos El Niños. Apesar de as anomalias em baixos níveis não serem tão intensas, nos níveis de 200mb (Figura 5.34c) o padrão de circulação apresenta fortes anomalias de vento associadas às circulações anticiclônicas anômalas simétricas à linha do equador presentes nas regiões entre 170ºE e 120ºW. O padrão de onda na circulação em direção à América do Sul também é observado nesse composto da anomalia, assim como visto nas anomalias do ano 2010.

Essas características encontradas tanto nas anomalias de TSM como de vento em altos e baixos níveis estão associadas à atuação dos El Niño. Para os anos deste período composto (2015 e 2016) verifica-se que ocorreu um dos mais intenso El Niño da história e o mais intenso evento do século XXI. O Índice Oceânico Niño (ION, em inglês ONI - Oceanic Niño Index) registrou valores anômalos de até 2.6 para este evento. A região Amazônica novamente esteve sob condições de secas nos verões de 2015 e 2016, cerca de 83% da área de toda bacia experimentou deficit de precipitação (PANISSET, 2015). A região Nordeste também esteve sob condições de secas nesses dois anos do composto (BRITO et al., 2017).

Figura 5.34 - a) Anomalias de TSM (C°), b) Circulação (m/s) em 850mb e c) Circulação (m/s) em 200mb para os verões DJF 2014/15 - 2015/16.

5.4 Circulação e velocidades verticais (omega) sobre a América do Sul

Os padrões dos compostos de circulação juntamente com as anomalias de TSM apesentados nas seções anteriores destacaram características encontradas do sistema oceano-atmosfera compatíveis com os eventos ENOS. Os eventos ENOS são a principal fonte de variabilidade climática interanual para a América do Sul.

Como descritos nas seções 2.3 e 5.3, os eventos ENOS através de suas teleconexões atuam afetando o clima de várias regiões do globo. Entretanto, apesar dessas características climáticas estarem presentes quando ocorrem esses eventos, outras componentes do sistema climático, como as forçantes locais, devem ser analisadas, para um melhor entendimento das condições atmosféricas que podem ter contribuído para o aumento das áreas de seca no Brasil na última década. Para o trimestre em questão, DJF, as anomalias de circulação locais são relevantes para o clima regional apesar de em escala global estar atuando os ENOS.

Portanto, para complementar a análise global apresentada anteriormente para cada composto produzido assim como para o ano 2010, as análises dos compostos de circulação nos níveis de 850mb e 200mb para o domínio da América do Sul são aqui apresentados. Também foram analisados compostos de velocidade vertical (omega) e anomalia de omega para esses mesmos períodos.

A seguir são apresentados as análises dos compostos de circulação juntamente com os compostos de omega e suas respectivas anomalias.

5.4.1 Compostos de circulação (850mb e 200mb) e omega para DJF 2007/08 - 2008/09

Os compostos de circulação são apresentados nas Figuras 5.35a e 5.35b. A Figura 5.35a mostra o escoamento em baixos níveis (850mb) de leste sobre o Atlântico Tropical Sul associado aos ventos alíseos de sudeste que transportam umidade do oceano Atlântico para o interior do continente. A partir de 10ºS observa-se sobre o Brasil a deflexão dos ventos de leste em direção à região Sudeste do Brasil. Nota-se também o desvio dos ventos alíseos de nordeste provenientes do Atlântico Norte devido a presença dos Andes, quando esses ventos se intensificam ($>$ 15m/s) configura-se o Jato de Baixos Níveis (JBN). Nas latitudes próximas à 30ºS, no oceano Atlântico, observa-se a circulação anticiclônica das Altas Subtropicais que converge com os alíseos no oceano e no continente associa-se ao escoamento de vento sobre a Amazônia. Para este período composto a circulação anticiclônica no nordeste da Aregentina é

a característica mais marcada. Em altos níveis (Figura 5.35b) observa-se o padrão bem definido da circulação anticiclônica da Alta da Bolívia entre as latitudes de 10ºS e 20ºS, assim como o escoamento de oeste e a presenças do cavado do Nordeste na região do NEB e Atlântico equatorial.

Figura 5.35 - Composto de circulação (m/s) para DJF 2007/08 - 2008/09 a) em 850mb e b) 200mb.

Essa configuração dos padrões atmosféricos estão associados principalmente, nesse período do ano (DJF), as fontes de calor nos trópicos, à intensificação do gradiente de temperatura nos trópicos em baixos níveis, e em altos níveis à liberação de calor latente sobre o continente. Assim, os movimentos verticais da atmosfera tendem a ser, predominantemente, durante o verão austral, na maior parte do Brasil, ascendentes.

Portanto, levando-se em consideração as condições climáticas globais e regionais para este período composto (2007/08 - 2008/09), assim como também as regiões de deficit vegetativo e de umidade apresentadas nos mapas dos índices de vegetação (ISV),

precipitação (IPP) e de P-E (IPPE) (Figura 5.26a, b e c) analisou-se os campos de velocidade vertical que são apresentados a seguir para cada seção vertical definida na seção 4.6 localizadas sobre as regiões de Brasil identificados por estarem sobre condições de secas.

- Seções verticais em 30ºS e 53ºW

A seção vertical longitudinal (1000mb - 200mb) do composto de omega na latitude de 30ºS é apresentado na Figura 5.36a). As velocidade verticais negativas indicam movimentos ascendentes e positivas movimentos descendentes (subsidência).

As velocidades verticais entre ≈60ºW e ≈45ºW são predominantemente positivas em todas as camadas atmosféricas, a partir de 40ºW as velocidades verticais negativas predominam indicando movimentos descendestes nas regiões. Essa característica de movimentos verticais ascendentes à leste e movimentos verticais descendente entre ≈60ºW e ≈45ºW é compatível com um padrão de circulação onde indica que está havendo subsidência sobre o estado do Rio Grande do Sul. Essas regiões, nos mapas de ISV, IPP e IPPE apresentam deficit hídrico associado à secas ou estresse de vegetação também associado à secas.

O mapa de anomalias de omega (Figura 5.36b) mostra que entre ≈60ºW e 50ºW há anomalias positivas de omega indicando que os movimentos descendentes encontrados no campo de omega são anômalos e a subsidência está intensificada nesta região. Essa característica também é vista nos altos níveis atmosféricos próximo de 45ºW. Anomalias negativas de omega (movimentos verticais ascendentes anômalos) estão presentes em todos os níveis atmosféricos entre ≈40ºW e 30ºW, associadas as velocidades verticais negativas encontradas (Figura 5.35a).

Assim, as anomalias de omega para esta região enfatiza os movimentos verticais encontrados no campo de omega e confirma a relação entre as regiões de estresse vegetativo e de umidade encontrados nos mapas assim como enquadra-se nas características vistas na região em eventos de La Niña que tendem a reduzir a precipitação sobre essa região.

Figura 5.36 - Perfis verticais (lat/lon x omega (Pa/s) para o primeiro período composto, DJF 2007/08 - 2008/09 em 30ºS (paines a e b) 53ºW (paineis c e d), entre 1000 e 200 hPa.

Na seção vertical latitudinal para a longitude de 53ºW (Figura 5.36c) as velocidade verticais negativas são predominantes entre 25ºS e 2ºS indicando movimentos verticais ascendentes em praticamente todos os níveis atmosféricos, exceto os níveis mais próximos à superfície. A partir de ≈25ºS até 35ºS as velocidades verticais positivas predominam indicando movimentos verticais descendentes (subsidência). Esse padrão de circulação onde há movimentos ascendentes nas regiões centrais do Brasil e descendentes no sul próximos à latitudes médias é compatível com o padrão encontrado na seção vertical latitudinal anterior, sendo a região Sul do Brasil a região que apresenta subsidência e também estresse de vegetação nos mapas de ISV (Figura 5.26a).

O mapa de anomalias de omega para esta seção vertical é apresentado na Figura

5.36d e mostra as anomalias negativas associadas aos movimentos verticais ascendentes predominantes em todos os níveis atmosféricos entre 10°N e ≈20°S, principalmente em médios e altos níveis. As anomalias positivas (subsidência anômala) são vistas a partir de ≈25°S e são mais intensas em níveis mais baixos, próximos à superfície.

Novamente esse padrão de anomalias negativas (movimentos ascendentes anômalos) em latitudes mais baixas e anomalias positivas (movimentos anômalos descendentes) em latitudes médias enfatizam o padrão de circulação dos movimentos verticais encontrados nos campos de omega na figura anterior, além de realçar as regiões onde os mapas de ISV e anomalia de ISV apresentam estresse de vegetação.

- Seções verticais em 10°S e 41°W

No mapa do perfil vertical de omega para a latitude de 10°S (Figura 5.37a) as velocidades verticais negativas (movimentos ascendentes) predominam desde o extremo oeste (≈75°W) até próximo a 55°W nos níveis médios e altos da atmosfera. A partir de ≈45°W em altos níveis há a presença de velocidades positivas associadas a movimentos verticais descendentes. Entre ≈45°W e 30°W as velocidades verticais positivas (subsidência) predominam em todos os níveis atmosféricos, com maior intensidade nos níveis médios. Nota-se que nas regiões com predomínio de velocidades negativas descritas acima há movimentos ascendentes que divergem em altos níveis e tem um ramo descendente nas regiões leste. Essas região de subsidência corresponde, nos mapas de ISV e anomalias de ISV às regiões do Nordeste da Bahia onde os índices indicam estresse de vegetação associado à secas. Em consistência com essas condições os mapas de IPP e IPPE (Figura 5.26b e Figura 5.26c) essas regiões índices negativos sobre essas regiões.

O mapa de anomalia de omega (Figura 5.37b) apresenta anomalias negativas em todos os níveis atmosféricos entre as longitudes de ≈60°W e ≈45°W. Anomalias positivas associadas aos movimentos verticais descendentes são encontradas em altos e médios níveis entre 45°W e 40°W, região essa onde, nos mapas de ISV encontram-se os índices que indicam boas condições de saúde da vegetação.

A seção vertical latitudinal para a longitude de 41°W é apresentada na Figura 5.37c. O mapa do perfil vertical apresenta predominância de fracas velocidades verticais negativas (movimentos ascendentes) entre 10°N e ≈10°S, principalmente em médios e altos níveis. Nos baixos níveis ($<$ 850mb) entre 5°S e 10°S nota-se uma pequena

região de fortes velocidades verticais positivas (subsidência). A partir de 10ºS, em altos níveis (> 850 mb) nota-se velocidades verticais positivas (subsidência) que persistem até ≈15ºS. Em médios níveis (≈ 800 mb), entre ≈15ºS e ≈25ºS nota-se também velocidades verticais positivas enquanto que em todos os outros níveis da atmosfera predomina velocidades negativas. A partir de ≈30ºS as velocidades verticais positivas (subsidência) voltam a predominar em todos os níveis atmosféricos.

O mapa de anomalia de omega (Figura 5.37d) realça as regiões com velocidades positivas encontradas entre 10ºS e ≈20ºS ao apresentar anomalias positivas (subsidência) de omega para essa mesma região, principalmente em médios e altos níveis. Anomalias positivas também são notadas nas latitudes acima de 30ºS, compatível com o campo de omega. As demais regiões apresentam anomalias negativas assim como no campo de omega as velocidades são negativas, caracterizando movimentos verticais ascendentes nessas regiões.

O padrão de circulação inferido dos campos de omega e de anomalia de omega mostra que entre as latitudes ≈10ºS e ≈15ºS tem-se subsidência, assim como nas latitudes a partir de 30ºS, padrão este compatível com os mapas de precipitação analisados e também com as regiões de estresse de vegetação do ISV (Figura 5.26b e Figura 5.26a).

Figura 5.37 - Perfis verticais (lat/lon x omega (Pa/s)) para o primeiro período composto, DJF 2007/08 - 2008/09 em 10°S (paineis a e b) e 41°W (paineis c e d), entre 1000hPa e 200hPa.

5.4.2 Circulação (850mb e 200mb) e omega para DJF 2009/10

O mapa da circulação em baixos níveis (850mb) para DJF 2009/10 é apresentado na Figura 3.38a. Os padrões de circulação apresentados nas seção anterior também são observados para o verão deste ano com algumas modificações como os ventos de noroeste sobre a região central da América do Sul estarem mais meridionais e a região de circulação anticiclônica no sul do Brasil não está definida como uma circulação fechada. Porém, as características principais que caracterizam o período de DJF estão presentes.

O mesmo ocorre no mapa de circulação em altos níveis (200 mb) mostrado na Figura

5.38b. Ou seja, observa-se a presença da circulação anticiclônica da alta da Bolívia próximo de 20ºS, o escoamento de oeste assim como o cavado do Nordeste. No entanto, a Alta da Bolívia está direcionada para o sudeste de sua posição climatológica e o cavado do Nordeste tem a circulação ciclônica fechada que configura o tipo de circulação dos VCANs.

Figura 5.38 - Circulação (m/s) para DJF 2009/10 a) em 850mb e b) em 200mb.

Assim, a seguir são apresentadas as seções verticais dos compostos de omega e anomalias de omega para DJF 2009/10.

- Seções verticais em 8ºS e 41ºW

O perfil vertical de omega entre 75ºW - 30ºW para a latitude 8ºS (Figura 5.39a) apresenta velocidades verticais negativas (movimentos ascendentes) predominantes em todos os níveis atmosféricos desde 75ºW até ≈40ºW, essas velocidades se intensificam entre ≈60ºW e 55ºW e em 50ºW. A partir de 40ºW entre ≈700mb e 400mb há velocidades verticais positivas (subsidência) fracas e nas longitudes próximas de 30ºW em todos os níveis atmosféricos. Em níveis abaixo de 700mb entre ≈40ºW e

≈35°W há fortes movimentos verticais ascendentes e também algumas regiões de movimentos descendentes. Em geral, para este perfil vertical, as velocidades verticais negativas associadas ao movimentos ascendente predominam à oeste e há subsidência no extremo leste, formando uma circulação com ramo descendentes próximo as regiões costeiras do Brasil (acima de 40°W).

As anomalias de omega apresentadas na Figura 5.39b exibe um padrão espacial diferente das velocidades verticais da figura anterior. As anomalias negativas e positivas são referentes aos movimentos verticais de DJF 2009/10 em relação à sua climatologia. A climatologia de omega (figura nao mostrada) para a seção vertical longitudinal em 8°S tem velocidades verticais negativas (movimentos ascendentes) predominantes em praticamente todos os níveis atmosféricos, com maior intensidades nas regiões à leste dos Andes (≈60°W) e entre ≈55°W e 45°W. Essas regiões, no mapa de omega (Figura 5.39a) apresentam menores valores de velocidade, indicando movimentos ascendentes mais fracos do que a climatologia.

Ainda em relação à climatologia de omega em baixos níveis (< 800mb) entre ≈45°W e ≈40°W nota-se fortes velocidades verticais negativas (movimentos ascendentes) que não são observadas com tanta intensidades no mapa de omega na Figura 5.39a. De fato, essa região apresenta velocidades verticais positivas mais intensas para estes níveis, indicando predominância de movimentos descendentes sobre os movimentos ascendentes, porém apenas nos baixos níveis. No mapa de anomalia nota-se que nessas regiões há anomalias negativas onde observa-se velocidades positivas (Figura 5.39a) indicando que os movimentos verticais descendentes não eram tão intensos. Nas regiões centrais do Brasil (≈58°W - ≈45°W) as anomalias são positivas em todos os níveis atmosféricos e isso aponta para movimentos verticais ascendentes enfraquecidos em relação à climatologia da região. O mesmo ocorre para as fortes anomalias próximo à 40°W.

Essas características encontradas nos perfis de omega e anomalias de omega, quando comparadas aos mapas dos índices analisados (Figuras 5.27 a - d) verifica-se que, para as regiões onde climatologicamente há movimentos verticais descendentes nota-se anomalias negativas de omega (movimentos ascendentes) para DJF 2009/10, correspondendo às mesmas regiões que apresentam boas condições de vegetação nos mapas de ISV (Figura 5.27 a e d) e índice positivo de IPP (Figura 5.27b). O oposto ocorre para as regiões que apresentam anomalias positivas (subsidência) no campo de omega, nos mapas de ISV e IPP. Em geral, nessas regiões os índices indicam deficit de vegetação ou de umidade. No mapa de IPPE (Figura 5.27c) as regiões

com índices negativos são notadas até apenas as longitudes de ≈50ºW.

Figura 5.39 - Perfis verticais (lat/lon x omega (Pa/s)) para DJF 2009/10 em 8ºS (paineis a e b) e 41ºW (paineis c e d), entre 1000hPa e 200hPa.

O mapa de omega para a seção vertical latitudinal na longitude de 41ºW é apresentado na Figura 5.39c. As velocidades verticais negativas associada a movimentos ascendentes são encontradas principalmente entre as latitudes ≈8ºN e 10ºS, até 0º essas velocidades são vistas em todos os níveis atmosféricos, a partir do equador até 10ºS nos níveis acima de 850mb, em baixos níveis, nessa região nota-se fortes velocidades verticais positivas (subsidência). A partir de 10ºS as velocidades positivas são predominantes na atmosfera com fortes intensidades entre 800mb e 600mb. Assim como nos altos níveis (próximo à 200mb), essas velocidades são observadas até as latitudes próximas a 25ºS. Nas latitudes acima de 25ºS há velocidades verticais negativas (movimentos ascendentes) em todos os níveis atmosféricos.

A Figura 5.39d apresenta as anomalias de omega para esta mesma seção vertical. As anomalias positivas são predominantes e fortes nas regiões onde encontra-se velocidades verticais positivas no campo de omega (Figura 5.39d) em todos os níveis atmosféricos, especialmente nos altos níveis. As regiões em latitudes médias, acima de 30ºS apresentam anomalias negativas correspondentes aos movimentos ascendentes de omega. As fracas anomalias positivas observadas próximo a 0º indicam que os movimentos ascendente na região estavam enfraquecidos em DJF 2009/10 e, portanto, as velocidades verticais foram menores que a climatologia (figura não mostrada). A região, em baixos níveis, entre 0º e 10ºS, novamente, assim como para a seção vertical anterior (Figura 5.39c), aponta para uma região onde os movimentos verticais ascendentes superficiais estavam mais intensos, combinado com o enfraquecimento dos movimentos verticais ascendentes localizados nos níveis logo acima, resultando assim nas fortes anomalias positivas observadas. Nessas mesmas latitudes, as anomalias acima de 700mb são negativas compatíveis com os movimentos verticais ascendentes anômalos na região.

As velocidades verticais, assim como as anomalias de omega nas regiões a partir de 10ºS até próximo das latitudes médias ($\approx$ 30ºS) indicam movimentos descendentes (subsidência) predominantes na atmosfera, enquanto que em latitudes próximas ao equador há movimentos ascendentes na atmosfera, principalmente em médios e altos níveis. Esse padrão de anomalias de circulação vertical corresponde às circulações zonais onde nos altos níveis observa-se a atuação da circulações ciclônicas (movimentos ascendentes) /anticiclônicas (subsidência) pertencentes ao conjunto de circulações desde o Pacífico equatorial. Nos mapas de ISV (Figura 5.27a) essa região com predominância de movimentos descendentes corresponde às áreas com ISV abaixo de 40 e, consequentemente que apresentam estresse da vegetação. Essa mesma característica é vista no mapa de IPPE (Figura 5.27c). No mapa do IPP (Figura 5.27b) as regiões com deficit de precipitação se concentram entre 18ºS e 23ºS. As regiões com anomalias negativas (movimentos ascendentes) de omega condiz com regiões de boa saúde da vegetação (ISV acima de 40), e índices de precipitação e P-E positivos ou próximos das normais.

- Seções verticais em 15ºS e 48ºW

A segunda seção vertical longitudinal em 15ºS escolhida para a análise de DJF 2009/10 é apresentada na Figura 5.40a. As velocidades verticais em médios e baixos níveis são negativas (movimentos ascendentes), desde $\approx$60ºW até próximo de 40ºW, sendo que as velocidades mais intensas se concentram nas regiões entre 60ºW

e 50°W. A partir de ≈ 40°W até 30°W as velocidades são predominantemente positivas (subsidência) em todos os níveis atmosféricos. Essa configuração dos movimentos verticais indicam movimentos ascendentes presentes nas regiões de velocidades negativas e movimentos descendentes nas regiões de omega positivo.

As anomalias de omega na Figura 5.40b evidenciam essas características ao mostrar anomalias negativas, em praticamente todos os níveis atmosféricos entre ≈60°W e 50°W. Anomalias positivas aparecem a partir de 50°W, sendo mais intensas em altos níveis como, por exemplo, nos níveis acima de 400mb próximo à 40°W. As anomalias próximo à 30°W são fracas ou não existem. As anomalias positivas em altos níveis próximo à 50°W são devido à movimentos verticais ascendentes enfraquecidos em relação à climatologia (figura não mostrada). Em geral, as anomalias de omega reiteram o padrão de circulação vertical encontrado no mapa de omega (Figura 5.40a).

Nos mapas de ISV, IPP e IPPE (Figuras 5.27a, b e c) essas características são reproduzidas como áreas com estresse de vegetação (ISV) ou de umidade (IPPE) próximos ao sul do estado da Bahia. De fato, o índice de precipitação (IPP) não identifica essa região com deficit de precipitação enquanto que no índice de P-E apresentam os valores mais negativos para esta mesma região, assim como o ISV.

O mapa de omega para a seção vertical latitudinal em 48°W é mostrado na Figura 5.40c. As velocidades verticais negativas (movimentos ascendentes) predominam na atmosfera desde ≈8°N até próximo de 25°S. Em baixos níveis observa-se no entanto velocidades positivas (subsidência) entre 10°S e 20°S, região essa onde em médios e altos níveis encontram-se as velocidades negativas menos intensas. Desde 25°S até 35°S velocidades positivas de fraca intensidade atuam em toda a atmosfera, no extremo sul (≈32°S) as velocidades se intensificam. Uma estreita faixa de velocidades verticais positivas no extremo norte (≈ 8°N) se destaca com altos valores de omega.

O mapa de anomalia de omega (Figura 5.40d) destaca as anomalias negativas nas regiões onde as velocidades negativas são mais intensas (Figura 5.40c), próximo a 20°S e entre ≈ 8°N e 10°S, em todos os níveis atmosféricos. As anomalias positivas intensas concentram-se próximo a 10°N em, todos os níveis da atmosfera. Em altos níveis próximo a 0° nota-se anomalias positivas, assim como entre 10°S e ≈20°S. Essas anomalias são positivas devido às velocidades verticais negativas nessa região serem menores do que a climatologia (figura não mostrada). O mesmo ocorre com as anomalias negativas próximo às regiões de latitude médias.

Figura 5.40 - Perfis verticais (lat/lon x omega (Pa/s)) para DJF 2009/10 em 15ºS (paineis a e b) e 48ºW (paineis c e d), entre 1000hPa e 200hPa.

Essas características reforçam os padrões espaciais encontrados nos mapas de ISV (Figura 5.27a), onde na região Sul do Brasil e estados em latitudes acima de 20ºS os índices analisados indicam boas condições de saúde da vegetação (ISV) e valores positivos (ou próximos de condições normais, sem estresse de umidade) para os demais índices (IPP e IPPE). Nota-se, assim, que os índices analisados reproduzem os efeitos atmosféricos causados por eventos ENOS sobre a região Norte do Brasil. Em DJF 2009/10 um episódio de El Niño moderado se estabeleceu na atmosfera e regiões como o norte do país (região Amazônica) experimentaram uma das maiores secas da década.

5.4.3 Circulação (850mb e 200mb) e omega para DJF 2010/11 - 2013/14

O composto de circulação no nível de 850mb apresenta a configuração das Altas Subtropicais em latitudes médias, o escoamento de leste dos alíseos nas regiões tropicais e o escoamento na região do JBN além de regiões com circulação anticiclônica bem acentuadas próximo ao Rio Grande do Sul e Uruguai(Figura 5.41a). Em altos níveis (200mb) na Figura 5.41b nota-se a presença da Alta da Bolívia com seu centro próximo à 20ºS e à leste a região do cavado do Nordeste, em latitudes mais altas o escoamento de leste característico dessas latitudes.

Figura 5.41 - Composto de circulação (m/s) para DJF 2010/11 - 2013/14 a) em 850mb e b) 200mb.

A seguir são apresentados os perfis verticais de omega e anomalia de omega.

- Seções verticais em 10ºS e 40ºW

A Figura 5.42a mostra as velocidades verticais para a seção vertical longitudinal em 10ºS para o composto 2010/11 - 2013/14. As velocidades negativas associadas à mo-

vimentos verticais ascendentes predominam na atmosfera desde 75°W até próximo a 45°W, principalmente nos médios e altos níveis (> 800mb). Em ≈55°W nota-se que as velocidades verticais são menos intensas e em baixos níveis movimentos descendentes são observados. Em 45°W até 40°W, em níveis abaixo de 800mb são encontradas fortes velocidades verticais negativas (movimentos ascendentes), porém nos demais níveis atmosféricos a partir dessa região até 30°W omega é positivo, indicando movimento descendente.

As anomalias de omega para este perfil vertical são apresentadas na Figura 5.42b. As anomalias negativas de omega podem ser notadas principalmente em altos níveis nas longitudes entre 55°W e ≈45°W. Anomalias positivas de fraca intensidade se concentram próximo à 30°W e 40°W. Em ≈55°W nota-se anomalias positivas relacionadas à velocidades verticais negativas (movimentos ascendentes) mais fracas que as encontradas na climatologia (figura não mostrada).

A Figura 5.42c mostra as velocidades verticais para o perfil vertical latitudinal na longitude de 40°W. As velocidades verticais negativas (movimentos ascendentes) se concentram nas latitudes norte até aproximadamente 10°S, em todos os níveis atmosféricos. A partir de 10°S em direção a latitudes mais altas predominam-se velocidades positivas associadas aos movimentos descendentes, principalmente em médios e altos níveis. Essas velocidades de estendem até ≈ 25°S, em baixos níveis. Entre 25°S e 35°S omega é negativo e os movimentos verticais ascendentes.

Nas anomalias de omega apresentadas no mapa da Figura 5.42d nota-se que as anomalias positivas se concentram nos médios e altos níveis atmosféricos entre as latitudes de 10°S e ≈ 20°S, indicando que os movimentos descendentes dessa região encontrados no perfil de omega (Figura 5.42c) são anômalos. Nas latitudes mais altas notam-se anomalias negativas de omega ressaltando as velocidades verticais negativas encontradas, assim como nas latitudes próximas aos trópicos.

Nos mapas de ISV e anomalias de ISV (Figuras 5.28a e d) regiões onde predominam omega positivos e anomalias positivas de omega esses índices apresentam valores baixos (<40) ou negativos, no caso da anomalias de ISV associado a estresse de vegetação. No mapa do IPP (Figura 5.28b) essas regiões também são apresentadas com índices negativos indicando deficit de precipitação. No mapa do IPPE (Figura 5.28c) essas regiões encontram-se ou em condições de estresse de umidade ou com condições próximas às condições normais. As áreas que apresentam índices positivos ou com valores acima de 40, no caso do ISV, correspondem as regiões com predominância de movimentos ascendentes nos mapas de omega.

Figura 5.42 - Perfis verticais (lat/lon x omega (Pa/s)) para o segundo período composto, DJF 2010/11 - 2013/14 em 10°S (painies a e b) e 40°W (painies c e d), entre 1000hPa e 200hPa.

- Seções verticais em 21°S e 48°W

A seção vertical longitudinal na latitude de 21°S é apresentada na Figura 5.43a. Velocidades verticais positivas (movimentos subsidentes) são notadas entre as longitudes de ≈ 58°W e 43°W em praticamente todos os níveis da atmosfera. Essas velocidades, no entanto, não são intensas. Em altos níveis próximo a 40°W também são observadas fraca velocidades verticais negativas. Nessas regiões predominam movimentos ascendentes associados ao favorecimento de nebulosidades e consequentemente de nuvens de chuva. As velocidades verticais positivas são encontradas em longitudes à oeste, próximas a 60°W e longitudes menores que 40°W. A partir de 40°W os valores de omega começam a ser positivos, primeiro em baixos e médios níveis (até

≈ 700mb) e depois em todos os níveis atmosféricos até 30°W.

As anomalias de omega na Figura 5.43b mostram anomalias negativas, principalmente em médios e altos níveis, referentes às regiões de predominância das velocidades negativas no mapa de omega (Figura 5.43a), dando ênfase aos movimentos ascendente naquelas regiões. Próximo à 60°W as anomalias são positivas assim como nas longitudes abaixo de 40°W até 30°W. Em 40°W as anomalias positivas são encontradas em todos os níveis atmosféricos.

Figura 5.43 - Perfis verticais (lat/lon x omega (Pa/s)) para o segundo período composto, DJF 2010/11 - 2013/14 em 21°S (paineis a e b) e 48°W (paineis c e d), entre 1000hPa e 200hPa.

Essas regiões apresentadas nas figuras anteriores com predominância de movimentos verticais ascendentes correspondem, nos mapas dos índices analisados (ISV, IPP e

IPPE, Figuras 5.28a, b e c, respectivamente), para este composto, à áreas com boas condições de vegetação e índices positivos. Essa característica dos mapas de omega e dos índices indicam que essas regiões apresentaram os regimes de precipitação alterado de forma a favorecer as chuvas. Em contrapartida, nas regiões mais ao leste, abaixo de $\approx 50^{o}$W, as chuvas foram inibidas pelos movimentos verticais descendentes que predominaram nas regiões. Sendo assim, apresentam condições de estresse da vegetação ou de umidade associado a secas.

O mapa do perfil vertical na longitude de 48°W é apresentado na Figura 5.43c, as velocidades verticais negativas predominam em quase todos os níveis atmosféricos desde o extremo norte ($\approx 10^{o}$N) até próximo a 25°S. As velocidade mais intensas são encontradas entre 5°S e 15°S, enquanto que as menos intensas se concentram próximo à 0° - 5°S e 20°S. A partir de 25°S os valores de omega são positivos e predominam em quase todos os níveis atmosféricos. Estes movimentos indicam que o movimento ascendente se concentra nas latitudes mais baixas, até 20°S e movimentos subsidentes predominam em latitudes mais altas.

As anomalias de omega são apresentadas na Figura 5.43d. As anomalias negativas são encontradas nas latitudes do Hemisfério Norte até $\approx 5^{o}$N, nas latitudes próximas à 10°S, principalmente em altos níveis e também acima de 30°S, em todos os níveis atmosféricos. As anomalias negativas das latitudes mais baixas são devido a movimentos ascendentes mais fortes sobre essas regiões. No caso das regiões acima de 30°S as anomalias negativas são em razão de velocidades menos intensas que a climatologia apresentadas no perfil de omega (Figura 5.43c). O mesmo ocorre para as regiões entre 15°S e 20°S, onde se notam-se anomalias positivas nas regiões onde as velocidades verticais negativas são menos intensas, assim como nas latitudes próximas a 0°. As anomalias positivas encontradas entre 20°S e 30°S correspondem à movimentos verticais descendentes anômalos.

Comparando os resultados encontrados com os mapas de ISV, IPP e IPPE (Figuras 5.28a, b e c, respectivamente), nota-se que as regiões onde predomina-se os movimentos verticais ascendentes também apresentam boas condições de vegetação (ISV > 40) e valores de IPP e IPPE positivos associados à condições úmidas. As latitudes onde os movimentos subsidentes predominam, entre 20°S e 30°S, região dos estados de Minas Gerais e São Paulo, os índices indicam condições de vegetação associadas as secas e deficit de precipitação e P-E associados a secas.

Os resultados encontrados nos mapas de omega que reiteram as características de deficit de vegetação e de umidade apresentados nos mapas de ISV, IPP e IPPE

para este período composto reforçam as condições do clima nos anos que compõem o período. Nos anos de 2010/11 e 2011/12, dois eventos La Niña de intensidades forte e fraca, respectivamente, atuaram na atmosfera. Esses eventos, em geral, diminuem as precipitações nas regiões mais ao Sul do Brasil. Também no verão no ano 2014, a região Sudeste do país enfrentou um período de secas severas relacionado a padrões de circulação anômalos que, em última análise, resultou em uma região de subsidência localmente que influenciou negativamente as precipitações da região.

5.4.4 Circulação (850mb e 200mb) e omega para DJF 2014/15 - 2015/16

Os mapas de circulação em baixos e altos níveis do composto para DJF 2014/15 - 2015/16 são apresentados nas Figuras 5.44a e b. A Figura 5.44a apresenta os padrões de circulação no nível de 850mb onde é possível observar as características da circulação atmosférica para esse período do ano (DJF) incluindo a atuação da Alta Subtropical sobre oceano Atlântico e a confluências dos alíseos ao norte do Brasil formando no continente uma região de transporte de umidade dos oceanos. Na região Amazônica, em direção à região Sudeste tem-se a mudanças dos ventos alíseos (não mais com este nome) que transportam umidade da Amazônia para latitudes mais altas e, por fim, as circulações anticiclônicas no sul do país. Em altos níveis nota-se a circulação anticiclônica da Alta da Bolívia, que neste período posicionou-se diagonalmente, na direção noroeste-sudeste e o cavado do Nordeste, que assim como em DJF 2009/10 apresentou uma circulação ciclônica fechada, e escoamento de oeste nas latitudes mais altas.

A seguir os mapas das seções verticais de omega e anomalias de omega.

- Seções verticais em 19ºS e 53ºW

O perfil da seção vertical longitudinal em 19ºS é apresentado na Figura 5.45a. As velocidade verticais apresentadas no mapa de omega exibem valores negativos de velocidades verticais de fraca intensidade nos níveis acima de 850mb entre as longitudes de $\approx$ 58ºW e 45ºW. Nessas mesmas regiões, em baixos níveis nota-se velocidades positivas atuando até próximo de 850mb. A partir de 45ºW até próximo de 40ºW, em 700mb predomina-se velocidades positivas, e em médios e altos níveis há velocidades negativas. Em 40ºW adiante, até 30ºW as velocidades positivas predominam em todos os níveis atmosféricos.

As anomalias de omega para este mesmo perfil vertical são apresentadas na Figura 5.45b. Anomalias positivas predominam em praticamente todos os níveis atmosféri-

cos desde 50°W até o extremo oeste da região analisada. As anomalias mais intensas se encontram nas latitudes próximas à 40°W e estão relacionadas a movimentos subsidentes anômalos. Entretanto, as anomalias positivas encontradas entre ≈42°W e 50°W estão relacionadas com o enfraquecimento dos movimentos verticais ascendentes nessa região, como pode ser observado no mapa da climatologia de omega para esta latitude (Figura 5.45c)). As anomalias negativas se concentram à oeste entre as longitudes de 50°W e 55°W, em médios e altos níveis.

Figura 5.44 - Composto de circulação (m/s) para DJF 2014/15 - 2015/16 a) em 850mb e b) 200mb.

A seção vertical latitudinal de omega na longitude de 53°W é mostrada na figura 5.45d. A figura mostra velocidades verticais positivas nos níveis acima de 600mb desde 10°N até ≈ 5°S. Em médios e baixos níveis são observadas fracas velocidades positivas, exceto próximo a 8°N onde essas velocidades são mais intensas. Entre 5°S até ≈ 30°S os valores de omega são predominantemente negativos de fraca intensidade. A partir de 30°S as velocidades verticais são novamente positivas em todos os níveis atmosféricos.

Figura 5.45 - Perfis verticais (lat/lon x omega (Pa/s)) para o terceiro período composto 2014/15 - 2015/16 em 19ºS (paineis e b) e 53ºW (paineis d e e), climatologia de omega em 19ºS (c), entre 1000hPa e 200hPa.

O perfil de anomalias de omega (Figura 5.45e) apresenta anomalias positivas (subsidência anômala) em associação aos movimentos verticais descendentes entre as latitudes de 10ºN e ≈ 5ºS assim como identificados no perfil de omega (Figura

5.45d). Essa região apresenta em altos níveis omega positivo e em baixos níveis omega negativo. As anomalias positivas encontradas nas regiões onde as velocidades verticais são negativas estão relacionadas a movimentos ascendentes mais fracos. De fato, toda atmosfera, em última análise, nestas latitudes apresenta movimentos descendentes. Nas latitudes próximas à 10ºS as anomalias positivas encontradas também estão associadas a velocidades verticais enfraquecidas em relação a climatologia para a região. Em latitudes mais altas, entre 20ºS e 30ºS os movimentos ascendentes predominam através das anomalias negativas de omega.

Essas regiões de anomalias positivas e negativas apontam para um padrão de circulação vertical onde movimentos subsidentes atuam no norte do país até aproximadamente 10ºS e nas regiões de latitudes mais altas os movimentos são majoritariamente ascendentes. Essa característica corresponde aos padrões de circulação atuantes em eventos El Niño, onde o ramo subsidente da célula de Walker fica deslocado sobre as regiões norte da América do Sul. No perfil da seção vertical em 19ºS (Figura 5.45c) nota-se nessa latitude os movimentos ascendentes característicos dessa região onde estão enfraquecidos.

Nos mapas de ISV, IPP e IPPE (Figuras 5.29a, b e c, respectivamente) essas características são reproduzidas no comportamento dos índices. O mapa do ISV apresenta a região das latitudes 19ºS com valores acima de 40, indicando boas condições de saúde da vegetação, até aproximadamente 45ºW, e então os valores do índice caem para menores que 40 indicando estresse de vegetação associado à secas. Esse padrão espacial é mais claro no mapa de anomalias de ISV. Nos mapas de IPP e IPPE o comportamento dos índices são semelhantes aos do ISV, porém as regiões com predominância de valores negativos associados à deficit de umidade e, consequentemente, à secas, são maiores e se estendem mais à oeste. Na seção vertical longitudinal, as características predominantes são os movimentos descendentes anômalos nas regiões mais ao norte do país e movimentos descentes em latitudes acima de 20ºS. Nos mapas do ISV esse padrão é representado por valores abaixo do limiar de seca (ISV $<$ 40) até a aproximadamente 20ºS e boas condições de vegetação nas latitudes mais altas.

- Seção vertical em 9ºS e 41ºW

A seção vertical longitudinal de omega na latitude de 9ºS é mostrada na Figura 5.46a. As velocidades verticais predominantes na maior parte da atmosfera são negativas, sendo encontrado os maiores valores negativos e omega nas regiões entre

75°W e 58°W, indicando fortes movimentos ascendentes nesses regiões. Entre 58°W e ≈45°W as velocidades verticais são negativas porém de fraca intensidade. Em 40°W são encontradas velocidades verticais positivas em médios níveis até ≈300mb. Entre ≈ 38°W e 30°W velocidades positivas predominam em praticamente todos os níveis atmosféricos. As regiões de velocidades positivas apresentam movimentos descendentes.

O perfil de anomalia de omega é apresentado na Figura 5.46b e exibe fortes anomalias positivas nas regiões centrais do país, entre ≈ 58°W e 45°W. Essas anomalias positivas estão relacionadas à movimentos verticais ascendentes fracos e velocidades abaixo da média climatológica. Outra região de anomalias positivas é encontrada nos níveis abaixo de 700mb próximo à 40°W. Essa região coincide com regiões onde os movimentos ascendentes mostram-se enfraquecidos assim como os movimentos descendentes em médios níveis mostram-se intensificados. As anomalias negativas são vistas nas longitudes mais à oeste acima de 58°W em todos os níveis atmosféricos e entre 45°W e 30°W em altos níveis.

A seção vertical latitudinal de omega na longitude de 41°W é mostrada na Figura 5.46c. As velocidades verticais negativas associadas a movimentos ascendentes estão presente em quase toda a atmosfera e predominam nos altos níveis, embora em sua maioria são velocidades fracas. As regiões que apresentam omega negativo com maiores intensidades situa-se entre ≈ 8°N e próximo a 0°, em todos os níveis atmosféricos. A partir de 0° as velocidades verticais negativas observadas em médios e alto níveis são pequenas. Nas latitudes próximas à 10°S encontra-se em níveis mais baixos que 700mb velocidades negativas intensas como também velocidades positivas intensas. Entre 10°S e ≈ 25°S as velocidades verticais positivas são encontradas em médios e baixos níveis. Em latitudes maiores que 30°S as velocidades verticais negativas predominam em toda a atmosfera.

As anomalias de omega são apresentadas na Figura 4.46d. Nota-se que em maior parte da atmosfera predominam anomalias positivas. Entretanto, essas anomalias em sua maioria são produto de velocidades verticais menores que a média climatológica. Por exemplo, as anomalias nas regiões entre ≈ 5°S e 10°N são devido às velocidades verticais negativas observadas no período de 2015 - 2016 serem menores que a climatologia (figura não mostrada). Entre 10°S e 20°S, em médios (< 700mb) e baixos níveis são encontradas anomalias positivas relacionadas a movimentos descendentes anômalos (subsidência anômala) na região, porém, em altos níveis, nessa mesma região as anomalias positivas estão associadas as velocidades verticais ne-

gativas anomalamente menores que a climatologia. Em latitudes acima de 25ºS as anomalias são predominantemente negativas associadas a movimentos ascendentes.

Figura 5.46 - Perfis verticais (lat/lon x omega (Pa/s)) para o terceiro período composto DJF 2014/15 - 2015/16 em 9ºS (paineis a e b) e 41ºW (paineis c e d), entre 1000hPa e 200hPa.

Nos mapas de ISV, IPP e IPPE (Figuras 5.29a, b e c, respectivamente) essas características são apresentadas como áreas com estresse de vegetação associado à secas ou estresse de umidade associados à secas onde são observados movimentos verticais descendentes. Nas regiões de predominância de movimentos ascendentes, em geral, os índices indicam boas saúde da vegetação e índices positivos de IPP e IPPE. Como explicado anteriormente, a atuação de dois eventos El Niño nos anos 2014/15 e 2015/16 influenciou o padrão de circulação atuantes na América do Sul.

Consequentemente, as modificações na circulação afetaram os regimes de precipitação nas regiões do Brasil. No ano 2015 a região Norte enfrentou uma das maiores secas do século. Alguns estudos confirmaram que as porcentagem de área atingida por esse evento de seca alcançou uma expressiva extensão (PANISSET, 2015).

5.5 Discussões e Considerações Finais

Tendo em vista os resultados apresentados nas seções anteriores, constata-se que as características climáticas globais no período do verão (DJF) na última década (2008-2016) apresentaram condições favoráveis à ocorrência de secas em todo o país devido a atuação dos eventos ENOS e de condições anômalas de circulação. No entanto, as áreas atingidas por deficit de vegetação e umidade associadas a seca em todo o Brasil atingiram regiões mais amplas ao longo dos anos desde o início até o fim do período decenal. Isso indica que a expansão dessas áreas de seca estão relacionadas não somente a atuação de eventos de grande escala, como também alterações nos regimes de escala regional ligados a outros fenômenos.

Figura 5.47 - Climatologia do vento (m/s) para DJF sobre a América do Sul em a) 850mb, b) 200mb.

Analisando a climatologia da circulação atmosférica para o período do verão sobre a América do Sul em baixos (850mb) e altos (200mb) níveis é possível notar como a atuação das anomalias de circulação na última década (2008-2016) do período estudado, ligadas ou não a atuação dos ENOS, contribuíram para a expansão das áreas sobre condições de seca no país.

A Figura 5.47a mostra a climatologia da circulação atmosférica no nível de 850mb para DJF. Na configuração nota-se a atuação da Alta Subtropical sobre o oceano Atlântico sul, que contribui para o transporte de umidade para o continente associado ao escoamento de leste dos alíseos de Sudeste. Estes, por sua vez, além de manterem o transporte de umidade que favorecem as chuvas no NEB, confluem com os alíseos de Nordeste nas regiões equatoriais e favorecem a formação da ZCIT, que também contribui para a ocorrência de chuvas para o norte do país. O escoamento meridional de Norte à Leste dos Andes é responsável por transportar umidade para as regiões de latitudes médias e por alimentar a região das ZCAS. Também é perceptível o escoamento de oeste em latitudes acima de 30º, onde atuam os jatos subtropicais que dão suporte para o desenvolvimento de sistemas sinóticos atuantes nessas latitudes.

A Figura 5.47b mostra a climatologia da circulação em 200mb para DJF. A atuação da Alta da Bolívia entre as latitudes de aproximadamente 10ºS e 20ºS, nesse período do ano contribui para os máximos de precipitação nessas regiões. A leste da América do Sul nota-se a região do cavado do Nordeste que contribui para a atuação dos VCANs nessa região. Em latitudes médias nota-se o escoamento de Oeste, sendo essa a região de atuação dos jatos subtropicais que favorecem a atividade ciclogenética e contribuem para que os sistemas frontais proporcionem as chuvas no sul do Brasil.

Sendo assim, considerando as anomalias de circulação global (Figura 5.31b) do primeiro período composto (2007/08 - 2008/09) e, portanto, início da década de estudo, observamos que o impacto do evento de La Niña em grande escala é representado em escala regional pelas anomalias de circulação que influenciam nos regimes de precipitação.

Em baixos níveis (850mb) a anomalia de circulação sobre a América do Sul indica que a região do escoamento meridional a leste dos Andes está enfraquecido. Portanto, o transporte de umidade para as regiões de latitudes médias é afetado, isto diminui os totais pluviométricos nessas regiões. Associado a essa anomalia de circulação no perfil vertical longitudinal de ômega (Figura 5.35c) nota-se em 20ºS movimentos verticais positivos (subsidência) que contribuem para menores volumes de precipita-

ção para a região. No perfil latitudinal em 30ºS (Figura 5.35a), essa região também apresenta velocidades verticais positivas associadas a movimentos descendentes.

Em altos níveis (200mb) as anomalias de circulação (Figura 5.31c) apontam para uma intensificação da Alta da Bolívia assim como para uma expansão de sua área de atuação favorecendo o máximos de precipitação observado nessas regiões durante o verão. Nas regiões de latitudes médias é notável uma circulação ciclônica provavelmente relacionada ao escoamento mais intenso na parte sul da Alta da Bolívia e enfraquecimento do escoamento de Oeste acima de 30ºS. O enfraquecimento do escoamento de Oeste está relacionado também ao enfraquecimento da região dos jatos subtropicais que por sua vez reduz a baroclínica na região e pode modificar as regiões de preferência de ciclogênse (REBOITA et al., 2010).

Enfatiza-se, portanto, que os anos que compõem esse primeiro período composto foram marcados por anomalias em baixos níveis (850mb) no escoamento dos alíseos onde o transporte de umidade das regiões Amazônicas para regiões de latitudes mais altas estava enfraquecido e também por anomalias anticiclônicas nas regiões centrais do país, assim como o enfraquecimento da Alta Subtropical no Atlântico Sul. No nível de 200mb, destacam-se as anomalias anticiclônicas em latitudes baixas, principalmente na região do cavado do Nordeste, que atuou em ambos os anos (DJF 2007/08 e 2008/09). As anomalias anticiclônicas no NEB predominaram nas latitudes entre 10ºS e 20ºS, principalmente no verão de 2008/09. A região da Alta da Bolívia também destaca-se por anomalias anticiclônicas intensas que, juntamente com o enfraquecimento do escoamento dos jatos subtropicais, formou uma anomalia ciclônica nas regiões próximo à 30ºS.

As características encontradas no segundo período composto (2010/11-2013/14) são semelhantes às encontradas no período anteriormente analisado. Em ambos os períodos ocorreram eventos La Niña de fraca ou fortes intensidades de modo que os padrões dos movimentos verticais característicos desse fenômeno na América do Sul são observados nos perfis verticais de omega. Em níveis baixos (850mb) é possível notar o enfraquecimento do escoamento na região do Jato de Baixos Níveis, assim como o escoamento de oeste em latitudes médias que também mostra-se enfraquecido. As anomalias anticiclônicas em baixos níveis, principalmente nas regiões Sul na região da Alta Subtropical refletem o comportamento anômalo do escoamento meridional de Norte (à leste dos Andes) durante os anos que compõem esse composto, principalmente nos verões (DJF) de 2012/13 e 2013/14, onde na região Amazônica as anomalias de vento eram mais intensas. Durante o verão dos quatro anos que fa-

zem parte desse composto, circulações anticiclônicas associadas à atuação anômala da Alta Subtropical predominaram nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. Particularmente, em DJF de 2013/14 a atuação de anomalias anticiclônicas nessas regiões deslocou o escoamento meridional para oeste da região Sul estabelecendo regiões de forte anomalias anticiclônicas desde Minas Gerais/Bahia até Mato Grosso do Sul/Rio Grande do Sul. Essa região está bem marcada nas anomalias desse composto. Nota-se que essas anomalias anticiclônica nessas latitudes são compatíveis com a atuação anômala de uma região de altas pressões encontradas por Coelho et al. (2016a) para o verão de 2014.

Em altos níveis (Figura 5.33c), nota-se que a Alta da Bolívia está deslocada ao sul de sua posição climatológica e uma região ciclônica atua sobre grande parte da porção central e leste do país. Essa região pode estar associada com intensificação dos VCANs e modificação de sua posição climatológica. Além disso, essa região apresentou no verão de 2014 um padrão de onda estacionária que gerou um bloqueio atmosférico anômalo, resultando em um período de seca na região Sudeste do país mencionado anteriormente (COELHO et al., 2016a). Destaca-se que as anomalias ciclônicas atuantes no centro e região Sudeste do país são resultantes principalmente de fortes anomalias ciclônicas atuantes nessas regiões nos verões 2011/12 e 2013/14, assim como enfraquecimento da Alta da Bolívia. Esses resultados também corroboram com os encontrados pelo estudo anteriormente citado, onde em DJF (2013/14) em latitudes acima de 30ºS foram observados anomalias ciclônicas em altos níveis e acima de 30ºS circulações anticiclônicas anômalas que caracterizaram o período de seca enfrentado pela região Sudeste do Brasil neste ano.

Nos perfis de movimentos verticais (Figura 5.41c e Figura 5.42c), essas características são apresentadas por movimentos ascendentes anômalos nas regiões equatoriais e movimentos subsidentes anômalos próximos acima de 20ºS. Nos mapas dos índices de vegetação, precipitação e P-E (Figura 5.25 e 5.27) as regiões que apresentam estresse de vegetação ou de umidade diferem no padrão espacial para cada período acima analisado; apesar de em ambos os períodos as condições climáticas predominantes terem sido eventos La Niña. Em 2007/08 - 2008/09 nota-se que as regiões sob condições de seca concentram-se mais ao sul, enquanto que no segundo período composto (2010/11 - 2013/14) essas regiões abrangem toda costa leste do Brasil. O impacto dessas características anômalas da circulação em baixos e altos níveis nos índices analisados evidencia que a combinação dos eventos La Niña nos primeiros anos do composto (2010/11 e 2011/12) e as anomalias anticiclônicas nos verões dos anos finais da série (2012/13 e 2013/14) contribuíram para a expansão das áreas de

seca notadas nesses anos.

Considerando o terceiro período composto (2014/15 - 2015/16) assim como o verão (DJF) de 2009/10, observa-se que os eventos El Niño atuantes nesses períodos tiveram influência nas áreas sob condições de seca no país na última década (2008-2016). As regiões Norte e Nordeste do Brasil experimentaram secas severas durantes esses anos. No entanto, destacam-se anomalias de circulação que desempenharam papel importante na extensão das áreas de seca. No verão de 2009/10 e 2015/16, anomalias anticiclônicas em baixos níveis predominaram em todo país, assim como na região da Alta Subtropical. Nota-se as anomalias mais intensas na região Norte indicando maior retirada de umidade dessas regiões para regiões de latitudes mais altas, assim como a atuação anômala da Alta Subtropical próximo à costa do Brasil na região Sudeste. Em DJF de 2014/15 essas anomalias estavam particularmente mais intensas, sendo refletida nas anomalias de circulação do composto 2015/16.

As anomalias de circulação em altos níveis (200mb) (Figura 5.32c e Figura 5.34c) parecem ser o fator predominante para os estabelecimento de condições de secas nas regiões Norte do país para os períodos dos verões 2009/10 e 2014/15 - 2015/16. Em ambos os períodos as anomalias de circulação associadas ao El Niño apresentam o padrão de ondas onde um anticiclone anômalo se estabelece nas latitudes médias a sudeste do Brasil e uma circulação ciclônica anômala predomina no NEB. Essa circulação anticiclônica anômala associada com a intensificação dos jatos subtropicais contribui para a manutenção desse padrão de ondas (PEREIRA et al., 2017), onde a circulação ciclônica atua intensificando os VCANs e favorecendo uma região de subsidência na região Nordeste, que devido à circulação anômala de Walker já experimenta movimentos subsidentes associados a deficit de precipitação. Em DJF de 2009/10 destacam-se as circulações anticiclônicas desde a região Sul do Brasil (se estendendo ao oceano) até as regiões Amazônicas, apontando para uma atuação anômala da Alta da Bolívia e dos jatos subtropicais em latitudes médias. Características similares são notadas no composto de anomalias para o terceiro período composto e são notadamente mais intensas em DJF de 2016 (não mostrado), caracterizando assim o padrão de circulação atmosférica que se estabelece em altos níveis nesse período.

Essas características das circulações nos dois níveis atmosféricos (850mb e 200mb) contribuem para as extensas áreas de seca observadas nos mapas dos índices analisados para cada um desses períodos (Figura 5.27 e Figura 5.28). Em ambos os períodos analisados anteriormente as regiões Norte e Nordeste apresentam estresse

de vegetação e de umidade. Nota-se que no período composto que abrange os verões 2014/15 e 2015/16, a extensão das áreas de seca são maiores. A combinação de anomalias anticiclônicas em baixos níveis e o padrão de ondas em altos níveis parecem ser responsáveis por esse aumento das áreas de seca.

Sendo assim, nota-se que as regiões sob condições de seca no país durante o último período decenal (2008-2016) de toda série analisada apresentaram diferentes padrões espaciais que se estabeleceram de acordo com as características climáticas presente em cada período composto observado. Considerando compostos de circulação analisados observa-se que apesar dos eventos ENOS (em ambas as fases) contribuírem para as condições de seca no país, circulações anticiclônicas anômalas atuantes na atmosfera, principalmente nos verões dos últimos anos (2014, 2015 e 2016) do período decenal analisado (DJF 2007/08 - 2015/16) desempenharam papel importante na expansão das áreas sob estresse da vegetação e de umidade associadas à secas mostradas nos mapas dos índices analisados.

6 CONCLUSÃO

Tendo em vista o objetivo principal do trabalho, que constituiu em fazer um diagnóstico das características espaço-temporal das secas no Brasil nas últimas décadas, tem-se que os resultados apresentados pelos índices de vegetação (ISV), precipitação (IPP) e P-E (IPPE), assim como as análises dos campos de circulação, TSM e velocidade vertical (omega), serviram para este propósito. O trabalho procurou diagnosticar as condições espaço-temporais das secas levando em consideração o território brasileiro como um todo ao invés de limitar-se apenas a uma região específica do Brasil como foi o caso de alguns estudos para a região Nordeste ou Norte (BRITO et al., 2017; PANISSET, 2015).

A primeira questão levantada pelo trabalho procurou investigar a ocorrência da expansão espacial e temporal das secas no Brasil nas últimas décadas. Os resultados dos índices de vegetação, precipitação e P-E indicaram um aumento nas áreas atingidas por condições de seca na última década do período analisado.

A série anual do índice de vegetação apresentou um importante aumento das áreas de seca em todo o país ao longo de todos os anos de estudo (1982 - 2015). As séries anuais dos demais índices, no entanto, não reproduziram esse aumento de áreas com deficit de umidade associado à seca. No entanto, as séries anuais de todos os índices analisados apresentaram para o último período decenal (2008 - 2015) este padrão de aumento das áreas afetadas por condições de seca em todos os parâmetros analisados.

As análises para os períodos trimestrais MAM, JJA e SON apresentaram as séries temporais do ISV com tendência de aumento das áreas de seca. Entretanto essas características não foram observadas nas séries trimestrais dos demais índices analisados.

O trimestre DJF destacou-se por apresentar no último período decenal (2008 - 2016) de todos os índices analisados tendência de aumento de áreas com deficit vegetativo e de umidade associado à secas. Nesse ultimo período decenal alguns eventos expressivos de seca ocorreram em todo o país. Na região Amazônica, em 2010 e 2015 ocorreram dois episódios de secas severas (PANISSET, 2015; COELHO et al., 2012). Em 2013/14 a região Sudeste do Brasil também enfrentou um período de seca severa (COELHO et al., 2016a; COELHO et al., 2016b). A região Nordeste também enfrentou um período de seca prolongado desde o início da década (BRITO et al., 2017).

A segunda questão cientifica abordada pelo trabalho refere-se à quais características climáticas podem ter contribuído para a expansão das áreas de seca. As análises das anomalias de TSM indicaram que no verão do último período decenal (2008 - 2016) condições de La Niña e El Niño predominaram em sete dos nove anos analisados. No entanto, anomalias de circulação anticiclônica atuantes na América do Sul, principalmente nos últimos anos da série, favoreceram condições de aumentos das áreas sob condições de seca.

Para documentar e compreender as condições climáticas associadas as condições de seca dessa última década foram realizadas análises de compostos de TSM, circulação atmosférica e movimentos verticais. Essa última década foi dividida em três períodos para a construção de compostos, sendo o ano de 2010 analisado separadamente. As análises dos mapas de TSM determinaram os padrões característicos de cada período composto analisado.

Os resultados para o primeiro período composto (2007/08 - 2008/09) indicou que as áreas sob condições de seca nos mapas dos compostos de ISV (ISV e anomalias de ISV) concentraram-se principalmente em parte da região Nordeste e também na região Sul do país. Os mapas dos compostos de IPP e IPPE confirmaram este padrão espacial além de apresentarem áreas bem mais amplas de regiões sob condições de estresse de umidade. Os mapas de TSM e circulação, assim como os perfis verticais de omega, indicaram ocorrência de La Niña nos dois anos do período, evento este que caracteriza-se por favorecer a ocorrência de secas no Sul do Brasil. Além disso, anomalias de circulação anticiclônica em baixos níveis e em altos níveis atuaram mantendo as áreas de seca nas regiões que apresentam deficit de precipitação em anos de eventos La Niña, no Brasil.

O segundo período composto (2010/11 - 2013/14) também apresentou nos mapas de ISV áreas sob condições de seca concentradas no NEB e em algumas regiões próximo de 20ºS. Nos mapas de IPP e IPPE essas regiões estão presentes como áreas com índices negativos. Além dessas áreas, outras regiões também apresentam índices negativos associados à condições de seca. No composto de TSM observou-se anomalias negativas no Pacífico que, combinado com as anomalias de circulação em baixos e altos níveis confirmaram um cenário de La Niña estabelecido. Em dois anos do período ocorreram eventos La Niña de forte e fraca intensidades, confirmando os padrões de deficit de precipitação e P-E encontrado principalmente nas regiões sul, assim como de ISV. Nos dois últimos anos que compõem a série fortes anomalias anticiclônicas predominaram em baixos níveis nas regiões Centro-Oeste e Sudeste

e em altos níveis anomalias de circulação associada a padrões de ondas anômalos contribuíram para toda extensão de área de seca apresentada nas regiões desde o norte do Nordeste até a região Sudeste.

O terceiro período composto (2014/15 - 2015/16) e o ano 2010 apresentaram padrão espacial de condições de estresse de vegetação e de umidade associado a secas semelhantes. Os mapas de ISV exibiram grades áreas com índices abaixo de 40 (ISV) e índices negativos (IPP e IPPE). Essas áreas, em geral, se concentraram nas regiões ao norte do país. As análises de TSM apresentaram anomalias positivas no Pacífico que associada a anomalias no campo de circulação configuravam eventos El Niño. De fato, nos anos 2010, 2015/16 ocorreram eventos El Niño de fraca e fortíssima intensidade, respectivamente, o segundo episódio (2015/16) foi o mais intenso já registrado. Além disso, neste período composto também nota-se que as anomalias de circulação atuaram favorecendo o aumento das áreas sob condições de seca. Em baixos níveis, nos verões 2014/15 e 2015/16 fortes anomalias de circulação nas regiões nortes do país contribuíram para uma maior retirada de umidade das regiões Amazônicas que nesses anos experimentou secas severas. Em altos níveis anomalias anticiclônicas em latitudes médias e ciclônicas em latitudes próximas ao equador contribuíram para manutenção e aumento das áreas de seca.

Nota-se, portanto, que não somente as condições climáticas associadas ao ENOS contribuíram para o aumento das áreas sob condições de seca nos últimos anos. As análises dos compostos de omega, para cada período/ano, apontam que outras forçantes de diferentes escalas atuantes na atmosfera podem influenciar na origem ou manutenção de condições de seca no país, por exemplo, as condições presentes na atmosfera nos anos 2013/14 que resultaram no período de seca na região Sudeste e estiveram associadas às condições de atividade convectiva anômalas na região da Indonésia e anomalias positivas de TSM no Atlântico sudoeste (COELHO et al., 2016a).

Assim, os resultados das análises realizadas indicaram que as características espaço-temporais de expansão das secas no Brasil nos últimos anos, foram identificadas primeiramente pelo índice de vegetação ISV e posteriormente índices de precipitação (IPP) e de P-E (IPPE). As condições gerais que contribuíram para que os últimos anos do período de estudo tivesse condições de aumento das áreas de seca estão aparentemente relacionadas à atividade dos fenômenos ENOS. Porém outras alterações nas condições da atmosfera, como a atuação anômala de circulações anticiclônicas, também contribuíram para a expansão de área de seca sobre o Brasil

nos últimos anos.

Tais resultados encontrados no trabalho podem ter suas aplicações práticas em diversos setores da sociedade que são afetados diretamente pelos eventos de secas. A relevância desses resultados é evidenciada principalmente nos setores de produção alimentícia (agrícola), gerenciamento dos recursos hídricos, monitoramento dos impactos da evolução da seca em ambientes onde antes não fora afetado por eventos de secas assim como a resiliência dos biomas o são frequentemente. Um limiar que indique o início de condições de seca para determinada região bem como a quantificação das áreas atingidas por secas no país, nos últimos anos, contribuem para um melhor planejamento do uso dos recursos hídricos dessas regiões da mesma forma como para as tomadas de decisões assertivas quanto ao uso do solo para atividades agrícola e agropecuária em um cenário de expansão espacial e temporal dos eventos de seca. Ainda ressalta-se que uma integração das condições de seca associada à uma previsão sazonal aprimorada podem ajudar a diminuir os impactos mais severos das secas com antecedência.

O estudo, portanto, mostra a necessidade de estudos mais aprofundados a respeito da resposta da vegetação à eventos de seca que vêm ocorrendo no Brasil, assim como uma melhor abordagem quanto as regiões de estudo, pois as diferentes características climáticas de cada região do país têm diferentes respostas a períodos de secas diferenciados. Também é importante considerar, para estudos futuros, análises das condições de secas em diferentes tipos de vegetação em contraste com essas condições em uma região mais abrangente como foi tratado neste trabalho. Além disso, considerando que o limiar de ISV < 40 adotado no trabalho representou condições de seca moderada segundo as categorias de classificação de intensidade de eventos de seca determinada por McKee et al. (1993), uma abordagem do índice de vegetação utilizando-se limiares mais baixos do índices de vegetação, como ISV < 20 pode ser útil em trabalhos futuros que tenha por objetivo estudar eventos de seca de maior intensidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, L. O.; MALHI, Y.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LADLE, R.; ARAI, E.; BARBIER, N.; PHILLIPS, O. Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies. **New Phytologist**, v. 187, n. 3, p. 733–750, 2010. Available from: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1469-8137.2010.03355.x>. 8

BECK, H. E.; VAN DIJK, A. I.; LEVIZZANI, V.; SCHELLEKENS, J.; MIRALLES, D. G.; MARTENS, B.; DE ROO, A. MSWEP: 3-hourly 0.25 global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 1, p. 589–615, 2017. 23

BOKUSHEVA, R.; KOGAN, F.; VITKOVSKAYA, I.; CONRADT, S.; BATYRBAYEVA, M. Satellite-based vegetation health indices as a criteria for insuring against drought-related yield losses. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 220, p. 200–206, 2016. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.12.066>. 1, 6, 27

BRASIL, M. D. I. A. N. **Ações para seca no Nordeste contam com recursos de R$ 2,7 bilhões**. [S.l.], 2012. Available from: <http://mi.gov.br/web/guest/area-de-imprensa/todas-as-noticias?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_returnToFullPageURL=%2Fweb%2Fguest%2Farea-de-imprensa%2Ftodas-as-noticias%2F-%2Fasset_publisher%2FYEkzzDUSRvZi%2Fcontent%2Fministro-helder-barbalho-apresenta-na-camara-acoes-para-promover-o-desenvolvimen
3FinheritRedirect%3Dfalse%26&_101_assetEntryId=155767&_101_type=content&_101_urlTitle=acoes-para-seca-no-nordeste-contam-com-recursos-de-r-2-7-bilhoes&_101_redirect=http%3A%2F%2Fmi.gov.br%2Fweb%2Fguest%2Farea-de-imprensa%2Ftodas-as-noticias%3Fp_p_id%3D3%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dmaximized%26p_p_mode%3Dview%26_3_groupId%3D0%26_3_keywords%3DA%25C3%25A7%25C3%25B5es%2Bpara%2Ba%2Bseca%2Bdo%2BNordeste%26_3_struts_action%3D%252Fsearch%252Fsearch%26&inheritRedirect=true>. Access in: abr. 2018. 2, 5

_____. **Dentre os órgãos regionais, o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS se constitui na mais antiga instituição federal**

com atuação no Nordeste. [S.l.], 2013. Available from: <https://www2.dnocs.gov.br/historia>. Access in: abr. 2018. 2

_____. **Governo libera R$ 130 milhões para cidades afetadas pela seca**. [S.l.], 2013. Available from: <http://mi.gov.br/web/guest/area-de-imprensa/todas-as-noticias?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_returnToFullPageURL=%2Fweb%2Fguest%2Farea-de-imprensa%2Ftodas-as-noticias%2F-%2Fasset_publisher%2FYEkzzDUSRvZi%2Fcontent%2Fgoverno-federal-libera-r-3-9-milhoes-para-municipios-afetados-por-desastres-natu 3FinheritRedirect%3Dfalse%26&_101_assetEntryId=1091548&_101_type=content&_101_urlTitle=ministerio-da-integracao-nacional-libera-r-130-milhoes-para-municipios-atingidos-p _101_redirect=http%3A%2F%2Fmi.gov.br%2Fweb%2Fguest%2Farea-de-imprensa%2Ftodas-as-noticias%3Fp_p_id%3D3%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dmaximized%26p_p_mode%3Dview%26_3_groupId%3D0%26_3_keywords%3DGoverno%2BFederal%2Blibera%2BR%2524%2B130%2Bmilh%25C3%25B5es%26_3_struts_action%3D%252Fsearch%252Fsearch%26&inheritRedirect=true>. Access in: abr. 2018. 2, 5

BRITO, S. S. B.; CUNHA, A. P. M. A.; CUNNINGHAM, C. C.; ALVALÁ, R. C.; MARENGO, J. A.; CARVALHO, M. A. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. **International Journal of Climatology**, v. 38, p. 517–529, 2017. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/joc.5225>. 1, 2, 10, 27, 90, 123

CASARIN, D. P.; KOUSKY, V. E. Anomalias de precipitação no sul do Brasil e variações na circulação atmosférica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 1, n. 2, p. 83–90, 1986.

CAVALCANTI, I. F.; KOUSKY, V. E. Drought in Brazil during Summer and Fall 2001 and associated atmospheric circulation features. **Revista Climanálise Ano**, v. 2, n. 01, 2004. 18

CEPED, C. U. D. E. E. P. S. D. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012**. Florianópolis, SC: CEPED UFSC, 2013. 5

CHU, P.-S. Time and space variability of rainfall and surface circulation in the northeast Brazil-tropical Atlantic sector. **Journal of the Meteorological Society of Japan Ser. II**, v. 62, n. 2, p. 363–370, 1984. 16

COELHO, C.; UVO, C.; AMBRIZZI, T. Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over South America during ENSO periods. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 71, n. 3-4, p. 185–197, 2002. 18

COELHO, C. A.; CARDOSO, D. H.; FIRPO, M. A. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in são Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 125, n. 3-4, p. 769–784, 2016. 2, 18, 19, 119, 123, 125

COELHO, C. A.; OLIVEIRA, C. P. de; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; CARPENEDO, C. B.; CAMPOS, J. L. P. S.; TOMAZIELLO, A. C. N.; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, M. de S.; DUTRA, L. M. M.; ROCHA, R. P. D.; REHBEIN, A. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 11-12, p. 3737–3752, 2016. 19, 123

COELHO, C. A. S.; CAVALCANTI, I. A. F.; COSTA, S. M. S.; FREITAS, S. R.; ITO, E. R.; LUZ, G.; SANTOS, A. F.; NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; PEZZA, A. B. Climate diagnostics of three major drought events in the Amazon and illustrations of their seasonal precipitation predictions. **Meteorological Applications**, v. 19, n. 2, p. 237–255, 2012. 1, 2, 84, 123

COHEN, J.; DIAS, M. S.; NOBRE, C. Aspectos climatológicos das linhas de instabilidade na Amazônia. **Climanálise**, v. 4, n. 11, p. 34–40, 1989. 13, 15

COVELE, P. A. Aplicação de índices das condições de vegetação no monitoramento em tempo quase real da seca em Moçambique usando NOAA_ AVHRR- NDVI. **GEOUSP - Espaço e Tempo**, n. 29, p. 85–95, 2011. 1, 6, 10, 27

CUNHA, E. da. **Os Sertões : Campanha de Canudos**. Rio de Janeiro: Laemmert & C., 1902. 5

DEE, D.; BALMASEDA, M.; BALSAMO, G.; ENGELEN, R.; SIMMONS, A.; THÉPAUT, J.-N. Toward a consistent reanalysis of the climate system. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, n. 8, p. 1235–1248, 2014. 23, 24

DOWNING, D.; CLARK, J.; FARIAS, A. A. de. **Estatística aplicada**. [S.l.]: Saraiva, 2010. 32, 33

DUTTA, D.; KUNDU, A.; PATEL, N.; SAHA, S.; SIDDIQUI, A. Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation

Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI). **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 18, n. 1, p. 53–63, 2015. 10

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta amazônica**, v. 28, n. 2, p. 101–101, 1998. 6, 12, 13

GRIMM, A. M. Clima da região Sul do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G.; DIAS, M. A. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Texto, 2009. p. 259–275. 19

_____. Variabilidade Interanual do clima no Brasil. In: CAVALCANTI, I. F.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G.; DIAS, M. A. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Texto, 2009. p. 353–374. 17, 70

GRIMM, A. M.; DIAS, P. L. S. Analysis of tropical–extratropical interactions with influence functions of a barotropic model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, n. 20, p. 3538–3555, 1995. 19

HASTENRATH, S.; GREISCHAR, L. Circulation mechanisms related to northeast Brazil rainfall anomalies. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. D3, p. 5093–5102, 1993. 15

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, n. 435, p. 77–92, 1977. 12

KANE, R. P. Relationship between El Niño timings and rainfall extremes in NE Brazil, São Paulo city and south Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 15, 2000. 16

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 27, n. 4, p. 531–540, 2007. 16

KAYANO, T. M.; ANDREOLI, R. V. Variabilidade decenal a multidecenal. In: CAVALCANTI, I. F.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G.; DIAS, M. A. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Texto, 2009. p. 375–383. 16

KOGAN, F.; GUO, W. 2006–2015 mega-drought in the western USA and its monitoring from space data. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 6, n. 8, p. 651–668, 2015. 1, 9, 10

_____. Early twenty-first-century droughts during the warmest climate. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 7, n. 1, p. 127–137, 2016. 6, 7, 9, 10, 23

KOGAN, F. N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. **Advances in Space Research**, v. 15, n. 11, p. 91–100, 1995. Available from: <https://ac.els-cdn.com/027311779500079T/1-s2.0-027311779500079T-main.pdf?{_}tid=90911f96-380c-494b-852b-ce918ef905ed{&}acdnat=1520018611{_}89d5353d08896d71cb6fe9311385a426>. 8

_____. Global drought watch from space. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 4, p. 621–636, 1997. 2, 6, 9, 27

KOGAN, F. N.; ZHU, X. Evolution of long-term errors in NDVI time series: 1985-1999. **Advances in Space Research**, v. 28, n. 1, p. 149–153, 2001. 23

KOUSKY, V. E.; KAGANO, M. T.; CAVALCANTI, I. F. A review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. **Tellus A**, v. 36, n. 5, p. 490–504, 1984. 16

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, p. 1–13, 2017. Available from: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci{_}arttext{&}pid=S0001-37652017005019115{&}lng=en{&}tlng=en>. 2

MARENGO, J. A.; OLIVEIRA, G. d. Impactos do fenômeno La Niña no tempo e clima do Brasil: desenvolvimento e intensificação do La Niña 1998/1999. In: **Congresso Brasileiro De Meteorologia**. [S.l.: s.n.], 1998. 20

MARKHAM, C. G.; MCLAIN, D. R. Sea surface temperature related to rain in Ceara, north-eastern Brazil. **Nature**, v. 265, n. 5592, p. 320, 1977.

MARTINS, E. S. P. R.; COELHO, C. A. S.; HAARSMA, R.; OTTO, F. E. L.; KING, A. D.; OLDENBORGH, G. van; KEW, S.; PHILIP, S.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. C.; CULLEN, H. A multimethod attribution analysis of the prolonged northeast Brazil hydrometeorological drought (2012–16). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 99, n. 1, p. S65–S69, 2018. Available from: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0102.1>. 1, 2

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, Anaheim, California. **Proceedings...** [S.l.], 1993. v. 17, n. 22, p. 179–183. 23, 28, 126

MOLION, L. C. B. Climatologia dinâmica da região Amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, p. 107–1, 1987. 12, 14, 16

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. d. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 1–10, 2002. 14, 15, 16

NAMIAS, J. Influence of northern hemisphere general circulation on drought in northeast Brazil 1. **Tellus**, v. 24, n. 4, p. 336–343, 1972. 17

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION NATIONAL ENVIRONMENT SATELLITE, DATA, AND INFORMATION SERVICE. **NOAA KLM user's guide with NOAA-N, N Prime, and MetOp supplements**. Asheville, NC, abr. 2014. 2530 p. 7

NOBRE, P. Variabilidade interanual do Atlântico tropical e sua influência no clima da América do Sul. **Revista Climanálise–Edição comemorativa**, v. 10, 1996. 14, 16

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 9, n. 10, p. 2464–2479, 1996. 14

NUNES, L. H.; VICENTE, A. K.; CANDIDO, D. H. Clima da região Sudeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G.; DIAS, M. A. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Texto, 2009. p. 243–258. 18

OLIVEIRA, G. S. d. **Niño e você: o fenômeno climático**. São Jose dos Campos: Transtec, 1999. Pp. 116. 83

OTTO, F. E. L.; COELHO, C. A. S.; KING, A.; PEREZE, E. C.; WADA, Y.; OLDENBORGH, G. J. van; HAARSMA, R.; HAUSTEIN, K.; UHE, P.; AALST, M. van; ARAVÉQUIA, J. A.; ALMEIDA, W.; CULLEN, H. Factors other than climate change, main drivers of 2014/15 water shortage in southeast Brazil. In: HERRING, S. C.; HOERLING, M. P.; KOSSIN, J. P.; PETERSON, T. C.; STOTT, P. A. (Ed.). **Explaining extremes of 2014 from a climate**

perspective. Bolder, Colorado: Bulletin of the American Meteorological Society, 2015. v. 96, p. S35 – S40. 2

PANISSET, J. S. **Utilização de dados de Sensoriamento Remoto para análise de secas na Amazônia no século XXI**. 57 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2015. 1, 6, 9, 10, 27, 86, 90, 116, 123

PANISSET, J. S.; LIBONATI, R.; GOUVEIA, C. M. P.; MACHADO-SILVA, F.; FRANÇA, D. A.; FRANÇA, J. R. A.; PERES, L. F. Contrasting patterns of the extreme drought episodes of 2005, 2010 and 2015 in the Amazon Basin. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 2, p. 1096–1104, 2018. 1

PEREIRA, H. R.; REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T. Características da atmosfera na primavera austral durante o El Niño de 2015/2016. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 293–310, 2017. 120

QUADRO, M. F.; MACHADO, L.; CALBETE, S.; BATISTA, N.; OLIVEIRA, G. d. Climatologia de precipitação e temperatura. **Climanálise (Boletim de Monitoramento e Análise Climática)**, v. 10, 1996. 17

RAHMAN, A.; ROYTMAN, L.; KRAKAUER, N.; NIZAMUDDIN, M.; GOLDBERG, M. Use of vegetation health data for estimation of Aus rice yield in Bangladesh. **Sensors**, v. 9, n. 4, p. 2968–2975, 2009. 22

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. da; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, 2010. 12, 17, 18, 19, 118

REYNOLDS, R. W.; SMITH, T. M.; LIU, C.; CHELTON, D. B.; CASEY, K. S.; SCHLAX, M. G. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 20, n. 22, p. 5473–5496, 2007. 24

SAHA, S.; MOORTHI, S.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S.; TRIPP, P.; BEHRINGER, D.; HOU, Y.-T.; CHUANG, H.-y.; IREDELL, M.; EK, M.; MENG, J.; YANG, R.; MENDEZ, M. P.; DOOL, H. van den; ZHANG, Q.; WANG, W.; CHEN, M.; BECKER, E. The NCEP climate forecast system version 2. **Journal of Climate**, v. 27, n. 6, p. 2185–2208, 2014. 24

SALATI, E.; DALL'OLIO, A.; MATSUI, E.; GAT, J. R. Recycling of water in the Amazon Basin: an isotopic study. **Water Resources Research**, v. 15, n. 5, p. 1250–1258, 1979. 12

SILVA, M. A. F. da; SILVA, M. G. A. J. da. Para entender tempo e clima. In: CAVALCANTI, I. F.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G.; DIAS, M. A. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Texto, 2009. p. 15–22. 11

STÖCKLI, R.; VIDALE, P. L. European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 17, p. 3303–3330, 2004. 7

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; ANGULO, M.; EL KENAWY, A. 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**, v. 11, n. 4, p. 1033–1043, 2010. Available from: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2010JHM1224.1>. 23, 29

VICENTE-SERRANO, S. M.; GOUVEIA, C.; CAMARERO, J. J.; BEGUERÍA, S.; TRIGO, R.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; AZORÍN-MOLINA, C.; PASHO, E.; LORENZO-LACRUZ, J.; REVUELTO, J. et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 1, p. 52–57, 2013. 70

VIRJI, H. A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds. **Monthly Weather Review**, v. 109, n. 3, p. 599–610, 1981. 17

WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. Understanding: The drought phenomenon: the role of definitions. **Water International**, v. 10, n. 3, p. 111–120, 1985. 5

YEVJEVICH, V. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. **Journal of Hydrology**, v. 7, n. 3, p. 353, 1969. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022169469901103>. 2