

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO**

ADRIANA APARECIDA MOREIRA

**ANÁLISE DA SECA/ESTIAGEM NO NORTE DO ESTADO DE MINAS
GERAIS A PARTIR DE DADOS MODIS**

**PORTO ALEGRE - RS
2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO**

ADRIANA APARECIDA MOREIRA

**ANÁLISE DA SECA/ESTIAGEM NO NORTE DO ESTADO DE MINAS
GERAIS A PARTIR DE DADOS MODIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto para obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto

Orientada: Adriana Aparecida Moreira

Orientadores: Dr. Laurindo Antonio Guasselli e
PhD. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

PORTO ALEGRE - RS
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Moreira, Adriana Aparecida

Análise da seca/estiagem no norte do estado de Minas Gerais a partir de dados MODIS. / Adriana Aparecida Moreira. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2016.
[124 f.] il.

Dissertação (Mestrado).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2016.

Orientador(es):Laurindo Antonio Guasselli
Orientador(es):Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

1. Índice de seca. 2. Anomalia padronizada de NDWI. 3. Anomalia de precipitação. I. Título.

CDU 528.8

Catálogo na Publicação
Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS
Renata Cristina Grun CRB 10/1113

FOLHA DE APROVAÇÃO

ADRIANA APARECIDA MOREIRA

ANÁLISE DA SECA/ESTIAGEM NO NORTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS A PARTIR DE DADOS MODIS

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto para obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto

Orientada: Adriana Aparecida Moreira

Orientadores: Dr. Laurindo Antonio Guasselli e
PhD. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Aprovada em: __/__/__

Dr. Anderson Luis Ruhoff
(IPH/UFRGS)

Dra. Denise Cybis Fontana
(PPGSR/UFRGS)

Dr. Humberto Alves Barbosa
(Universidade Federal de Alagoas – UFAL)

Dr. Laurindo Antonio Guasselli (Orientador)
(PPGSR/UFRGS)

PhD. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (Orientador)
(Escola de Engenharia/UFRGS)

“Que braseiro, que *fornaia*
Nem um pé de *prantação*
Por falta d'água perdi meu gado
Morreu de sede meu alazão”

Asa Branca
(Luiz Gonzaga/ Humberto Teixeira)

Dedico à minha mãe querida,
Terezinha (*In Memoriam*),
mulher guerreira, exemplo de
ser humano, exemplo de doação
ao próximo. A melhor pessoa
que Deus me concedeu ter em
minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pela dádiva da vida e pelas bênçãos que sempre tem derramado sobre mim.

À minha mãe (*In Memoriam*), pois esse trabalho não teria se concretizado sem o seu amor e a sua compreensão. Agradeço a você mãe, Terezinha, por mais esta vitória, pois todas em minha vida foram e sempre serão para a senhora.

Aos meus familiares, que compreenderam os motivos da minha ausência.

Aos meus orientadores, que acreditaram em meu trabalho e me apoiaram durante o curso de mestrado. Obrigada professor Laurindo Guasselli. Obrigada por ter acreditado neste trabalho, obrigada por toda a ajuda e orientação. E muito obrigada professor Luiz Carlos, por todo o apoio que recebi, desde o primeiro dia em que cheguei ao Rio Grande do Sul.

Ao professor Anderson Ruhoff, pelas discussões acerca dos índices de seca, pelas muitas sugestões e pelo fornecimento dos dados GRACE.

À toda a equipe GRID, por todo acolhimento e apoio que recebi.

Agradeço ao meu querido Dairan, pela ajuda nas rotinas de processamento das imagens e por todo carinho e compreensão.

Aos meus colegas de Mestrado (Sensorientos) que me fizeram muito mais feliz e acolhida aqui no Sul. Em especial, à Alice Fassoni, por toda a ajuda durante o mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financiamento para realização do Mestrado

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS e aos professores do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR), pelos ensinamentos e oportunidades de crescimento profissional, ofertadas.

RESUMO

MOREIRA, Adriana Aparecida, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Junho de 2016. **Análise da seca/estiagem no norte do Estado de Minas Gerais a partir de dados MODIS.** Orientadores: Dr. Laurindo Antonio Guasselli e PhD. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

A seca que assola o norte de Minas Gerais é um desencadeante de severos impactos socioambientais. Mudanças na distribuição das precipitações, ou mesmo a redução no volume de chuvas é fator suficiente para a desorganização da atividade econômica regional. Neste contexto, este trabalho analisou a distribuição espaço-temporal da seca/estiagem no norte de Minas Gerais, entre 2003 a 2014. A metodologia consistiu na elaboração de série temporal de anomalia padronizada de NDWI utilizando imagens de reflectância MOD13Q1/MODIS. Para a realização das análises utilizou-se como base: os decretos de anormalidade por motivo de seca/estiagem, dados de perdas e danos, de precipitação e de variação de água da subsuperfície das soluções GRACE. Foram realizadas correlações entre NDWI e precipitação e entre anomalia padronizada de NDWI e anomalia de precipitação, considerando dados sem e com 30 dias de defasagem. Foi aplicado teste de médias, teste t de *Student*, para a anomalia padronizada de NDWI e a anomalia de precipitação, em um intervalo de confiança de 95%. Os resultados demonstraram que a anomalia padronizada de NDWI identificou de forma satisfatória três períodos de seca/estiagem na região. Estes corroboram com os dados de decretos de emergência e calamidade pública, sendo observado um maior número de decretos, principalmente, nestes períodos. Dois períodos identificados como de seca/estiagem foram noticiados como de estiagem severa no norte de Minas Gerais. Esse fato corrobora os dados de anomalia padronizada de NDWI com a situação ocorrida na região. O quantitativo de áreas afetadas por seca também evidencia o mesmo período de maiores números de ocorrências de seca/estiagem e deficiência na distribuição da precipitação. No entanto, o emprego de anomalia padronizada de NDWI na identificação seca/estiagem, por si só, pode não ser suficiente para essa identificação, uma vez que, o fenômeno pode ocorrer e causar danos e prejuízos, em meio a uma paisagem verde, como constatado para 2010. As análises estatísticas mostraram que existem correlações com graus de intensidade melhores entre o NDWI e a precipitação com uma defasagem de 30 dias. Fato também observado para os dados de anomalia padronizada de NDWI e anomalia de precipitação, todavia, foram observadas correlações de fraca a moderada. O teste de médias apresentou diferenças entre as médias apenas para o ano de 2014. Apesar de em todos os outros períodos as médias não serem estatisticamente diferentes entre si, foram verificados baixos valores de *p-value*, com excessão do período entre 2008 e 2011, onde são verificados *p-value* entre 0,4 a 0,9. Ainda que os testes estatísticos não apresentaram uma ótima significância, a variação temporal dos dados de anomalia padronizada de NDWI e de anomalia de precipitação evidencia uma relação similar entre esses dados. Por fim, a comparação com dados das soluções GRACE, identificou os mesmos períodos verificados com a anomalia padronizada de NDWI, sendo então, observado que estes dados corroboram entre si na identificação de seca/estiagem no norte de Minas Gerais.

Palavras-Chave: índice de seca; anomalia padronizada de NDWI; anomalia de precipitação.

ABSTRACT

MOREIRA, Adriana Aparecida, Federal University of Rio Grande do Sul, June 2016.
Analysis of drought in the north of Minas Gerais State from MODIS data.
Advisers: Dr. Laurindo Antonio Guasselli and PhD. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

The drought that affects the north of Minas Gerais State causes severe socio-environment impacts. Changes on the precipitation distribution or even the reduction of the raining amount is enough reason for regional disorganization. In this context, this work analyzed the drought spatial-temporal distribution in the north of Minas Gerais State, between 2003 and 2014. The methodology consisted on the elaboration of time series of standardized anomaly NDWI using images of reflectance MOD13Q1/MODIS. For the analysis it was used the following basis: the abnormality decrees caused by drought, damage and losses data, precipitation and the water subsurface range on GRACE solution. Correlations were conducted between NDWI and precipitation, as well as between standardized anomaly NDWI and precipitation anomaly, considering data with and without 30 days of gap. It was applied average test, the Student t-test, for the standardized anomaly NDWI and precipitation anomaly, with a confidence range of 95%. Results demonstrated that standardized anomaly NDWI satisfactorily identified three seasons of drought in this region. It corroborates with emergency decrees and public calamity data, in what it was observed a higher number of decrees, especially in these periods. Two seasons identified as drought were reported as severe drought in the north of Minas Gerais State. This fact validates the standardized anomaly NDWI data with the situation occurred in the region. The quantity of affected areas drought, also evidences the same period of larger numbers of occurrences drought and disability in the distribution of precipitation. However, the use of standardized anomaly NDWI by itself on the identification of drought may not be enough evidence for this association, since the phenomenon can occur and cause damages and losses among a green landscape, as seen in 2010. Statistical analysis demonstrated that there are correlations with better intensity degrees between the NDWI and the precipitation with a gap of 30 days. This fact was also observed for the standardized anomaly NDWI and precipitation anomaly data, however, mild to moderate correlations were observed. Student t-test demonstrated differences between the averages only for the year of 2014. Despite for all other periods averages were not statistically different, they were observed p-value low values, with the exception of the period between 2008 and 2011, which are verified p-value between 0.4 and 0.9. Although statistical tests did not demonstrated a great significance, the temporal variation of standardized anomaly NDWI data and precipitation anomaly evidenciate a similar relationship between these data. Lastly, the comparison with data from GRACE solutions, identified the same periods verified with the standardized anomaly NDWI, being then observed that these data corroborates between them in the identification of draught in the north of Minas Gerais State.

Key-words: drought index; standardized anomaly NDWI; precipitation anomaly.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Delimitação do Semiárido Brasileiro	17
Figura 2: Climograma da região norte de Minas Gerais entre 1980 a 2014	18
Figura 3: Localização do norte de Minas Gerais e suas microrregiões.....	31
Figura 4: Área de incidência de seca no Semiárido Brasileiro	32
Figura 5: Hidrografia do norte de Minas Gerais	33
Figura 6: Temperatura Média Anual do norte de Minas Gerais	34
Figura 7: Isoietas da precipitação média anual do norte de Minas Gerais, de 1960 a 1990.....	34
Figura 8: Biomas do norte de Minas Gerais	35
Figura 9: Fertilidade do Solo do norte de Minas Gerais	37
Figura 10: Localização das estações pluviométricas da Agencia Nacional de Águas (ANA) no norte de Minas Gerais.....	40
Figura 11: Fluxograma Metodológico	42
Figura 12: Regiões homogêneas quanto à variabilidade temporal do NDVI, entre 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais	48
Figura 13: Mapeamento da Cobertura Vegetal no norte de Minas - 2009.....	49
Figura 14: Distribuição temporal dos dados de precipitação médio mensal do satélite TRMM e das estações pluviométricas da ANA	51
Figura 15: Gráficos de dispersão entre os dados de precipitação do satélite TRMM e das estações pluviométricas da ANA.....	52
Figura 16: Variabilidade Temporal do NDWI, período de 2003 a 2014, para a região norte de Minas Gerais	54
Figura 17: Variação da anomalia padronizada de NDWI, período de 2003 a 2014, para o norte de Minas Gerais	56
Figura 18: Número de declarações de anormalidade devido a seca ou estiagem, período de 2003 a 2014, nos municípios do norte de Minas Gerais	57
Figura 19: Declarações de anormalidade, por mês, devido a seca ou estiagem, período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais	58
Figura 20: Espacialização do número de decretos de anormalidade por motivo de seca/estiagem, entre 2003 a 2014, nos municípios do norte de Minas Gerais....	59
Figura 21: Variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e da	

precipitação TRMM.....	60
Figura 22: Variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e do número de declarações de situação de emergência e calamidade pública	60
Figura 23: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2003, no norte de Minas Gerais	62
Figura 24: Distribuição da precipitação do ano de 2003 e a precipitação média, período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais	63
Figura 25: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2007, no norte de Minas Gerais	64
Figura 26: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2008, no norte de Minas Gerais	65
Figura 27: Distribuição da precipitação do ano de 2007 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais	66
Figura 28: Distribuição da precipitação do ano de 2008 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais	66
Figura 29: Distribuição da precipitação do ano de 2010 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais	67
Figura 30: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2010, no norte de Minas Gerais	69
Figura 31: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2012, no norte de Minas Gerais	70
Figura 32: Distribuição da precipitação do ano de 2012 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais	71
Figura 33: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2013, no norte de Minas Gerais	72
Figura 34: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2014, no norte de Minas Gerais	73
Figura 35: Distribuição da precipitação do ano de 2013 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais	74
Figura 36: Distribuição da precipitação do ano de 2014 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais	74
Figura 37: Gráfico do quantitativo de áreas afetadas negativamente pela anomalia padronizada de NDWI entre 2003 a 2014 no norte de Minas Gerais..	75
Figura 38: Variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e anomalia de precipitação para a Classe Campo	77

Figura 39: Variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e anomalia de precipitação para a Classe Campo Cerrado	77
Figura 40: Variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e anomalia de precipitação para a Classe Cerrado	78
Figura 41: Variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e anomalia de precipitação para a Classe Floresta Estacional Decidual	78
Figura 42: Variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e anomalia de precipitação para a Classe Outros	78
Figura 43: Variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e variação da água da subsuperfície das soluções GRACE, no norte de Minas Gerais	83
Figura A. 1: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2004, no norte de Minas Gerais	101
Figura A. 2: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2005, no norte de Minas Gerais	102
Figura A. 3: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2006, no norte de Minas Gerais	103
Figura A. 4: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2009, no norte de Minas Gerais	104
Figura A. 5: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2011, no norte de Minas Gerais	105
Figura A. 6: Distribuição da precipitação do ano de 2004 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais	105
Figura A. 7: Distribuição da precipitação do ano de 2005 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais	106
Figura A. 8: Distribuição da precipitação do ano de 2006 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais	106
Figura A. 9: Distribuição da precipitação do ano de 2009 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais	107
Figura A. 10: Distribuição da precipitação do ano de 2011 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Categorização dos valores de PDSI	13
Tabela 2: Categorização dos valores de SPI	14
Tabela 3: Categorização dos valores de Anomalia Padronizada de NDWI.....	43
Tabela 4: Coeficiente de determinação (R^2) e Erro padrão para os dados de precipitação do TRMM e das estações pluviométricas da ANA	53
Tabela 5: Anos de ocorrência do Fenômeno ENOS	56
Tabela 6: Quantitativo das áreas afetadas por anomalias negativas de vegetação, correspondentes ao somatório das classes; moderadamente, severamente e extremamente seco; da anomalia padronizada de NDWI.....	76
Tabela 7: Resultados dos testes de correlação entre dados de NDWI e Precipitação, anomalia padronizada de NDWI e precipitação e anomalia de precipitação, para a classe Campo	79
Tabela 8: Resultados dos testes de correlação entre dados de NDWI e Precipitação, anomalia padronizada de NDWI e precipitação e anomalia de precipitação, para a classe Campo Cerrado.....	80
Tabela 9: Resultados dos testes de correlação entre dados de NDWI e Precipitação, anomalia padronizada de NDWI e precipitação e anomalia de precipitação, para a classe Cerrado	80
Tabela 10: Resultados dos testes de correlação entre dados de NDWI e Precipitação, anomalia padronizada de NDWI e precipitação e anomalia de precipitação, para a classe Floresta Estacional Decidual	81
Tabela 11: Resultados dos testes de correlação entre dados de NDWI e Precipitação, anomalia padronizada de NDWI e precipitação e anomalia de precipitação, para a classe Outros	81
Tabela 12: Resultado da análise de teste t de <i>Student</i> para as Regiões homogêneas, no norte de Minas Gerais.	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AVADAN	Avaliação de Danos
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CEPEP	Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres
CERES	Clouds and Earth's Radiant Energy System
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CSR	Center of Space Research
DLR	German Aerospace Center
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural
ENOS	El Niño Oscilação Sul
EOS	Earth Observing System
EVI	Enhanced Vegetation Index
FIDE	Formulário de Informações do Desastre
GFZ	Geo Forschungs Zentrum
GPS	Global Positioning System
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
HDF	Hierarchy Data Format
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEF	Instituto Estadual de Florestas
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISODATA	Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
LAT/LONG	Latitude/Longitude
LIS	Lightning Imaging Sensor
LST	Land Surface Temperature
JAXA	National Space Development Agency of Japan
JPL	Jet Propulsion Laboratory
MI	Ministério da Integração Nacional
MIR	Mid-Infrared
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MRT	Modis Reprojection Tool
NASA	National Aeronautics and Space Agency
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
NIR	Near Infrared
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NOPRED	Notificação Preliminar de Desastre
PDSI	Palmer Drought Severity Index
PR	Precipitation Radar
SPI	Standardized Precipitation Index
SUDENE	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
TCI	Temperature Condition Index
TMI	Microwave Imager
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
TSDI	Total Storage Deficit Index
TSM	Temperatura da Superfície do Mar

TWS	Terrestrial Water Storage
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VCI	Vegetation Condition Index
VIRS	Radiômetro na Faixa do Visível e do Infravermelho
ZEE/MG	Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo Geral.....	3
1.1.2 Objetivos Específicos	3
2 REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 Seca e Estiagem	4
2.2 Ocorrências de Secas	6
2.3 Tipos de Seca	9
2.4 Índices de Seca.....	10
2.4.1 Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)	10
2.4.2 Índice de Precipitação Padronizada (SPI).....	13
2.5 Fenômeno <i>El Niño</i>	15
2.6 Seca e Estiagem no norte de Minas Gerais.....	16
2.7 Sensoriamento Remoto para monitoramento de secas	20
2.7.1 Índice de Vegetação da Diferença Normalizado (NDVI) e Índice de Vegetação Melhorado (EVI).....	21
2.7.2 Índice de Água da Diferença Normalizada (NDWI).....	24
2.7.3 <i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i> (TRMM).....	25
2.7.4 Missão GRACE	27
2.8 Sensor MODIS.....	29
3 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	31
4 MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1 Materiais	38
4.1.1 Dados de Índice de Água da Diferença Normalizada (NDWI) e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI).....	38
4.1.2 Dados de precipitação do produto 3B43 do satélite TRMM	39
4.1.3 Dados de precipitação das estações pluviométricas da ANA.....	39

4.1.4 Dados de Variação de água da subsuperfície - GRACE.....	40
4.1.5 Dados da Defesa Civil	40
4.1.6 Dados Reportados	41
4.2 Métodos	42
4.2.1 Geração de série Temporal de Anomalia Padronizada de NDWI	42
4.2.2 Identificação de períodos de seca/estiagem	44
4.2.3 Quantificação das áreas afetadas por secas/estiagem	44
4.2.4 Anomalia Padronizada de NDWI e a relação com os dados de precipitação, anomalia de precipitação e armazenamento de água	45
4.2.4.1 Definição de Classes homogêneas	45
4.2.4.2 Precipitação - TRMM	46
4.2.4.3 Testes de correlação e de médias	46
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
5.1 Classes homogêneas quanto a variabilidade temporal de NDVI.....	48
5.2 Qualidade dos dados de Precipitação – TRMM	50
5.3 Distribuição Espaço-Temporal do NDWI médio mensal	53
5.4 Períodos de seca/estiagem e a sua relação com o <i>El Niño</i>	55
5.5 Decretações de anormalidade por seca/estiagem.....	57
5.6 Distribuição Espaço-Temporal de seca/estiagem por meio da anomalia padronizada de NDWI.....	60
5.7 Análise comparativa dos dados de anomalia padronizada de NDWI, anomalia de precipitação e dados GRACE	77
6 CONCLUSÕES.....	85
REFERÊNCIAS.....	87
ANEXOS.....	101

1 INTRODUÇÃO

A seca é um fenômeno natural, de caráter complexo, que afeta diversas regiões do mundo, causando impactos sociais, ambientais e econômicos. As secas, muitas vezes são caracterizadas pelo déficit de precipitação pluvial, durante um período prolongado, causando impactos, nas ordens, ambiental, social e econômica.

Em comparação com outros desastres naturais, a seca, afeta uma maior área geográfica, se desenvolve de forma lenta, e é de difícil determinação de seu início e término. Além disso, as medidas empregadas na mitigação de impactos de outros desastres naturais, muitas vezes não são aplicáveis quando se trata de secas.

As estiagens também são definidas pelo déficit de precipitação pluvial aos níveis inferiores aos normais, mas em uma intensidade e um período menor que em uma seca. As estiagens ocorrem em uma maior frequência quando comparada às secas e, atingem geralmente regiões economicamente mais importantes. Em alguns trabalhos, como no atlas brasileiro de desastres naturais do CEPED (Centro Universitário de Pesquisas sobre Desastres) utiliza-se o termo seca/estiagem, quando se trata deste desastre.

Existem estudos que apontam uma maior frequência de ocorrências de secas na maioria das regiões do mundo. Secas de caráter de curta duração serão mais frequentes e secas longas, de doze meses ou mais, serão cada vez mais comuns até o final do século XXI.

No âmbito do Brasil foi verificado que o número de ocorrências de secas e estiagens vem aumentando. Em um período de vinte e dois anos aconteceram nos últimos onze anos, 70% das ocorrências deste fenômeno no Brasil.

Neste contexto, de aumento do número de ocorrências de seca, com significativos impactos que podem ser causados pela ocorrência deste fenômeno sobre uma sociedade, torna-se cada vez mais necessária a sua investigação e monitoramento. A partir da visão sinóptica proporcionada pelas imagens de satélite é possível compreender a dinâmica da vegetação, bem como o monitoramento das estações chuvosas e secas de uma determinada região e desta forma subsidiar informações que possam auxiliar na redução dos impactos e na definição das estratégias de mitigação de eventos de seca.

O uso de dados de sensoriamento remoto com o objetivo de monitoramento de seca, de análise da sua distribuição espaço-temporal e de compreensão de sua dinâmica, vem se apresentando como um potencial para essas abordagens.

Os dados provenientes do sensor MODIS, a bordo do satélite TERRA, tem sido comumente empregado na análise da dinâmica da cobertura terrestre, pois possuem uma resolução temporal e espacial que viabiliza o acompanhamento das mudanças da cobertura terrestre. O sensor MODIS fornece uma base de dados contínua que pode ser empregada no desenvolvimento de metodologias para a análise espaço-temporal da seca.

O sensor MODIS disponibiliza índices de vegetação em seus produtos, como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*), além de imagens de reflectância, que podem ser utilizadas para composição de outros índices de vegetação, como o NDWI (*Normalized Difference Water Index*).

O NDWI possui alta correlação com o conteúdo de água na vegetação e devido a essa característica, o índice se apresenta como promissor para estudos de compreensão e monitoramento do estresse hídrico da vegetação.

Muitos estudos empregam séries temporais de dados de índice de vegetação para o estudo de secas e estiagens ao redor do mundo; sejam NDVI, NDWI ou EVI, por exemplo. Esses estudos são essenciais para uma melhor compreensão da ocorrência de secas e estiagens, de forma a propor metodologias de monitoramento e de acompanhamento de sua intensidade e extensão. Em alguns estudos ainda são integrados outros dados, também provenientes de sensoriamento remoto, como dados temperatura da superfície terrestre e dados de precipitação.

A análise de anomalias da vegetação, também vem sendo comumente utilizada em estudos de secas e estiagens. Os dados em forma de anomalia visam o estabelecimento das condições normais da vegetação e por meio destas condições normais pode ser analisada a caracterização das condições da vegetação em relação ao padrão normal.

No âmbito do norte de Minas Gerais, não são observados muitos desses estudos com utilização de dados de sensoriamento remoto voltados à análise de seca e estiagens. A região faz parte, parcialmente, do semiárido brasileiro e está sujeita a frequentes ocorrências de secas e estiagens, que impactam a sociedade, principalmente nas áreas rurais.

A seca que ocorre no norte de Minas Gerais desencadeia severos impactos socioambientais. Mudanças na distribuição das precipitações nessa região, ou mesmo a redução no volume de chuvas, se torna fator suficiente para a desorganização das atividades, causando impactos sociais, ambientais e econômicos.

Neste sentido, entender a dinâmica dos eventos de seca; seu início, intensificação, término e extensão; pode auxiliar no monitoramento e subsídio de informações para a mitigação dos impactos associados às secas nessa região. Esse estudo também pode contribuir para que os efeitos das secas possam ser minimizados, quando Governo e o setor produtivo estão cientes de sua intensidade e extensão, e consequentemente podem tomar as providências necessárias. Além disso, o uso de dados de sensoriamento remoto permite uma abordagem sistemática e em escala regional, de baixo custo, que possibilita a compreensão da dinâmica desse fenômeno no norte de Minas Gerais, gerando dados e informações que podem fomentar a tomada de decisão dos gestores.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a variabilidade espaço-temporal da seca/estiagem no norte de Minas Gerais, a partir de dados do sensor MODIS.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Gerar série temporal de anomalia padronizada de NDWI por meio de imagens de reflectância do sensor MODIS;
- Identificar períodos de seca/estiagem significativos entre 2003 a 2014;
- Quantificar as áreas de seca/estiagem estimadas pela anomalia padronizada de NDWI;
- Relacionar os dados de anomalia padronizada de NDWI com dados anomalia de precipitação e dados de decretação de anormalidade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Seca e Estiagem

A seca se caracteriza por ser um fenômeno natural, complexo e de caráter recorrente, ocorre em praticamente todas as regiões climáticas do Globo (WILHITE e SVOBODA, 2000). A seca tem sua origem baseada em condições meteorológicas e climatológicas, podendo ocorrer em regiões tanto de baixa quanto de alta precipitação (CUNHA, 2008).

O estabelecimento de uma definição universal para a seca aplicável a todas as abordagens é de difícil formulação (BHUIYAN, 2004; BLAIN e BRUNINI, 2005). No entanto, a seca pode ser entendida como um evento climático que causa redução da disponibilidade hídrica, perdas econômicas e impactos sociais (THENKABAIL *et al.*, 2004). Desta forma, a seca se apresenta como uma consequência de uma redução natural na quantidade de precipitação recebida durante um período prolongado de tempo (WILHITE e SVOBODA, 2000).

A duração da escassez de água também é usada para a definição de seca. Santos (1998) enfatiza que a seca ocorre em situações de escassez hídrica de longa duração, abrangendo extensas áreas, com consequentes impactos negativos nas atividades econômicas e nos ecossistemas.

Conforme Bhuiyan (2004), a seca se diferencia de outros fenômenos naturais por acontecer de forma lenta e ser de difícil determinação do seu início e término. Devido a ser um processo lento, muitas vezes por não chamar atenção das comunidades mundiais tem seus impactos persistindo mesmo após o seu término.

De acordo com Castro (2003), o fenômeno da seca, enquanto desastre, não ocorre em regiões onde as precipitações são reduzidas em caráter permanente, uma vez que, nestas situações a sociedade e a biocenose estão adaptadas às condições climatológicas adversas. No entanto, em regiões onde a sociedade e a biocenose estão adaptadas aos períodos de pluviosidade, estas serão vulneráveis às reduções cíclicas das precipitações.

As estiagens, assim como as secas, também são o resultado de redução das precipitações pluviométricas, do atraso dos períodos chuvosos ou da ausência de chuvas previstas para uma determinada temporada. As estiagens estão relacionadas com a

queda dos índices pluviométricos para níveis sensivelmente inferiores aos da normal climatológica, comprometendo as reservas hidrológicas e causando prejuízos à agricultura e à pecuária. Em comparação com os eventos de seca, as estiagens se apresentam menos intensas e ocorrerem durante períodos de tempo menores. A estiagem produz severos impactos sobre a agricultura e a pecuária, pois esta ocorre com relativa frequência em áreas mais produtivas e de maior importância econômica que as áreas que são atingidas por secas (CASTRO, 2003).

A forma crônica da estiagem é denominada seca e esta é atualmente considerada como um dos desastres naturais de maior ocorrência e impacto no mundo, ocorrendo durante longos períodos, afetando extensas áreas (KOBAYAMA *et al.*, 2006)

De acordo com Castro (2003), para a definição do estabelecimento de uma estiagem em uma determinada região, algumas características são observadas. Sendo que a estiagem será considerada existente quando há um atraso superior a quinze dias do início do período chuvoso e quando as médias das precipitações mensais dos meses chuvosos permanecem inferiores a 60% das médias mensais ao longo período, da região considerada.

Ainda conforme Castro (2003), no que se refere aos impactos ocasionados pela estiagem, estes resultam da relação entre eventos naturais e as atividades socioeconômicas desenvolvidas na região afetada pelo fenômeno. Desta forma, a intensidade dos danos causados, se configura de forma proporcional à magnitude do evento e ao grau de vulnerabilidade da população ao evento.

Neste trabalho adotou-se a denominação dos eventos aqui estudados, como seca/estiagem, pois não se pretende a diferenciação de ambos eventos em termos de duração e intensidade dos fenômenos. Além disso, a adoção dos termos neste trabalho tem como base a denominação empregada nos atlas brasileiro de desastres desenvolvidos pelo Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres (CEPED) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que adota a denominação seca/estiagem no volume de Minas Gerais.

2.2 Ocorrências de Secas

Ocorrências de seca são registradas em diversas partes no mundo, causando impactos ambientais e socioeconômicos, afetando a disponibilidade hídrica e a produção de alimentos.

Na América do Norte, Gu *et al.* (2008) enfatizam que as secas são os desastres que causam mais prejuízos em termos econômicos nos Estados Unidos. Neste sentido, grandes esforços são realizados para o monitoramento deste fenômeno, a fim de entender a sua dinâmica e para promover o seu monitoramento.

No Canadá, nos dois últimos séculos sofreu com a incidência de cerca de 40 secas de longa duração. Além disso, em algumas regiões foram observadas a ocorrência de secas plurianuais (MISHRA, 2010).

Em 1988 ocorreu nos Estados Unidos uma seca de grande intensidade. Esta seca causou impactos graves na vegetação e atingiu cerca de 25% do território do país. Os impactos desta grande seca atingiu, principalmente, a produção agrícola, acarretando grandes perdas econômicas (KOGAN, 1997).

Em relação a esse fenômeno na Ásia, nas últimas décadas, foi verificado o registros de impactos significativos em alguns países, decorrentes de ocorrência de secas. (MISHRA, 2010).

No sul da Ásia, conforme Thenkabail *et al.* (2004) as secas são recorrentes, causando impactos, principalmente, na disponibilidade de água, perdas econômicas e impactos sociais. Entre o período dos anos 2000 a 2003 essa região sofreu com a incidência de uma seca que afetou mais de 100 milhões de pessoas.

Na China a seca se configura como um dos desastres naturais de maior ocorrência, sendo aquele que atinge uma maior área geográfica e causam grandes perdas agrícolas (LI, 2000).

Na província de Shandong, também na China, foi verificado que esta é frequentemente afetada por fenômenos naturais, entre eles, as secas. A economia da região é baseada na agricultura, e os eventos de seca causam sérios impactos econômicos. Em 2010 ocorreu na região desta província um dos principais eventos de seca dos últimos 50 anos na região, com significativos impactos para a população (DU *et al.*, 2013).

Na África as ocorrências de seca também são frequentes e causam graves impactos sociais, principalmente em relação a oferta de alimentos para a população. Os períodos de ocorrência deste fenômeno no continente africano datam desde o século passado, com incidência de graves secas (MISHRA, 2010).

Na região da África oriental, que também está sujeita a eventos como as secas, no final dos anos setenta e oitenta, sofreu com a incidência de secas que causou sérios impactos, causando fome generalizada e dificuldade econômicas em muitos países (AMBENJE, 2000).

Em países como Zimbábue e Etiópia, as secas afetam gravemente a produção de alimentos. Em Zimbábue as secas podem ocorrer em qualquer parte do país, principalmente durante a estação de crescimento das produções agrícolas, causando a perda de colheitas. Na Etiópia, desde o início de 1970, uma série de incidências de secas intensas afetou o país, causando danos consideráveis às culturas agrícolas e na economia, que depende principalmente da agricultura (KOGAN, 1997).

Em relação ao continente europeu, tem sido verificado que houve ocorrências de secas nos últimos anos em várias porções do continente, como no norte da Europa, na porção ocidental e, em alguns anos, atingindo grande extensão da Europa (MISHRA, 2010).

Na Ucrânia, ao sul da Europa, com sua economia baseada na agricultura, sofre severos impactos ocasionados pela frequente incidência de secas. Eventos de secas de grande magnitude, consideradas catastróficas, podem ocorrer neste país uma vez a cada 60 ou 80 anos. E as secas abrangem cerca de 20 até 60% da área deste país e podem causar uma diminuição de 20 a 50% do rendimento agrícola (KOGAN, 1997).

Além da ocorrência de secas em várias partes do mundo, Dai (2011), sugere que no futuro continuarão a ocorrência desse fenômeno no âmbito mundial. Alguns modelos de simulações indicam uma menor umidade do solo sobre a maior parte da Terra, para o final do século XXI. Os modelos também indicam que as ocorrências de secas com duração entre quatro a seis meses terão uma maior frequência e secas de longa duração, com mais de doze meses, se tornarão mais comuns até o final do século.

No âmbito da América do Sul, as ocorrências também são significativas. Em 2005 e 2010, a bacia do Rio Amazonas sofreu com a incidência de uma grave seca (DOUGHTY *et al.*, 2015). Além disso, conforme Anderson *et al.* (2015) o período de

2003 a 2013 foi importante em termos de ocorrência de secas na Amazônia, no Cerrado e em áreas agrícolas no Brasil.

Nestes últimos anos, o Brasil tem experimentado grandes eventos de seca causando significativos impactos. Essas ocorrências desencadearam um maior interesse e preocupação na comunidade científica em estudar esse fenômeno no Brasil. Isso se deve a grande importância deste país na produção e exportação, de milho, soja e algodão.

As secas ocasionadas no Brasil nos últimos anos foram significativas na Amazônia durante 2005 e 2010, e no nordeste do Brasil em 2012 e 2013.

Conforme CEPED (2013), o número de ocorrência de secas e estiagens no Brasil vem aumentando. Em um período de 22 anos de registros, de 1991 a 2012, foi constatado que 30% das ocorrências ocorreram nos primeiros onze anos e no segundo período, onze anos, ocorreram 70% das ocorrências de secas e estiagens.

Neste sentido, no âmbito do cenário brasileiro, o estudo das secas se torna importante, uma vez que, os dados e informações gerados por meio destes estudos podem promover o melhor planejamento e gestão dos recursos hídricos, de forma a garantir a sua disponibilidade em ocorrências de secas.

Além disso, devido à importância econômica do país em termos de produção agrícola, a geração de informações sobre as ocorrências de secas se apresentam de grande importância para fomentar ações que visam a mitigação dos impactos e perdas econômicas.

Conforme Anderson *et al.* (2015), no Brasil, atualmente existem poucas instituições federais que fornecem informações acerca das condições de seca no país, em escala nacional. Além disso, grande parte do monitoramento realizado depende de dados de estações pluviométricas, com algumas limitações de densidade, principalmente, na região norte do país.

Neste contexto, o potencial uso de dados derivados de sensoriamento remoto apresenta-se como uma alternativa promissora, a contribuir no monitoramento de ocorrências de seca, no Brasil, de forma a fomentar informações que possam ser úteis no planejamento e gestão dos recursos hídricos durante as secas e ainda que possam ser utilizados para a mitigação dos impactos decorrentes das secas.

2.3 Tipos de Seca

Vários autores ressaltam que a seca pode ser definida de acordo com alguns tipos; como meteorológicas, hidrológicas, agrícolas e socioeconômicas (MCKEE *et al.*, 1993; PANU e SHARMA, 2002; WMO, 2006; FERNANDES *et al.*, 2009).

A seca meteorológica de acordo com Mckee *et al.* (1993); Fernandes *et al.* (2009) e Sousa Júnior *et al.* (2010), acontece em todas as regiões climáticas da Terra, sendo caracterizada por uma condição anormal e recorrente, pelo déficit da precipitação em relação ao valor normal e para sua definição são utilizados somente dados de precipitação.

A seca agrícola pode ser definida pela disponibilidade hídrica no solo para o desenvolvimento das culturas, e está diretamente relacionada com a combinação das secas meteorológicas e hidrológicas (PANU e SHARMA, 2002; FERNANDES *et al.*, 2009). O déficit de umidade no solo depende de vários fatores que afetam as secas meteorológicas e hidrológicas, juntamente com as diferenças entre evapotranspiração real e evapotranspiração potencial. Como consequência desse tipo de seca tem-se as quebras de safras (MISHRA e SINGH, 2010).

De acordo com Blain e Brunini (2005) e WMO (2006), a seca hidrológica se baseia na deficiência no volume de água disponível, sendo definida de acordo com os dados de disponibilidade e taxas de consumo baseado no abastecimento normal do sistema. Acontece quando há um período prolongado de déficit de precipitação, e tem duração maior quando comparada a seca meteorológica.

Já a seca socioeconômica, caracterizada por seus potenciais impactos nas atividades humanas e de ocorrência quando o déficit hídrico induz a falta de bens ou serviços, devido a um volume de água inadequado, resultante de uma má distribuição das chuvas (SANTOS, 1998; FERNANDES *et al.*, 2009). Devido aos impactos causados nas atividades antrópicas e na escassez de água para as atividades básicas, as populações ao serem atingidas pela seca, denominada socioeconômica, podem ser submetidas a uma situação de vulnerabilidade. A seca socioeconômica difere dos outros três tipos de seca, devido a que sua ocorrência depende dos processos de oferta e demanda para identificar e classificar as secas (SOUZA JUNIOR *et al.*, 2010).

2.4 Índices de Seca

Para a compreensão da severidade da seca e seus impactos associados, utilizam-se de vários índices e indicadores para quantificar, padronizar e comparar a seca em base temporal e regional.

Os índices de seca são equações que assimilam vários anos de variáveis meteorológicas e procedimentos estatísticos para a identificação do seu início, do término e da intensidade do evento (BLAIN e BRUNINI, 2005; FERNANDES *et al.*, 2009).

Esses índices têm como objetivo sintetizar informações acerca de condições de baixa pluviosidade e os seus efeitos associados, variando em grau de complexidade, desde uma simples medida de seca meteorológica, verificando os desvios de precipitação em relação à normal climatológica, a índices mais complexos, como aqueles que utilizam diversas variáveis, como a relação água-planta e umidade do solo, entre outros, em sua formulação (SILVA, 2013).

Dois eficazes índices de seca são amplamente utilizados na análise, investigação e monitoramento de eventos de seca, o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI), proposto por Palmer (1965) e o índice padronizado de precipitação (SPI), proposto por Mckee *et al.* (1993) (HAYES *et al.*, 1999; BLAIN e BRUNINI, 2005; BLAIN, 2010; MACEDO *et al.*, 2010). Ambos os índices utilizam em sua formulação dados meteorológicos.

Conforme Du *et al.* (2013), em comparação com esses índices que utilizam dados meteorológicos, os índices de seca derivados de dados de sensoriamento remoto são mais adequados para as condições de monitoramento de seca de forma espacial.

A alternativa do uso de dados de sensoriamento remoto para o monitoramento de secas se justifica pelo maior alcance que esses dados possuem, cobrindo áreas, que muitas vezes não possuem uma densidade de estações meteorológicas suficientes.

2.4.1 Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)

O índice de severidade de seca de Palmer (*Palmer Drought Severity Index* – PDSI), proposto por Palmer (1965), de acordo com MA *et al.* (2014) é um marco no desenvolvimento de índices de seca. Para o seu desenvolvimento, considera-se que o

total de precipitação pluvial é dependente da média de variáveis meteorológicas e das condições hídricas dos meses antecedentes, de forma a manter uma região em condições hídricas adequadas (BLAIN, 2005). Este índice tem como base o balanço hídrico, considerando a precipitação, a evapotranspiração e as características do solo, e considera uma série de fatores que podem representar um impacto sobre a seca.

O PDSI pode ser calculado conforme as Equações que se seguem, conforme Sansigolo (2004).

$$PDSI_i = 0,897PDSI_{i-1} + \left(\frac{Z_i}{3}\right) \quad (1)$$

Onde: i é o mês de interesse e Z um índice de anomalia de umidade, dado pela Equação 2:

$$Z_i = (P_i - \bar{P}_i)K_i \quad (2)$$

Onde: P é a precipitação observada, \bar{P} é a precipitação apropriada para as condições existentes e K é uma constante de padronização. O \bar{P}_i pode ser calculado conforme Equação 3:

$$P_i = \alpha_i ETP_i + \beta_i PR_i + \gamma_i PRO_i - \delta_i PL_i \quad (3)$$

Onde: ETP é a evapotranspiração potencial, PR é a recarga potencial de umidade do solo, PRO é o escoamento superficial de umidade do solo.

Os parâmetros da Equação 3 são definidos mensalmente em um período de calibração definidos conforme as Equações que seguem:

$$\alpha = \overline{ETR} / \overline{ETP} \quad (4)$$

$$\beta = \overline{R} / \overline{PR} \quad (5)$$

$$\gamma = \overline{RO} / \overline{PRO} \quad (6)$$

$$\delta = \overline{L}/\overline{PL} \quad (7)$$

Onde: ETR é a evapotranspiração real, R a recarga, RO o escoamento superficial e L a perda de umidade do solo.

A Equação 8 apresenta o cálculo da constante de padronização, K_i que também é definida mensalmente para um período de calibração.

$$K_i = 17,67\tilde{K}_i \sum_{j=1}^{12} |P_j - \overline{P}_j| K_j \quad (8)$$

Onde o \tilde{K}_i é dado pela Equação 9:

$$\tilde{K}_i = 1,5 \log_{10} [(T_i + 2,8), |P_j - \overline{P}_j|] + 0,5 \quad (9)$$

Onde: T é a razão entre a demanda e o suprimento de umidade, podendo ser calculado conforme Equação 10:

$$T_i = (\overline{ETR}_i + \overline{R}_i + \overline{RO}_i) / (\overline{P}_i + \overline{L}_i) \quad (10)$$

Conforme Zargar *et al.* (2011) utilizando essa série de fatores, como por exemplo; a precipitação antecedente, o abastecimento de água, a recarga de umidade do solo, o escoamento superficial e demanda de evaporação da superfície, o PDSI computa quatro termos na equação do balanço hídrico: evapotranspiração, escoamento superficial, recarga do solo e umidade. Sendo o objetivo do índice, identificar o início e término de secas meteorológicas.

De acordo com Blain (2005), os coeficientes utilizados no cálculo do PDSI são baseados em períodos anômalos secos de determinadas séries históricas. No entanto, na adoção de diferentes séries históricas, grandes alterações na magnitude do índice podem ser observadas em uma mesma região.

O PDSI foi dividido em 11 categorias, que avalia períodos secos e úmidos, essa categorização dos valores do PDSI é apresentada pela Tabela 1.

Tabela 1: Categorização dos valores de PDSI.

Valores de PDSI	Categoria
$\geq 4,00$	Extremamente Úmido
3,00 a 3,99	Muito Úmido
2,00 a 2,99	Moderadamente Úmido
1,00 a 1,99	Ligeiramente Úmido
0,50 a 0,99	Úmido Incipiente
0,49 a -0,49	Próximo ao Normal
-0,50 a -0,99	Seca Incipiente
-1,00 a -1,99	Ligeiramente Seco
-2,00 a -2,99	Moderadamente Seco
-3,00 a -3,99	Muito Seco
$\leq -4,00$	Extremamente Seco

Fonte: Adaptado Blain (2005).

Alguns pesquisadores empregando o PDSI em suas investigações do fenômeno seca, analisaram a estrutura e o emprego deste índice para essa finalidade (GUTTMAN, 1999; HAYES *et al.*, 1999; BLAIN, 2005; BLAIN e BRUNINI, 2005). Na maioria das investigações pode-se observar que o PDSI possui limitações em sua metodologia para padronizar os seus valores para diferentes localidades, dificultando ou até mesmo impossibilitando as comparações espaciais de valores do índice de Palmer (BLAIN, 2005).

2.4.2 Índice de Precipitação Padronizada (SPI)

O Índice de Precipitação Padronizada (*Standardized Precipitation Index* - SPI), proposto por Mckee *et al.* (1993 e 1995), representa o número de desvios padrão que o valor observado se desvia em relação à média (SILVA, 2013), este índice é capaz de quantificar o déficit ou excesso de precipitação em diferentes escalas temporais. Requer em sua formulação apenas uma variável de entrada independente, que é a precipitação pluvial, e fornece informações acerca da probabilidade, da percentagem da média e do déficit de precipitação acumulada (MCKEE *et al.*, 1993; BLAIN, 2010).

As variações das escalas temporais de SPI podem ser de um mês (SPI1) até longos meses, como o SPI12 ou SPI24. As diferentes escalas temporais de SPI apresentam diferentes respostas, sendo que a medida que a escala de tempo aumenta, o SPI responde mais lentamente a mudanças na precipitação (SILVA, 2013; MCKEE *et al.*, 1993).

Por permitir variadas escalas de tempo, o SPI se torna versátil no monitoramento em curto prazo da umidade do solo, importante para a produção agrícola, e em longo

prazo, o monitoramento de reservatórios de águas e fontes de água subterrânea, por exemplo (HAYES *et al.*, 1999).

Para o cálculo do SPI, necessita-se de uma longa série de dados, de 30 anos ou mais. No cálculo deste índice, primeiro, é necessária a determinação da probabilidade da frequência da precipitação pluviométrica. Esta probabilidade é calculada por meio de uma distribuição Gama incompleta. A função normal inversa (Gaussiana) é aplicada a essa probabilidade, onde o resultado é o SPI (SILVA, 2013; BLAIN, 2010; HAYES *et al.*, 1999).

O SPI pode ser calculado conforme Equação 11:

$$SPI = z_i = (P_i - \bar{P}_i) / \sigma_i \quad (11)$$

Onde: na qual P_i é a precipitação observada para o período i e \bar{P}_i é a média da precipitação para todos os períodos i e σ_i é o desvio padrão para todos os períodos i .

Os resultados de SPI são apresentados em uma escala, de + 2 a - 2, onde os valores menores ou iguais a - 2 indicam uma condição extremamente seca e os valores maiores ou iguais a + 2 indicam condição extremamente chuvosa (MACEDO *et al.*, 2010). De acordo com Mckee *et al.* (1993), um evento de seca tem início quando atinge um valor de SPI de -1 ou menor e termina quando atinge um valor positivo de SPI. A intensidade da seca é definida para valores da SPI de acordo com categorias apresentada pela Tabela 2.

Tabela 2: Categorização dos valores de SPI.

Valores de SPI	Categoria
$\geq 2,00$	Extremamente Chuvoso
1,99 a 1,50	Severamente Chuvoso
1,49 a 1,00	Moderadamente Chuvoso
0,99 a -0,99	Normal
-1,00 a -1,49	Moderadamente Seco
-1,50 a -1,99	Severamente Seco
$\leq -2,00$	Extremamente Seco

Fonte: Adaptado de Mckee *et al.* (1993) e Blain e Brunini (2007).

Conforme Hayes *et al.* (1999), o SPI, comparado ao PDSI, apresenta como vantagens; a sua simplicidade, uma vez que, seu cálculo é baseado apenas na precipitação, quando no PDSI este cálculo é mais complexo, utilizando várias variáveis

e ainda representa melhor que o PDSI, os possíveis períodos de déficit ou excesso de precipitação.

O SPI tem como vantagem a versatilidade que lhe proporciona que este possa ser calculado em qualquer escala temporal. Devido a sua distribuição normal, as frequências das classificações da seca extrema e grave para qualquer local e em qualquer escala de tempo são consistentes. De acordo com Mckee *et al.* (1993), pelo fato de o SPI ser normalmente distribuído, este pode ser aplicado no monitoramento de períodos secos e chuvosos. E ainda, por ser normalizado, representa de uma forma semelhante os climas úmidos e secos.

2.5 Fenômeno *El Niño*

Os eventos de seca, e também aqueles de inundação, são muitas vezes considerados influenciados pelo fenômeno *El niño* (ARAGÃO, 1998; BERLATO e FONTANA, 1998; MINUZZI *et al.*, 2005). Esse fenômeno tem grande importância para as condições climáticas predominantes da Terra.

O ENOS se caracteriza pela interação oceano-atmosfera, que ocorre no Oceano Pacífico Equatorial, com ocorrências de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) anormalmente positivas, sendo o fenômeno *El Niño* e, de forma negativa, o fenômeno *La Niña*. O fenômeno ENOS é considerado como a principal causa da variabilidade climática, atingindo diversas porções do planeta (BERLATO e FONTANA, 1998; BERLATO *et al.*, 2005; ANDREOLI e KAYANO, 2007; COSTA, 2012).

As conseqüentes modificações verificadas em anos de *El Niño*, na região Tropical, são decorrentes da adição de grandes quantidades de energia que se dissipa por meio de ondas de calor que tendem a se propagar em percursos preferenciais na atmosfera. Na América do Sul, na porção sudeste, as ondas de calor tendem a intensificar a corrente de jato subtropical, determinando bloqueios na atmosfera, de forma a induzir que as frentes frias fiquem semi-estacionárias sobre o extremo sul do Brasil, provocando excessos de precipitação pluviométrica e conseqüentes eventos de inundação, alagamentos, entre outros (BERLATO e FONTANA, 1998).

Na região Norte e Nordeste do Brasil, em anos de *El Niño*, os movimentos ascendentes acelerados e o calor latente de condensação modificam a circulação geral de Walker, causando movimentos descendentes anômalos em outras partes da atmosfera

tropical, principalmente no sentido zonal. Esses movimentos descendentes inibem a formação de nuvens e reduzem as precipitações pluviométricas no Norte e Nordeste do Brasil, provocando eventos de seca e estiagem (ARAGÃO, 1998).

No Brasil, o *El Niño*, provoca chuvas acima da média na região Sul. E no Norte e Nordeste, chuvas abaixo da média. Essa mesma situação é verificada também no Estado de Minas Gerais. Minuzzi *et al.* (2005), investigaram a relação entre a ocorrência de chuvas e veranicos com o fenômeno de *El Niño* no Estado de Minas Gerais. Foi verificado que o estado se comporta de forma similar ao que ocorre no âmbito do Brasil, quando estão sob efeitos do *El Niño*. De forma generalizada, observa-se uma divisão nas influências em Minas Gerais, onde a metade sudoeste apresenta a tendência de chuvas acima da média climática e, na metade nordeste, a tendência é de chuvas abaixo da média. Também foi verificado por esses autores, que em anos de *El Niño*, o início do período chuvoso em Minas Gerais tende a iniciar mais tarde que o normal nas regiões norte, nordeste e central. Ainda é válido ressaltar que durante eventos de *El Niño* a metade nordeste do Estado apresenta irregularidade na distribuição das precipitações.

2.6 Seca e Estiagem no norte de Minas Gerais

O norte de Minas Gerais integra parcialmente a região do semiárido brasileiro. São 85 municípios do norte de Minas e Vale do Jequitinhonha que fazem parte desta região, definida pela portaria nº 89 de 2005 do Ministério da Integração.

A delimitação do semiárido brasileiro foi proposta em virtude do entendimento da inadequação da antiga delimitação desta região, considerando apenas um critério, sendo a precipitação média anual igual ou inferior a 800 mm, em vigor desde 1989 (GALVÃO e RODRIGUES, 2005).

A nova delimitação da região semiárida brasileira considerou três critérios, nos quais, os municípios que atendessem ao menos um destes seriam incluídos na região do semiárido brasileiro (PEREIRA JÚNIOR, 2007).

I - precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 milímetros;

II - Índice de aridez de até 0,5 calculado pelo balanço hídrico que relaciona as precipitações e a evapotranspiração potencial, no período entre 1961 e 1990; e

III - risco de seca maior que 60%, tomando-se por base o período entre 1970 e 1990.

Por meio desta nova delimitação, Minas Gerais obteve o maior número de novos municípios incluídos na região. O aumento foi de 51,7% da área do estado integrante da região semiárida brasileira. Pela antiga definição, 40 municípios integravam essa região e por meio da nova delimitação, esse número subiu para 85 municípios (GALVÃO e RODRIGUES, 2005).

A Figura 1 apresenta a nova delimitação do semiárido brasileiro, onde pode ser observada a sua área de abrangência no território do estado de Minas Gerais.

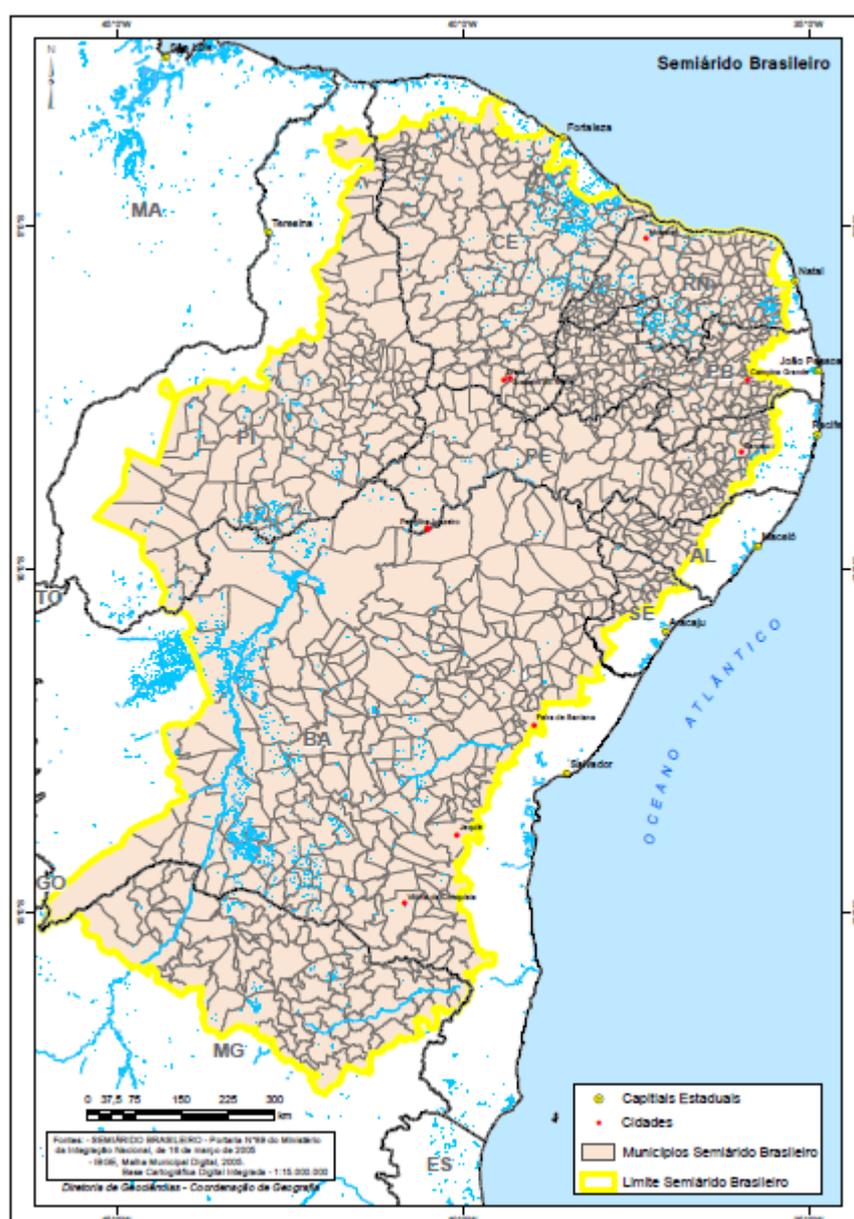


Figura 1: Delimitação do Semiárido Brasileiro. Fonte: IBGE (2005).

Além do norte de Minas Gerais integrar parcialmente a região semiárida brasileira, essa região também é aquela que possui a menor precipitação pluviométrica anual do Estado, com variação média entre 700 mm a 1200 mm. Todavia, mesmo que esses valores de precipitação médios anuais se apresentem bastante altos para caracterizar a região como árida, sua a variabilidade é considerável, uma vez que, atingem um coeficiente de variabilidade anual na ordem de 35% a 40%. Esses valores são comparáveis aos observados no Estado do Ceará (NUNES *et al.*, 1984).

O clima no norte de Minas Gerais é caracterizado por elevada temperatura, irregularidade pluviométrica, e característicos períodos de seca e de chuva (COSTA *et al.*, 2010). Os meses mais chuvosos são novembro, dezembro e janeiro e os meses mais secos são junho, julho e agosto (NIMER e BRANDAO, 1989).

A realidade climática do norte de Minas Gerais, com baixos índices pluviométricos aliados a elevadas temperaturas, influencia no baixo padrão de vida da população acarretando diversos problemas, como a difícil produção agrícola e a manutenção dos sistemas produtivos, refletindo em situação crítica de pobreza (BARROS, 2010; COSTA *et al.*, 2010).

A distribuição da precipitação e temperatura da região pode ser observada por meio da Figura 2, que apresenta um climograma com dados das estações meteorológicas convencionais instaladas na região do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o período de 1980 a 2014.

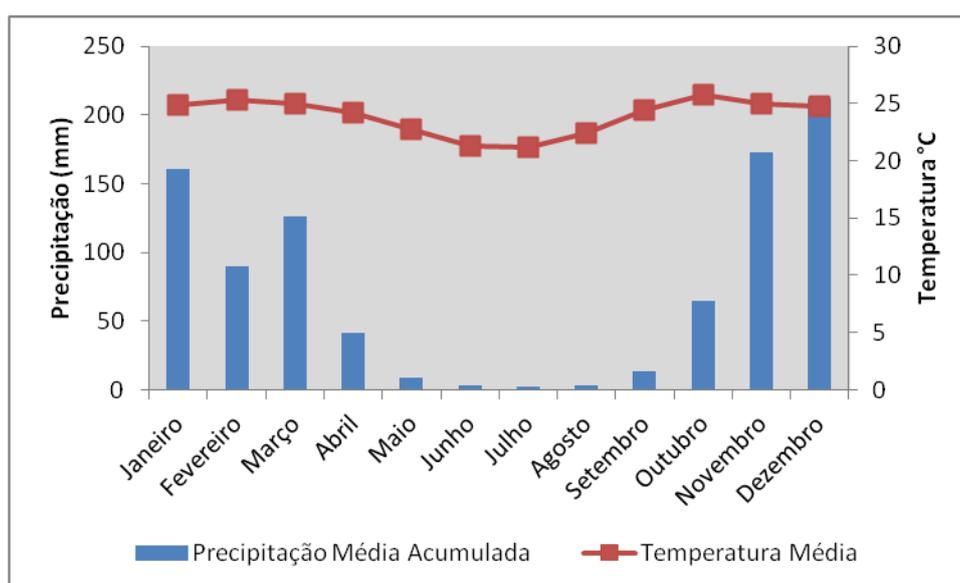


Figura 2: Climograma da região norte de Minas Gerais entre 1980 a 2014. Fonte: INMET (2016).

Nunes *et al.* (1984) desenvolveram um trabalho com o objetivo de identificar as características espaciais e temporais dos períodos de seca do norte de Minas, entre 1949 a 1981, utilizando para isso, o índice de seca de Palmer (PDSI). Como resultado foi verificado que a área do polígono das secas no norte de Minas Gerais é aquela que apresenta a maior frequência de incidência de seca, cerca de 14% a 20%. A frequência de incidência de seca encontrada foi atribuída à alta variabilidade pluviométrica da região, mesmo que os totais anuais não sejam muito baixos. Também foi verificado que a região, durante o período da análise, sofreu cinco eventos de seca com grande duração, de seis meses ou mais. E que a incidência de seca no norte de Minas Gerais é parte do clima natural da região, e a heterogeneidade espacial da frequência do evento está atrelada a contribuição orográfica e do reflexo dos sistemas sinóticos associados aos mecanismos de produção da precipitação.

No volume de Minas Gerais do atlas brasileiro de desastres naturais desenvolvido pelo CEPED/UFSC, foi verificado que de 1991 a 2010, houve um total de 1.933 registros oficiais de ocorrência de seca/estiagem no Estado. O número de registros é crescente do centro para o norte de Minas, com um maior número de registros nas mesorregiões Vale do Mucuri, Jequitinhonha, norte e noroeste de Minas. Em destaque, tem-se a região norte de Minas Gerais por ter a maioria dos municípios com mais de 10 registros entre os anos analisados, e ainda, por todos os seus 89 municípios terem sido afetados (CEPED/UFSC, 2011).

Na análise dos eventos de seca/estiagem em Minas Gerais, foi verificado que entre 1991 a 2010, um total de mais de 3 milhões de pessoas no Estado foram afetados por seca/estiagem. Entre esses, os únicos registros de vítimas fatais foram constatados nos municípios da região norte de Minas Gerais. No município de Curral de Dentro foram registrados 48 óbitos relacionados com 14 ocorrências que atingiram este município, onde foi verificado que em algumas ocorrências, na área rural 100% das fontes de água estavam secas. No município de São Francisco, foi constatado 16 registros de ocorrência do evento no período analisado, apresentando o maior número de afetados pela seca/estiagem, sendo 112.407 habitantes.

2.7 Sensoriamento Remoto para monitoramento de secas

As abordagens convencionais de seca, anteriormente, eram baseadas em observações de estações meteorológicas. Por meio dos dados destas estações, foram propostos indicadores de seca, de forma, a fomentar o monitoramento, medir e quantificar a severidade de uma seca, como o PDSI e SPI.

Atualmente, por meio dos dados derivados de sensoriamento remoto, tem-se uma alternativa para estudos de seca considerando a sua variabilidade espaço-temporal, bem como uma maior cobertura das extensas áreas de ocorrências do fenômeno.

Os dados de sensoriamento remoto possibilitam realizar a estimativa de parâmetros biofísicos da cobertura terrestre, que são importantes para a composição de índices de seca, tais como, índices de vegetação, temperatura da superfície terrestre, precipitação, umidade do solo, evapotranspiração e albedo.

As faixas espectrais em que são extraídas as informações de sensoriamento remoto permitem o entendimento das condições da vegetação. Conforme Ponzoni e Shimabukuro (2007), a faixa espectral correspondente a região do vermelho é uma das principais bandas de absorção da radiação eletromagnética pela clorofila, a região do infravermelho próximo é sensível ao conteúdo de umidade da vegetação, a faixa do infravermelho termal pode ser utilizada para inferências sobre o estresse do dossel das plantas.

Desta forma, por meio das propriedades espectrais da vegetação, torna-se possível o monitoramento da sua dinâmica, bem como a análise da sua condição.

Conforme Bonifácio *et al.* (1993), os índices de vegetação são transformações espectrais que objetivam o realce das propriedades da vegetação, tendo como base a assinatura espectral da vegetação nas faixas do vermelho e do infravermelho próximo. O índice de vegetação aumenta com uma maior quantidade de vegetação fotossinteticamente ativa e tem a sua diminuição com questões de estresse hídrico e de transpiração da planta.

As vantagens do uso de dados de sensoriamento remoto no estudo de secas e estiagens em relação as observações de estações meteorológicas, incluem, observações globais em tempo quase real, registros de dados consistentes, e ainda, uma melhor resolução espacial dos dados (AGHAKOUCHAK *et al.*, 2015)

Considerando as características dos dados de sensoriamento remoto e o seu potencial para o monitoramento de secas e estiagens, alguns trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de empregar esses dados de forma a analisar esse fenômeno espaço-temporalmente, entender a sua dinâmica e realizar o seu monitoramento.

2.7.1 Índice de Vegetação da Diferença Normalizado (NDVI) e Índice de Vegetação Melhorado (EVI)

As secas são associadas de forma natural a condição da vegetação, ao seu verdor e a sua cobertura vegetal. Neste sentido os índices de vegetação, tais como o NDVI e o EVI, são comumente empregados no estudo de secas e estiagens (KOGAN, 1995; KARNIELI *et al.*, 2010, DU *et al.*, 2013).

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizado (NDVI), proposto por Rouse *et al.* (1973) se baseia em uma relação entre a refletância do comprimento de onda do infravermelho próximo e do vermelho, e tem como característica a sensibilidade à clorofila e a insensibilidade ao aumento da biomassa vegetal a partir de determinado estágio, tornando-se saturado. Os valores obtidos com o NDVI são contidos em uma mesma escala, entre -1 e 1 (Equação 12).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (12)$$

Onde: ρ_{NIR} é a refletância correspondente ao comprimento de onda do infravermelho próximo e ρ_{red} é a refletância correspondente ao comprimento de onda do vermelho.

O Índice de Vegetação Melhorado (EVI) (Equação 13), proposto por Huete *et al.* (1997) tem como objetivo otimizar o sinal da vegetação, sendo mais sensível à variação da estrutura do dossel, proporcionando o monitoramento da vegetação por meio de uma ligação do sinal de fundo do dossel e a redução das influências atmosféricas (GAO *et al.*, 2000; HUETE *et al.*, 2002).

$$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue} + L} \quad (13)$$

Onde: ρ_{blue} é a reflectância do comprimento de onda do azul; G é um fator de ganho, igual a 2,5; C_1 e C_2 são coeficientes de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do vermelho e do azul, respectivamente; e L é o fator de correção para a interferência do solo.

Devido a relação existente entre o vigor vegetativo, precipitação, temperatura e umidade do solo, os índices de vegetação são usados como base para a formulação de indicadores de situação de seca e estiagem visando o monitoramento, quantificação e identificação desses fenômenos. Como exemplo dessa aplicação tem-se o índice de condição da vegetação (VCI) que visa o estudo da seca (LIU e KOGAN, 1995; QUIRING e GANESH, 2010; FERREIRA *et al.*, 2015), padronizações de NDVI e EVI que buscam a identificação de anomalias da vegetação e com isso a identificação de período de seca e estiagem (SOUSA JÚNIOR *et al.*, 2010; LEIVAS *et al.*, 2014) e sintetizações dos índices de vegetação e outros indicadores, também para estudo de seca (KARNIELI *et al.*, 2010; DU *et al.*, 2013).

Com base em dados de NDVI (1995) propôs o índice de condição da vegetação (*Vegetation Condition Index* - VCI) para o monitoramento da seca entre 1985 e 1990 nos Estados Unidos. Nos resultados foi observado que o VCI mostrou excelente habilidade na detecção e mensuração da seca, onde se pode detectar o início do evento, sua intensidade, duração, dinâmica e impactos sobre a vegetação.

Também usando dados de VCI derivados dos dados de NDVI, Du *et al.* (2013) propuseram o monitoramento da seca na Província de Shandong, localizada na parte norte da China entre os anos de 2000 a 2010 utilizando dados MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*). Foi proposto um índice para análise da seca, que levaria em consideração em sua formulação além dos dados de condição da vegetação (VCI) e condição da temperatura (TCI), dados de precipitação por meio do emprego do PCI (Índice de Condição da Precipitação), elaborado por meio de dados TRMM. A aplicação desse índice de seca demonstrou que este pode monitorar o aparecimento, duração, extensão e gravidade da seca, além de sintetizar os déficits de precipitação, o estresse térmico do

solo e o status de crescimento da vegetação em processo de seca, se mostrando satisfatório para o monitoramento da seca.

Alguns autores ao aplicar dados de NDVI ou EVI para o estudo de secas e estiagens utilizaram a anomalia do índice de vegetação. A utilização dos dados em forma de anomalia de vegetação tem como objetivo, o estabelecimento das condições normais da vegetação e por meio dela, a caracterização das condições da vegetação em relação ao padrão normal.

Ezzine *et al.* (2014) utilizaram de dados de NDWI para estudar a seca na região semi-árida do Mediterrâneo. Neste estudo, ressalta-se que apesar dos dados de NDWI apresentarem-se sensíveis ao conteúdo de umidade da vegetação, estes dados, quando comparados com dados de NDVI e LST, em estudo de secas, ainda não são amplamente empregados. Neste estudo foi gerada uma série temporal de dados de SWI (*Standardized Water Index*), com base nos dados de NDWI para o período de 1998 a 2012 e esta foi comparada com dados de SVI (*Standardized Vegetation Index*), que tem como base, dados de NDVI. Os resultados deste estudo apontam que o SWI e o SVI apresentaram coincidência espacial. O SWI apresentou-se ligeiramente mais concordante com os dados de precipitação (SPI/TRMM) do que o SVI, e a validação do SWI com dados de SPI *in situ*, também mostrou correlação significativa. E uma alta correlação também foi entre SWI e área de seca afetada.

Kinyanjui (2010) também utilizou anomalia de índice de vegetação, com base em NDVI, para o monitoramento de seca, entre 1999 a 2009, na *Mau forest* no Quênia. Os resultados demonstraram que os padrões de NDVI em um período de um ano, apresentaram tendências cíclicas com forte dependência das estações chuvosas. Foi possível, por meio da aplicação de dados de anomalia da vegetação, verificar a evidência dos efeitos da seca prolongada sobre essa floresta.

Sousa Júnior *et al.* (2010) empregaram dados de EVI e calcularam o índice de vegetação padronizado (SVI – *Standardized Vegetation Index*) para o monitoramento de estiagens da região Sul do Brasil utilizando dados do sensor MODIS. A utilização das imagens EVI/MODIS se mostrou satisfatória para a caracterização e o monitoramento de áreas de anomalias de vegetação, isso se deve à sua resolução temporal que torna possível a realização de monitoramento constante das ocorrências de anomalias negativas de vegetação indicativas de estiagem.

Leivas *et al.* (2014) também fizeram uso do SVI para estudar a seca. A região do estudo foi o Nordeste brasileiro entre 2011 a 2012. O SVI foi calculado utilizando-se de NDVI decendial do produto V2KRNS10 do sensor SPOT Vegetation (VGT). A variabilidade da vegetação foi identificada pela análise de quanto o SVI ficou acima ou abaixo da média do NDVI para o decêndio e esses resultados, obtidos pelos autores foram comparados com os dados de precipitação padronizados do TRMM. Na análise dos resultados, foi observado que o monitoramento da seca em 2011/2012 que aconteceu no Nordeste do Brasil foi satisfatório com a utilização do SVI.

2.7.2 Índice de Água da Diferença Normalizada (NDWI)

O índice de água diferença da normalizada (NDWI) se configura como um índice que possui alta correlação com o conteúdo de água na vegetação e por esta característica é possível avaliar o estresse hídrico da vegetação (JENSEN e EPIPHANIO, 2009). O NDWI foi proposto por Gao (1996). Este índice utiliza os canais do Infravermelho próximo e infravermelho médio em seu cálculo, conforme equação 14:

$$NDWI = \frac{\rho_{IVp} - \rho_{IVm}}{\rho_{IVp} + \rho_{IVm}} \quad (14)$$

Onde: ρ_{IVp} corresponde ao canal do infravermelho próximo e ρ_{IVm} ao canal do infravermelho médio.

O NDWI, por apresentar-se como potencial índice para monitorar o conteúdo de água na folha, tem sido empregado em estudos da seca e estiagens (GU *et al.*, 2007; GOUVEIA *et al.*, 2012; SUN *et al.*, 2013; EZZINE *et al.*, 2014).

Um exemplo do emprego do NDWI em estudo de secas é o trabalho desenvolvido por Gu *et al.* (2007). Com o objetivo de medir e monitorar a seca em pastagens nos Estados Unidos, os autores utilizaram dos índices derivados de sensoriamento, NDVI e NDWI a fim de realizar esta investigação. Os resultados mostraram a existência de uma forte relação entre o NDVI, NDWI e as condições de seca nas pastagens analisadas nos EUA. Além disso, os resultados também

demonstraram que o NDWI se apresentou mais sensível no aparecimento da seca que o NDVI.

GU *et al.* (2008) realizaram um trabalho com o objetivo de avaliar a relação entre índices derivados de sensoriamento remoto (NDVI e NDWI) com dados de umidade, de forma a compreender melhor como os índices respondem as flutuações da umidade do solo e sobre a sua capacidade de monitoramento de secas. Os resultados deste trabalho demonstraram que o relacionamento entre os índices de vegetação e umidade do solo são altamente dependentes da heterogeneidade da cobertura da vegetação e do tipo de solo. Ambos os índices, NDVI e NDWI apresentaram-se sensíveis às mudanças na umidade do solo, sendo fortemente relacionado às condições da vegetação. Os dois índices exibiram relações semelhantes com as variações de umidade do solo, demonstrando que ambos são apropriados para o monitoramento de estresse hídrico sobre a vegetação.

Sun *et al.* (2013), realizaram um estudo com o objetivo de verificar o potencial da utilização do NDWI para o monitoramento da seca na China. Neste trabalho, os autores verificaram que existe uma correlação significativa do índice baseado em NDWI e dados de SPI e ainda, que esta correlação é comparável com aquela observado entre o SPI e o mesmo índice utilizando o NDVI como base. E ainda, foi verificado que a utilização do NDWI no índice de seca tem melhor correlação com dados de produtividade agrícola que aquela observada com o índice utilizando NDVI.

Apesar dos resultados obtidos com o emprego de dados de NDWI em estudos de secas serem bem similares aqueles obtidos como o emprego do NDVI, em algumas abordagens verifica-se que o NDWI pode ser mais sensível que o NDVI no monitoramento de secas, mesmo que ambos apresentem-se com características muito semelhantes nestes estudos. Neste sentido, o NDWI apresenta-se como um potencial índice de vegetação a ser explorado nos estudos de secas, uma vez que, esse é tão consistente quanto os dados de NDVI nestas aplicações, ainda que o emprego do NDWI não seja tão amplamente difundido como no caso do NDVI.

2.7.3 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

Dados de precipitação, principalmente aqueles provenientes do satélite meteorológico TRMM, tem sido empregados em formulação de índices de seca e

também no fomento de discussões das aplicações destes índices, além de realizações de comparações e validações dos índices de seca formulados por meio de índices de vegetação, com esses dados de precipitação (DU *et al.*, 2013; LEIVAS *et al.*, 2014)

O satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) foi lançado em 1997 pelas agências espaciais NASA - *National Aeronautics and Space Agency* e a JAXA - *National Space Development Agency of Japan*. O objetivo do satélite TRMM é o monitoramento das precipitações nas regiões tropicais e subtropicais do globo terrestre (KUMMEROW *et al.*, 2000).

O satélite TRMM opera em uma órbita baixa, oblíqua e não síncrona com o sol, que lhe permite observar as precipitações tropicais. O satélite completa uma órbita em torno da Terra de 91 minutos, caracterizando um curto período de translação. Os instrumentos a bordo do satélite TRMM incluem; um imageador microondas (TMI), um radar de precipitação (PR), um radiômetro na faixa do visível e do infravermelho (VIRS), um sensor de energia radiante da superfície terrestre e das nuvens (CERES), e um sensor para imageamento de relâmpagos (LIS) (ADEYEWA e NAKAMURA, 2003; COLLISCHONN *et al.*, 2007).

Por meio dos instrumentos TMI, PR e VIRS, são obtidas medidas de temperatura de brilho, potência e radiância. Essas variáveis aliadas a produtos de outros satélites são essenciais no processo de obtenção das estimativas de precipitação (COLLISCHONN, 2006).

Um dos produtos obtidos por meio destas medidas é o produto 3B43, que é uma estimativa mensal de precipitação, em uma resolução espacial de 0,25°. O produto 3B43 é obtido por meio da combinação das estimativas de precipitação globais geradas pelo produto 3B42 e dados de uma rede global de pluviômetros (HUFFMAN *et al.*, 2007; LEIVAS *et al.*, 2014).

Alguns autores empregaram com sucesso dados TRMM para estimar precipitação em bacias hidrográficas, observando que o desempenho apresentado por esses dados podem mostrar que esses são uma alternativa a uma rede de estações meteorológicas pouco consistentes (COLLISCHONN, 2006; COLLISCHONN *et al.*, 2007; VIANA *et al.*, 2010). E esses dados também foram empregados com sucesso na integração de índices de monitoramento de secas (DU *et al.*, 2013; ZANG e JIA, 2013; YAN *et al.*, 2014).

Com base em dados de sensores da faixa do microondas, Zhang e Jia (2013) propôs uma integração de dados derivados de sensoriamento remoto para o monitoramento da seca no norte da China. Os dados utilizados são: dados de precipitação, do satélite TRMM, de umidade do solo e de temperatura da superfície terrestre, ambos do sensor AMSR-E, a bordo do satélite AQUA. Esse estudo demonstrou que o uso integrado de dados de sensoriamento remoto para o monitoramento da seca, teve um melhor desempenho, para um monitoramento de curto prazo, e também foi verificado que o uso dos dados de precipitação, do TRMM, demonstrou que esses dados são adequados para o monitoramento de seca meteorológica.

Outro estudo que também utilizou de dados de precipitação do satélite TRMM para o estudo de secas foi desenvolvido por Yan *et al.* (2014), que analisaram a viabilidade e adaptabilidade de usar dados de precipitação de sensoriamento remoto para monitorar seca meteorológica. Os resultados demonstraram que o uso de dados de precipitação do TRMM foi satisfatório para a elaboração de índices SPI. Os autores também verificaram que o SPI para a escala de três meses demonstrou resultado satisfatório para descrever a seca meteorológica, e que esses dados podem ser fontes alternativas de dados de precipitação, com qualidade similar aos dados coletados *in situ*.

2.7.4 Missão GRACE

Uma alternativa em potencial para o estudo de secas e estiagens no âmbito do sensoriamento remoto é o uso de dados do satélite GRACE (YIRDAW *et al.*, 2008; CHEN *et al.*, 2009; CHEN *et al.*, 2010).

O satélite GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) foi lançado em Março de 2002 pela Agência Espacial Norte Americana (NASA) em parceria com o *German Aerospace Center* (DLR). A missão consiste em dois satélites gêmeos em mesma órbita e distantes a 220 km um do outro. Os satélites utilizam um sistema de microondas para o monitoramento contínuo de sua distância.

A missão GRACE mede a gravidade da Terra de acordo com as variações da distância entre os seus dois satélites. Quando há um aumento da gravidade, o satélite líder acelera a sua velocidade e aumenta a distância em relação ao outro satélite. A distância entre os satélites da missão GRACE são monitorados com precisão de

micrômetros (NASA, 2015), e por meio das medidas das variações da distância entre o par de satélites, combinados com medidas de posição do Sistema de Posicionamento Global (GPS) e acelerômetros acoplados nestes satélites, torna-se possível a determinação de variações muito pequenas no campo de gravidade da Terra (BOMFIM, 2006).

A Missão GRACE tem como objetivo o fornecimento de dados mensais do campo de gravidade da Terra (SWENSON e WAHR, 2003; BOMFIM, e MOLINA, 2009). Por meio destes dados é possível obter informações sobre estimativa de variação do estoque de água continental (GUEDES *et al.*, 2013), escoamento e armazenamento de água no solo, mudanças entre as camadas de gelo e variações de massa na Terra, por exemplo (NASA, 2015).

As soluções GRACE mensais são disponibilizadas por três centros de processamento diferentes; o GFZ (*GeoForschungsZentrum*), em Potsdam na Alemanha, o CSR (*Center of Space Research*), da Universidade do Texas, em Austin - EUA e o JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), da Agência Espacial Americana – NASA (XAVIER, 2012). Esses dados possuem uma resolução espacial de 300 km e são disponibilizados em nível de processamento L3 (NASA, 2015).

Os dados do satélite GRACE obtiveram resultados consideráveis em estudos relacionados com análise de seca (YIRDAW *et al.*, 2008; CHEN *et al.*, 2009; CHEN *et al.*, 2010); variação sazonal de massa de água (ZENG *et al.*, 2008) entre outras aplicações destes dados para estudos hidrológicos (CASTRO, 2012; WAHR *et al.*, 2000; CROWLEY, 2006).

Chen *et al.* (2009) realizaram um estudo com o objetivo de demonstrar a capacidade do GRACE em observar e quantificar a seca ocorrida em 2005 na Bacia Amazônica. Foi observado que o emprego dos dados de armazenamento de água Terrestre (TWS) (GRACE) foi capaz de identificar o déficit de TWS ao longo do ano de 2005, na Bacia Amazônica.

Yirdaw *et al.* (2008), também empregaram dados GRACE para estudar seca. Por meio dos dados GRACE foi calculado o índice de déficit total de armazenagem (TSDI). Com o emprego do TSDI foi possível a caracterização da seca em análise, onde ainda foi possível o acompanhamento do déficit de umidade ao longo do período em estudo. Os resultados obtidos por Yirdaw *et al.* (2008) mostram a pertinência e robustez da missão GRACE e dos dados de sensoriamento remoto como um meio viável para se

estimar o armazenamento total de água em uma bacia, sendo este dado importante para estudos de seca.

2.8 Sensor MODIS

Os dados do sensor MODIS, devido a sua resolução temporal e espacial que fomentam a análise da dinâmica da superfície terrestre, tem sido comumente empregado em formulação de índices que analisam as mudanças que ocorrem na superfície. Entre esses estudos estão aqueles que visam a análise de eventos de seca a estiagem (PARK *et al.*, 2008; DU *et al.*, 2013).

O sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) é um instrumento a bordo dos satélites, TERRA e AQUA, sendo lançados, com sucesso em dezembro de 1999 e em maio de 2002, respectivamente. O sensor MODIS possui 36 bandas espectrais e uma resolução radiométrica de 12 bits, este foi projetado com a finalidade de satisfazer as necessidades dos estudos de três campos: estudo da atmosfera, do oceano e da terra. As bandas possuem resolução espectral e espacial, selecionadas de forma a proporcionar o conhecimento das diferentes necessidades observacionais e para o fornecimento de cobertura terrestre do globo diariamente (JUSTICE *et al.*, 2002).

As principais características do sensor MODIS, estão relacionadas à sua alta cobertura de imageamento, com ampla cobertura espacial e espectral e por estar alinhado nas tomadas de medidas nas regiões espectrais de outros satélites de monitoramento terrestre, como aquelas do NOAA/AVHRR e LANDSAT (ANDERSON *et al.*, 2003).

O produto MOD13 do sensor MODIS, se refere aos índices de vegetação deste sensor. Estes índices visam o fornecimento de comparações consistentes de dados em escala temporal e espacial, proporcionando estudos das condições da vegetação global e subsídio ao monitoramento da atividade fotossintética da vegetação em suporte a detecção de mudança e interpretações biofísicas e da fenologia. Para a geração do produto MOD13 utiliza-se um algoritmo baseado na reflectância da superfície (MOD09) e a composição das cenas, que tem por objetivo a geração de cenas de 16 dias e até cenas mensais (ANDERSON *et al.*, 2003).

De acordo com Huete *et al.* (2002) e ANDERSON *et al.* (2003), o produto MOD13 possui em seu pacote as seguintes cenas:

- Dois índices de vegetação, o NDVI e o EVI;
- Duas imagens com informações acerca da qualidade dos índices de vegetação, o NDVI *Quality* e o EVI *Quality*.
 - Imagens refletâncias das bandas do vermelho (RED), azul (BLUE), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (MIR).
 - Três imagens referentes à maneira como os dados foram adquiridos (ângulo de visada, ângulo zenital solar e ângulo azimutal solar).

Em relação à escala do produto MOD13, este possui variações, de resoluções espaciais de 250 metros, 500 metros e 1.000 metros.

O produto MOD13 possui uma variedade de aplicações aos estudos de observações da Terra, pois fornecem comparações consistentes de dados temporais e espaciais da dinâmica da vegetação, propiciando o monitoramento dos ecossistemas e identificando as mudanças ocorridas ao longo dos anos. Os dados provenientes do produto MOD13 podem ser utilizados no monitoramento e estudo da compreensão de eventos, tais como secas, estiagens, queimadas, atividades vulcânicas, entre outros (ANDERSON *et al.*, 2003).

Os dados do produto MOD13 do sensor MODIS, devido a sua média resolução espacial e alta resolução temporal, têm sido empregados em vários estudos da dinâmica da cobertura terrestre. Os dados de satélite provenientes deste sensor possuem capacidade de fomentar estudos voltados ao monitoramento de ecossistemas e fenômenos, como estudos de secas e estiagens.

3 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A mesorregião norte de Minas Gerais (Figura 3), se encontra delimitada pelas coordenadas geográficas 46°40' W, 14°00' N, 41°20' E e 18°00' S, ocupando aproximadamente uma unidade territorial com área de 128.454 km². Compreende 89 municípios, divididos em sete microrregiões: Bocaiúva, Grão Mogol, Janaúba, Januária, Montes Claros, Pirapora e Salinas.

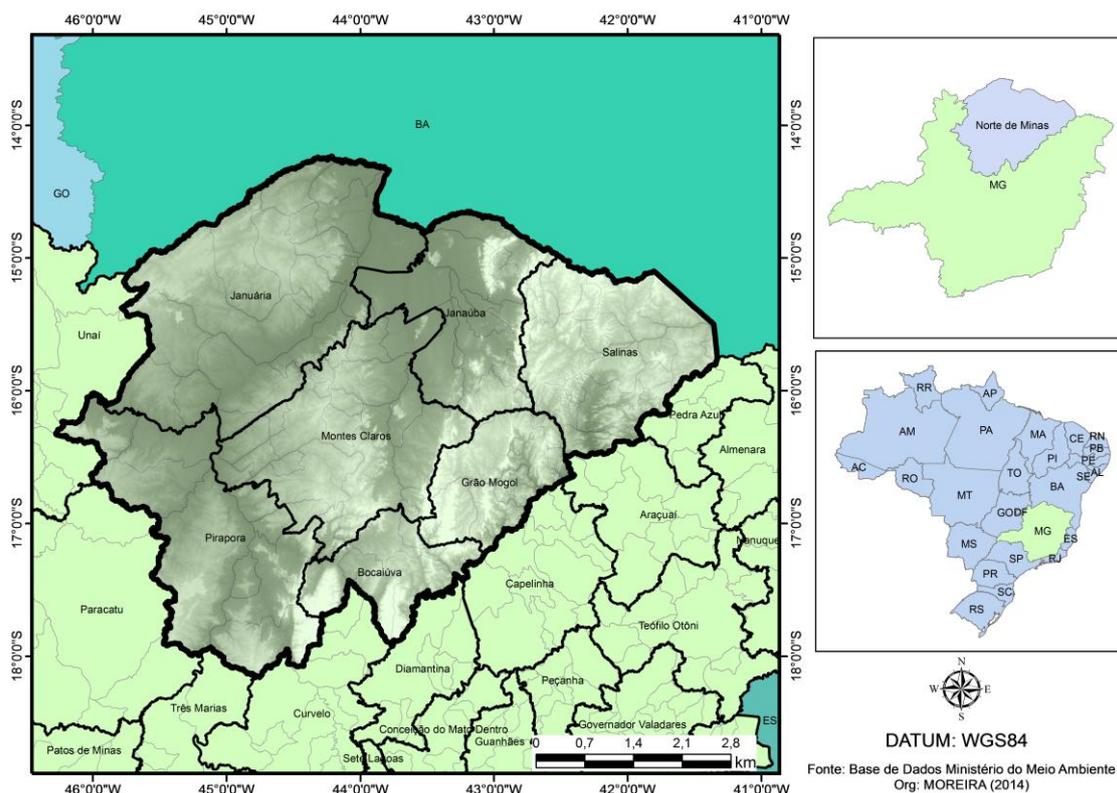


Figura 3: Localização do norte de Minas Gerais e suas microrregiões.

O norte de Minas Gerais apresenta características físicas semelhantes às da região Nordeste do Brasil, possui temperaturas elevadas, irregularidade pluviométrica e ocorrência de seca. Devido a estas semelhanças a região foi inserida na área de atuação da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE).

O norte de Minas Gerais é considerado uma região de transição entre o Nordeste e o Sudeste do Brasil. Apesar de se encontrar inserido na região Sudeste, apresenta características socioeconômicas e climáticas semelhantes àquelas do Nordeste Brasileiro (SILVA, 2012).

De acordo com a Figura 4, que apresenta as áreas com incidência de seca no semiárido brasileiro, a mesorregião do norte de Minas Gerais sofre incidência de até 20% de seca na maior parte de seu território.

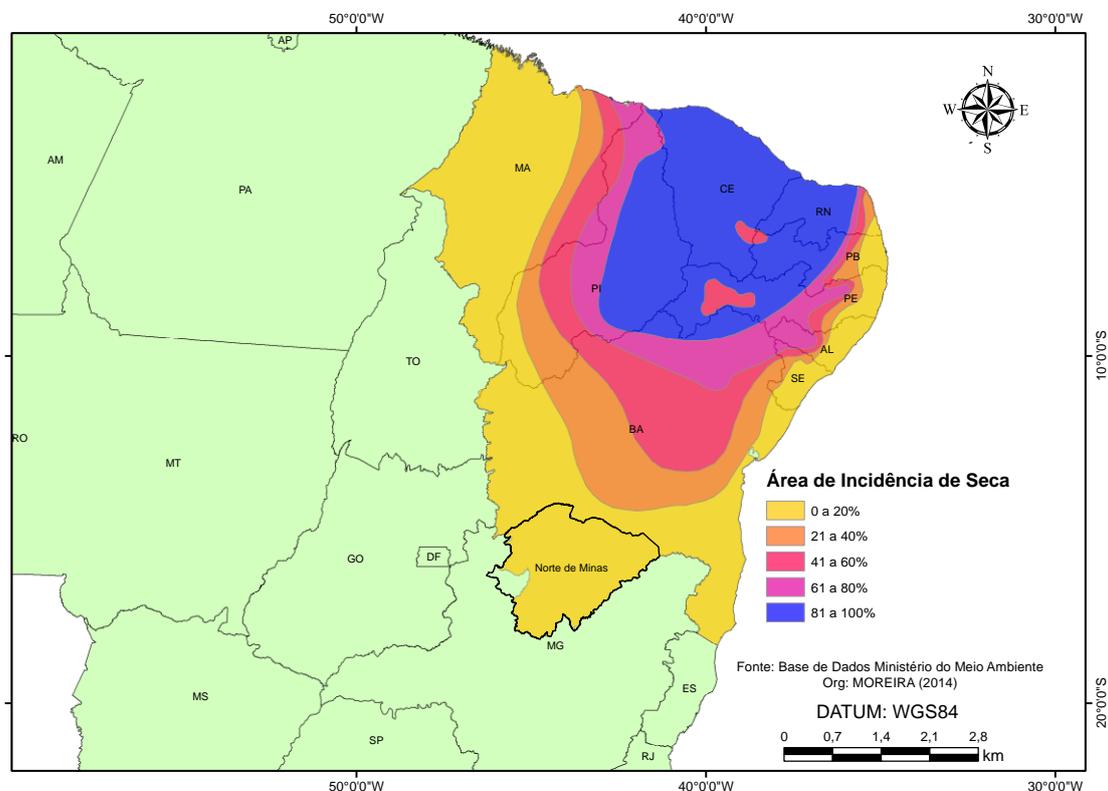


Figura 4: Área de incidência de seca no Semiárido Brasileiro. Fonte: CARVALHO *et al.*, 1973.

Quanto à hidrografia, o norte de Minas Gerais é drenado por três bacias federais: a bacia do Rio São Francisco, do Rio Jequitinhonha e do Rio Pardo (Figura 3). A bacia do Rio São Francisco é a que drena a maior área da região. A nível estadual, a região é drenada pelos rios Peruaçu, Salinas, Gorutuba, Paracatu, Pacuí, Urucuaia, Verde Grande, entre outros (Figura 5).

Os afluentes das bacias hidrográficas do norte de Minas Gerais possuem como característica principal, a intermitência, durante o período de seca (SILVA, 2012). Os rios apresentam fluxos irregulares, onde a água da superfície desaparece durante o período de menor precipitação, e esta característica pode estar relacionada principalmente com o clima e com as atividades antrópicas (BARROS, 2010).

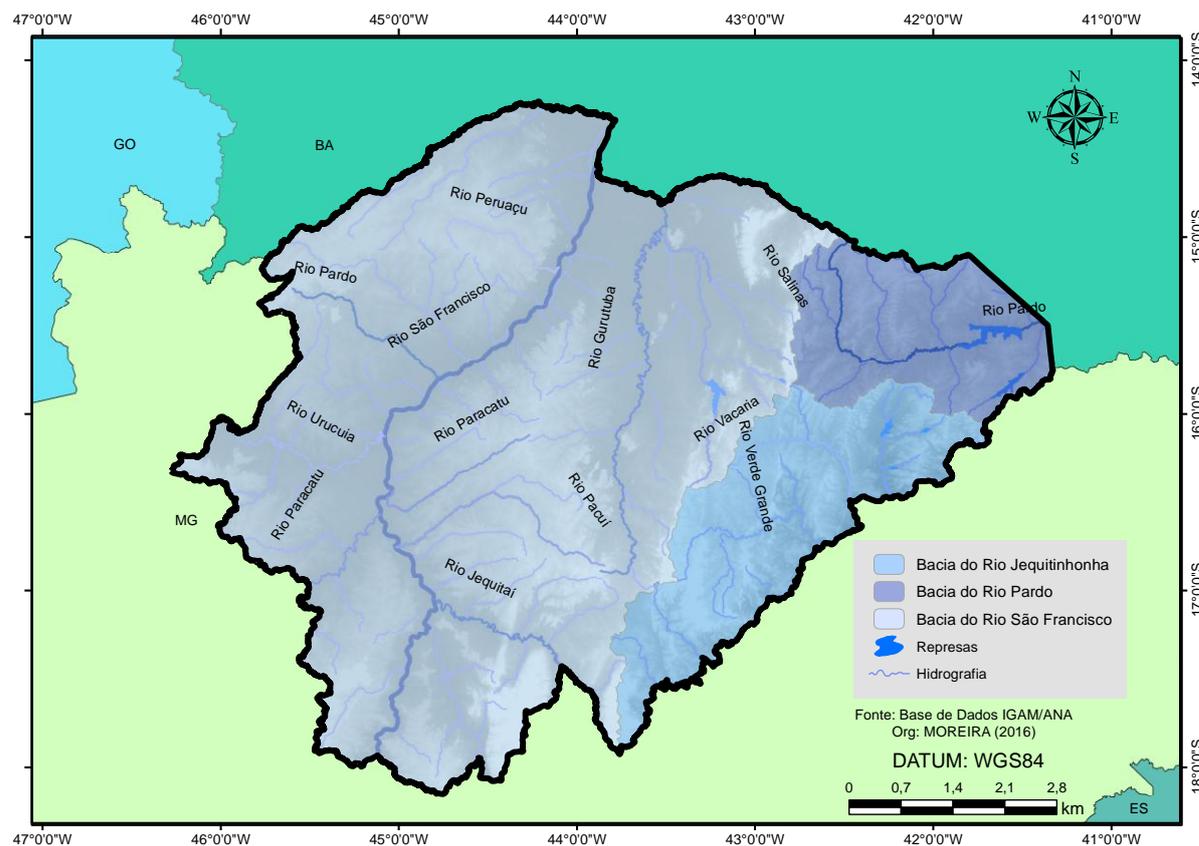


Figura 5: Hidrografia do norte de Minas Gerais. Fonte: ANA - Agência Nacional de Águas (2014); IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas (2014).

O norte de Minas Gerais apresenta clima tropical variando de Semiúmido a Semiárido, com o período chuvoso concentrado entre os meses de outubro a março e o período seco de abril a setembro (NIMER e BRANDÃO, 1989).

A temperatura média anual está entre 22 a 24 °C para a maior parte da região (Figura 6). As altas temperaturas durante todo o ano colaboram no aumento da evapotranspiração (BARROS, 2010).

A precipitação média anual (Figura 7) varia entre 700 mm ao norte e 1.200 mm ao sul (NUNES *et al.*, 1984). Apesar da quantidade razoável, existe uma alta variabilidade, da precipitação anual, sujeitando a região a períodos de estiagem (MELLO e VIOLA, 2013).

No período chuvoso, acontecem chuvas, em sua maioria, convectivas, que se caracterizam por uma alta intensidade e curta duração (IGAM, 2010). Estes fatores promovem o escoamento superficial, desfavorecendo a recarga da umidade do solo. Devido ao solo estar sobre o escudo cristalino, a infiltração da água pluvial e o favorecimento da umidade do solo são comprometidos (SILVA, 2012).

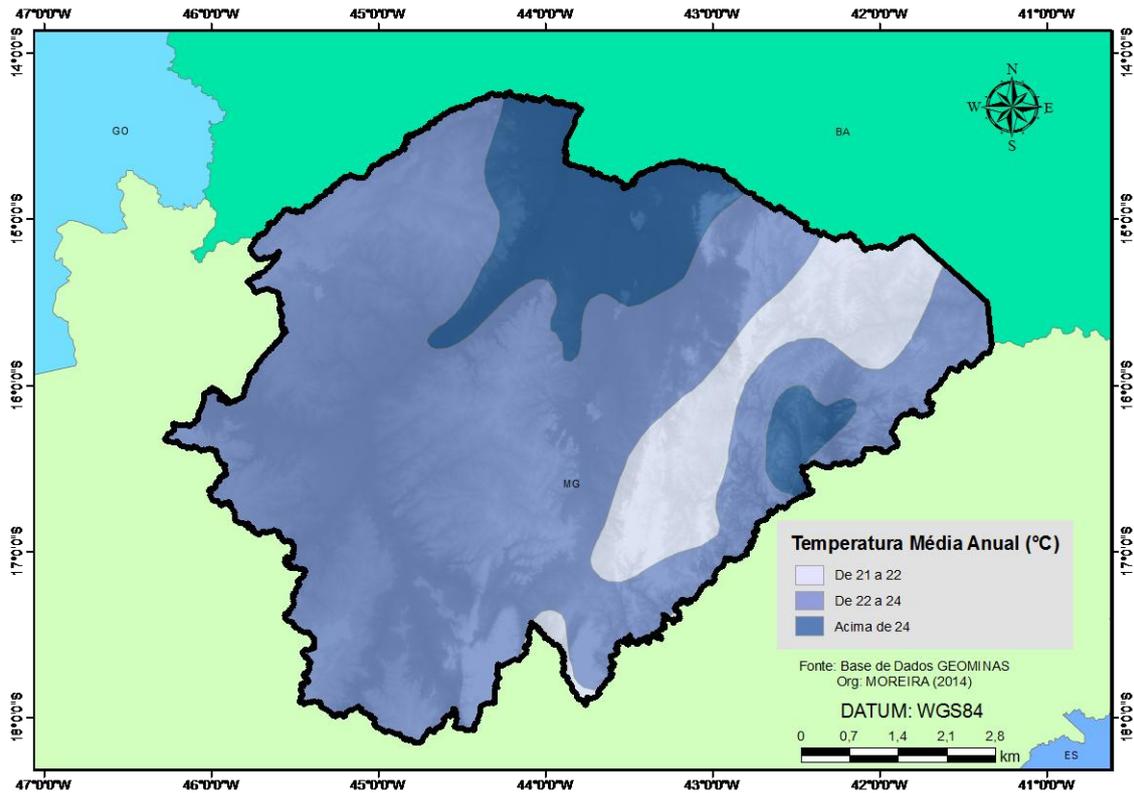


Figura 6: Temperatura Média Anual do norte de Minas Gerais. Fonte: GEOMINAS In: Atlas de Zoneamento Agroclimático do Estado de Minas Gerais - SEA (1980).

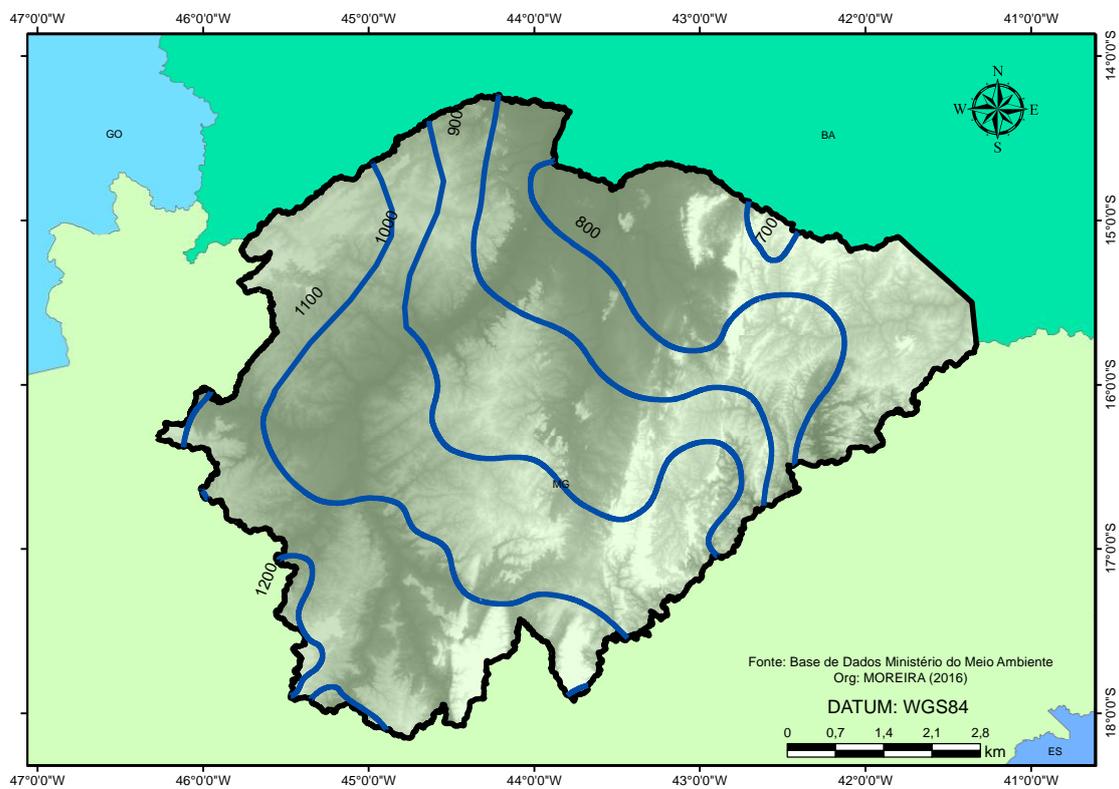


Figura 7: Isoietas da precipitação média anual do norte de Minas Gerais, de 1960 a 1990. Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2016).

No que se refere a vegetação, o norte de Minas Gerais, apresenta predominância dos biomas Caatinga e Cerrado (Figura 8). O bioma Cerrado se configura como a segunda maior formação florestal da América do Sul. Ocupa em Minas Gerais 57% da área do Estado (IBGE, 2004).

O Cerrado e o campo cerrado são muito representativos quanto às formações vegetacionais no norte de Minas Gerais, essa formação possui elementos arbóreos com troncos tortuosos, cobertos por uma casca grossa e folhas geralmente grandes e rígidas, sendo essas características influenciadas por um ambiente com restrição hídrica (FERRI, 1977).

O cerrado no norte de Minas Gerais é bastante explorado, principalmente pela prática de desmatamento para produção de carvão vegetal e para a implantação de pasto para o gado, uma vez que a atividade de pecuária extensiva é uma das bases econômicas da região (MMA, 2010a). Com o aumento do desmatamento do Cerrado e devido as condições de seca da região, este fator agrava a situação, uma vez que o solo recebe na época de chuva uma intensidade alta de precipitação. A vegetação exerce um papel importante no amortecimento do impacto desta precipitação no solo, que pode desencadear situações de erosão e conseqüentemente empobrecimento do solo.

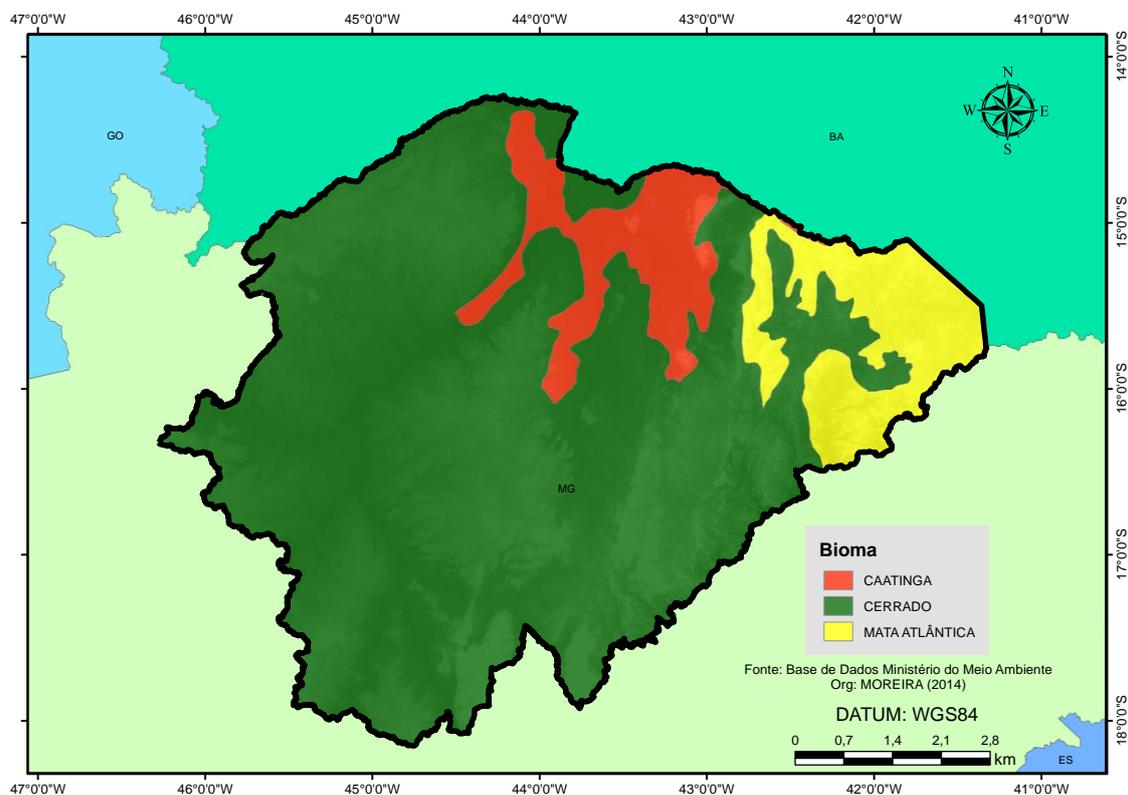


Figura 8: Biomas do norte de Minas Gerais. Fonte: IBGE (2002).

Quanto a Caatinga, formação também representativa no norte de Minas Gerais, esta possui característica de caducidade foliar, apresenta-se de forma esparsa, com porte arbustivo, oferece pouca proteção ao solo e possui alta resistência diante de situações de escassez hídrica (OLIVEIRA *et al.*, 2003).

O bioma Mata Atlântica nessa região é representado, principalmente, pelas fitofisionomias Floresta Estacional Decidual e Floresta Estacional Semidecidual. Uma vez que a definição de Mata Atlântica, de acordo com a Lei nº 11.428, de 2006 (BRASIL, 2006), contempla diferentes formações florestais e ecossistemas associados os quais foram detalhados pelo Decreto nº 6.660, de 2008 (BRASIL, 2008), e delimitados no Mapa da Área de Aplicação da Lei nº 11.428, de 2006 (BRASIL, 2006), elaborado e publicado pelo IBGE (MMA, 2010b).

Quanto as atividades econômicas desenvolvidas no norte de Minas Gerais, a economia da região está baseada na pecuária e no extrativismo (IBGE, 2001). Estas se concentram, principalmente, no setor primário, como a agricultura de subsistência, a silvicultura, a pecuária de corte e a fruticultura irrigada. Na região também se observa atividades de produção têxtil e biocombustível. As atividades do setor terciário se concentram na cidade pólo da região, Montes Claros, que apresenta maior dinamicidade e absorve a maior parte da população do norte de Minas Gerais (NUNES *et al.*, 2012).

Quanto a fertilidade dos solos (Figura 9) na região de estudo, são em sua grande maioria, solos de baixa e de muito baixa fertilidade. Isso se deve a sua composição, sendo formados por materiais altamente lixiviados, ricos em alumínio e com concentração de pedregulhos. A maioria dos solos são ácidos e de difícil correção. Devido aos seus constituintes e apresentar alta permeabilidade, o solo da região possui baixa capacidade de retenção de umidade, de nutrientes e de assimilar matéria orgânica (CPRM, 2010).

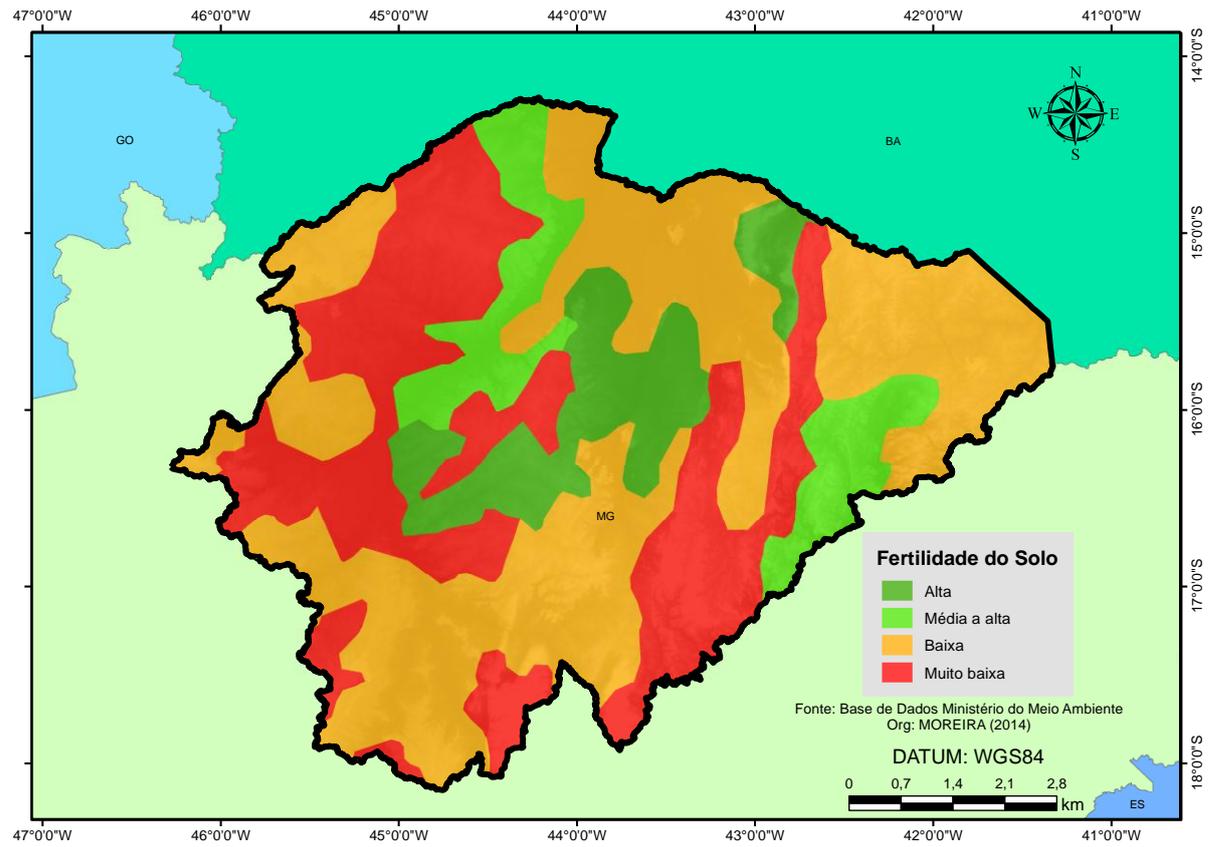


Figura 9: Fertilidade do Solo do norte de Minas Gerais. Fonte: IBGE, 2002.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os dados necessários para a realização das análises deste estudo compreendem: Índice de Água da Diferença Normalizada (NDWI) e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), ambos provenientes do sensor MODIS; dados de precipitação pluvial mensal, provenientes do produto 3B43 do satélite TRMM e de estações pluviométricas da ANA (Agência Nacional de Águas); dados mensais de variação da água de subsuperfície (*Equivalent Water Thickness*) da missão GRACE; dados de declaração de estado de emergência e calamidade pública, da defesa civil, dados perdas e danos, coletados a partir do AVADAN (Avaliação de Danos) e do FIDE (Formulário de Informações do Desastre); e informações reportadas em jornais sobre eventos de seca/estiagens, ocorridos entre 2003 a 2014.

4.1.1 Dados de Índice de Água da Diferença Normalizada (NDWI) e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)

As imagens da série temporal de NDWI foram obtidas por meio da coleta de imagens de reflectância correspondentes ao infravermelho médio (MIR) e ao infravermelho próximo (NIR), produto de índice de vegetação do MODIS, MOD13Q1 e, através deste mesmo produto, também foram adquiridas as imagens do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI).

As imagens de reflectância coletadas e de NDVI possuem uma resolução espacial de 250 metros, são uma composição de 16 dias, de *tiles* h13v10 e h14v10, coleção 5, disponíveis em *Earth Observing System Data Gateway*. Todos os dados coletados estão em uma projeção sinusoidal e em formato HDF (*Hierarchy Data Format*).

4.1.2 Dados de precipitação do produto 3B43 do satélite TRMM

Para o período de estudo foram coletadas 144 imagens de precipitação pluvial mensal. Estas imagens são disponibilizadas gratuitamente, pelo produto 3B43, do satélite meteorológico TRMM, em milímetros por hora, com resolução espacial de $0,25^\circ$, no *site* da NASA (<http://mirador.gsfc.nasa.gov/TRMM>). As imagens de precipitação são adquiridas em formato HDF, projeção LAT/LONG e DATUM WGS-84. A área de domínio compreende o intervalo de latitude 50° N e 50° S e longitude 180° W e 180° E. Essas imagens estão com coordenadas ao Norte do Equador, sendo necessária a conversão para coordenadas Sul.

4.1.3 Dados de precipitação das estações pluviométricas da ANA

Os dados de precipitação também foram adquiridos de estações pluviométricas. Estes correspondem aos dados das estações da ANA (Agência Nacional de Águas), do sistema gratuito *Hidroweb*, de 55 estações pluviométricas localizadas na região norte de Minas Gerais, conforme apresenta a Figura 10.

O sistema *Hidroweb* da ANA fornecem as informações acerca da precipitação mensal de cada posto pluviométrico, em arquivo em formato de texto.

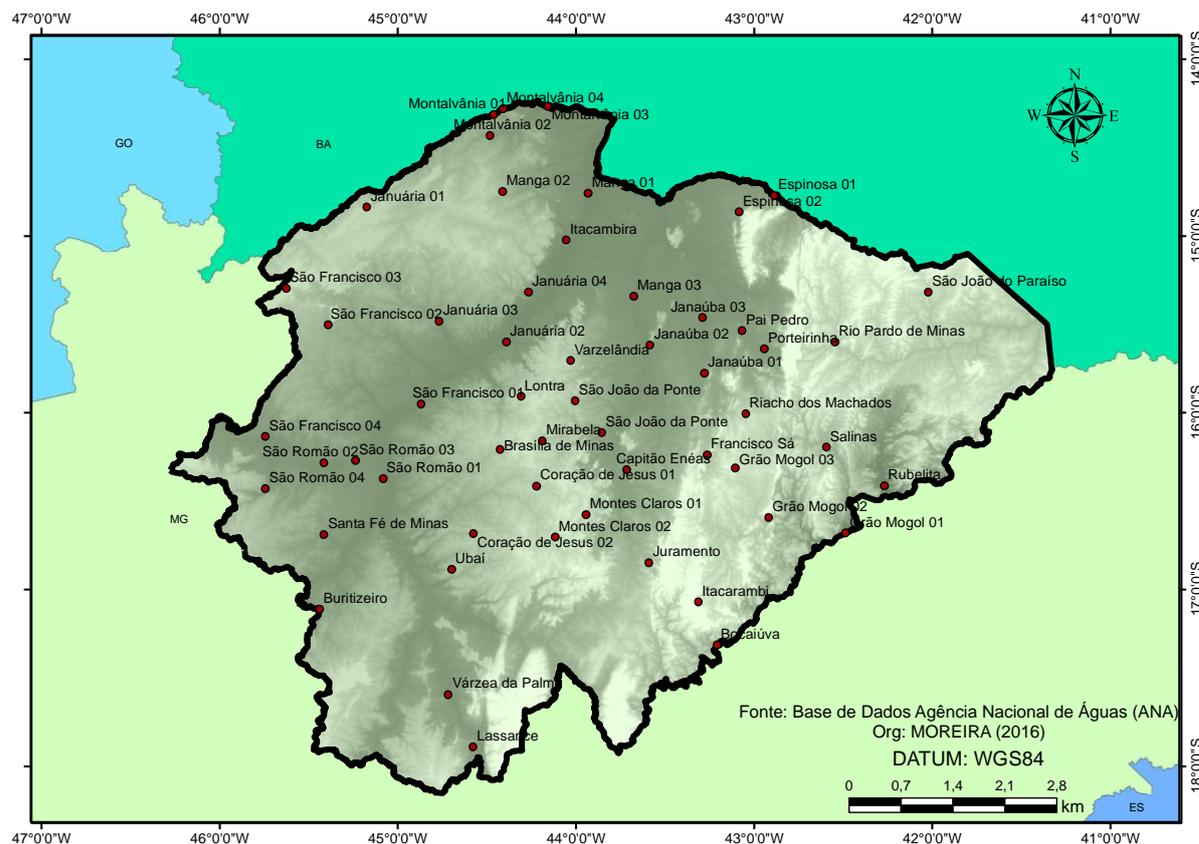


Figura 10: Localização das estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) no norte de Minas Gerais. Fonte: ANA – Hidroweb.

4.1.4 Dados de Variação de água da subsuperfície - GRACE

Foram obtidos dados mensais de variação de água da subsuperfície, disponibilizados de forma gratuita pelo *Jet Propulsion Laboratory*, da Agência Espacial Americana (NASA). As imagens de variação de água da subsuperfície das soluções GRACE possuem uma resolução temporal mensal e espacial de 300 km.

Os dados possuem algumas falhas, desta forma, para o período de estudo, dispõe-se de 133 dados das soluções GRACE, para cada modelo (JPL, CSR e GFZ).

4.1.5 Dados da Defesa Civil

As informações da defesa civil que foram levantadas são aquelas de decretos de situação de emergência e calamidade pública, dados de avaliação de danos (AVADAN) e dados do Formulário de Informações do Desastre (FIDE), que substituiu o AVADAN a partir de 2012. Todos estes são referentes aos desastres de seca ou estiagem durante os anos entre 2003 a 2014 e foram adquiridos de forma gratuita junto ao sistema S2ID

(Sistema Integrado de Informações sobre Desastres) (<https://s2id.mi.gov.br/>) do Ministério da Integração Nacional.

Em relação aos decretos de anormalidade, seja calamidade pública ou situação de emergência, conforme CASTRO (1999), a caracterização destes decretos depende da análise de critérios relacionados a intensidade dos danos causados, sejam, materiais, ambientais, humanos e também critérios relacionados aos prejuízos que o evento em decretação veio a causar, na ordem social e econômica.

Existem diferenças de magnitude entre decretos de situação de emergência e de calamidade pública. Para o Ministério da Integração Nacional (2012) a situação de emergência é definida como uma situação anormal devido a ocorrência de um desastre, de forma a requerer auxílio complementar do estado ou da união para lidar com a situação, embora, que a sua capacidade inicial de resposta ainda não tenha se excedido. Quando se trata do estado de calamidade pública, o MI (2012), o define como uma situação anormal promovida por um desastre, mas que nessa situação, o local atingido, conforme a magnitude dos danos requer auxílio imediato e direto para a realização das ações de recuperação e socorro.

Os dados coletados foram sintetizados por meio de planilha, visando à identificação do número de declarações por ano, por mês e o número de declarações por município.

Nos relatórios do AVADAN e do FIDE foram coletadas as informações sobre perdas e danos em ocorrência de seca e estiagem na região.

Foram pesquisados os relatórios para todos os municípios da região norte de Minas Gerais para o período de estudo. Os relatórios foram organizados para sistematização das informações para todos os anos em análise.

4.1.6 Dados Reportados

Assim como os dados de decretações de anormalidade e perdas e danos por motivo de seca ou estiagem na área de estudo, também foram levantadas as informações sobre a ocorrência destes fenômenos e os seus impactos nos municípios do norte de Minas Gerais entre o período de 2003 a 2014.

As informações foram levantadas por ano de ocorrência e em base online de jornais locais, estaduais e nacionais. Estas informações também foram sistematizadas

em planilha eletrônica, de forma a entender os principais aspectos das ocorrências relatadas e dos decorrentes impactos, ocasionadas nestes municípios.

4.2 Métodos

As análises realizadas neste trabalho foram executadas de acordo com o fluxograma metodológico descrito pela Figura 11.

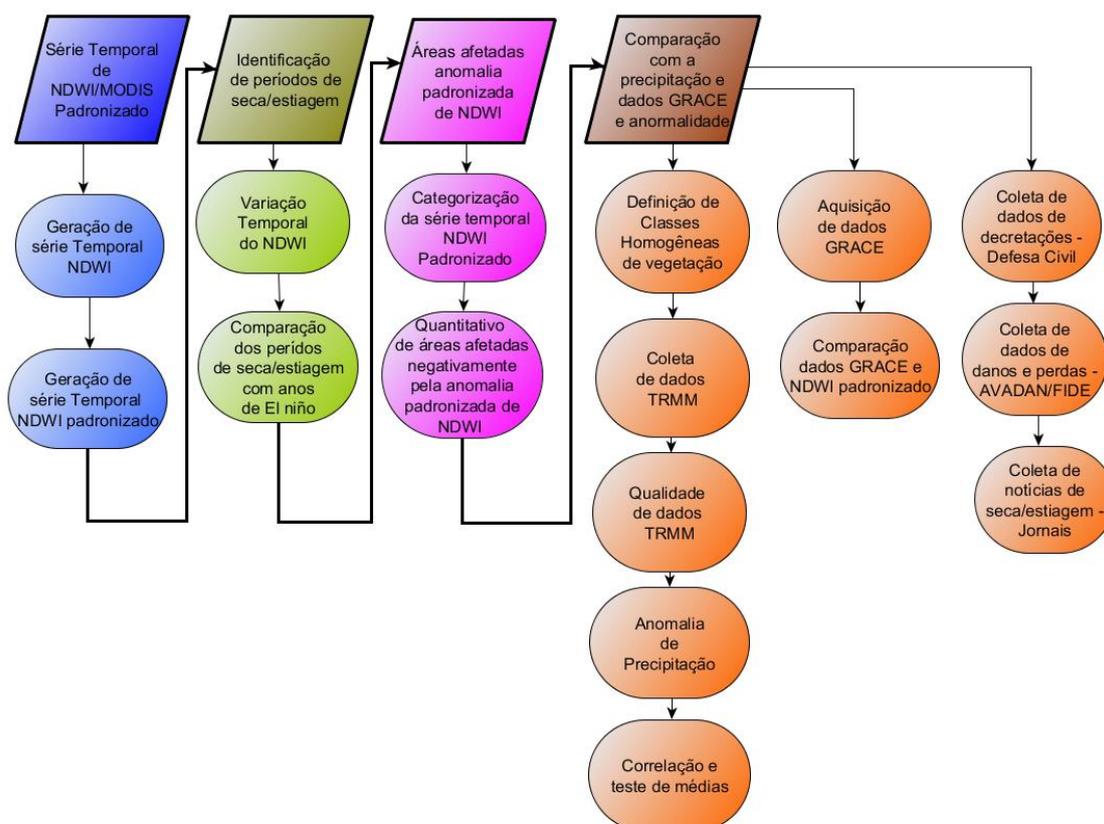


Figura 11: Fluxograma Metodológico.

4.2.1 Geração de série Temporal de Anomalia Padronizada de NDWI

Para a geração da série temporal de Anomalia Padronizada de NDWI foram utilizadas as imagens de reflectância correspondentes ao infravermelho médio (MIR) e ao infravermelho próximo (NIR), produto de índice de vegetação do MODIS.

Como este trabalho se propõe a utilizar uma escala mensal, as cenas de 16 dias, foram compostas em cenas mensais, utilizando uma composição de máximo valor, para as cenas correspondentes ao mesmo mês, para adequação a uma escala de análise.

Foram coletadas 552 imagens. Posteriormente foram gerados 144 mosaicos de composição mensal, para as cenas do MIR e do NIR, de forma a abranger a área de estudo para o período de janeiro de 2003 a dezembro de 2014.

A partir das imagens de reflectância foi calculado o NDWI para toda a série temporal, para o norte de Minas Gerais, utilizando a Equação 15.

$$NDWI = \frac{\rho_{IVp} - \rho_{IVm}}{\rho_{IVp} + \rho_{IVm}} \quad (15)$$

Onde: ρ_{IVp} corresponde ao canal do infravermelho próximo e ρ_{IVm} ao canal do infravermelho médio.

Após a geração de série temporal de imagens de NDWI, esta foi padronizada empregando a Equação 16:

$$Anomalia\ padronizada\ de\ NDWI = \frac{NDWI_j - \overline{NDWI}_{referência}}{\sigma_{referência}} \quad (16)$$

Onde: $NDWI_j$ corresponde ao valor do NDWI no período j ; $\overline{NDWI}_{referência}$ corresponde ao valor da média do NDWI para diversos anos, no período referido; e $\sigma_{referência}$ é o desvio padrão do NDWI de vários anos no período referido.

A geração desta série de imagens teve o intuito de verificar a relação de desvios padrões em relação a média, de forma a identificar possíveis ocorrências de períodos de seca/estiagem.

Para uma análise temporal da seca/estiagem, os resultados obtidos com a anomalia padronizada de NDWI foram categorizados de acordo com os valores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Categorização dos valores de Anomalia Padronizada de NDWI.

Valores de Anomalia padronizada de NDWI	Categoria
$\geq 2,00$	Extremamente úmido
1,50 a 2,00	Severamente úmido
1,00 a 1,50	Moderadamente úmido
1,00 a -1,00	Normal
-1,00 a -1,50	Moderadamente Seco
-1,50 a -2,00	Severamente Seco
$\leq -2,00$	Extremamente Seco

Fonte: Adaptado de Leivas *et al.*, 2014.

4.2.2 Identificação de períodos de seca/estiagem

Para fomentar a identificação de períodos de seca estiagem, com base na série temporal de anomalia padronizada de NDWI, buscou-se entender sobre o comportamento médio da região de estudo. Utilizando-se de série temporal de NDWI foi realizada a composição de imagens médias de cada mês do ano, para todo o período de estudo. A partir desta série, foi analisado o panorama médio da região, quanto à variação temporal de NDWI, visando a caracterização da variabilidade temporal do teor de umidade da vegetação na região.

Foram investigadas as características gerais da área de estudo, relacionadas ao período chuvoso e seco, de forma a entender sobre o seu início, término e duração, em termos médios. Posteriormente, em discussão dos resultados apresentados pela anomalia padronizada de NDWI, essas informações foram utilizadas, para identificar se o período chuvoso da região apresentou-se, durante os anos de estudo com anormalidade negativa, influenciando na determinação de um período de seca/estiagem.

Por meio da variação temporal e da categorização da anomalia padronizada de NDWI foi realizada a identificação dos períodos que se apresentaram abaixo da média da série de dados. Essa identificação se deu por meio da identificação daqueles períodos com valores abaixo de -1, que se enquadrava em categorias de seca/estiagem. Também foi verificada a relação destes períodos identificados com anos de *El niño*.

4.2.3 Quantificação das áreas afetadas por secas/estiagem

As áreas categorizadas como de ocorrência de seca/estiagem foram quantificadas para cada ano do período de estudo. Esses quantitativos foram organizados em uma tabela com os valores de áreas para cada classe de categoria de seca/estiagem obtida por meio dos dados de anomalia padronizada de NDWI para cada ano do período de estudo.

O quantificado de áreas afetadas por eventos de seca ou estiagem foi analisado em comparação com os dados levantados de decretação de situação de emergência ou calamidade pública por motivo de seca ou estiagem para o território do norte de Minas Gerais.

4.2.4 Anomalia Padronizada de NDWI e a relação com os dados de precipitação, anomalia de precipitação e armazenamento de água

Com o intuito de investigar as relações entre os dados de anomalia padronizada de NDWI com dados de precipitação e anomalia de precipitação e dados de armazenamento de água, foram realizadas comparações das variações temporais destes dados e também realizados testes de correlação e de médias.

Para realizar estas comparações foram definidas regiões homogêneas, de forma a coletar amostras de valores, tanto de anomalia padronizada de NDWI, quanto de dados de precipitação, para fomentar os testes de correlação e de médias. Também foi necessária a verificação da qualidade dos dados de precipitação provenientes do satélite TRMM, para posteriormente, realizar os testes propostos.

4.2.4.1 Definição de Classes homogêneas

Como suporte às análises de qualidade dos resultados obtidos, utilizou-se de dados de série temporal de NDVI para obtenção de regiões homogêneas quanto a variabilidade temporal da vegetação, utilizando a técnica de *clustering* ISODATA.

O *clustering* ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*) visa identificar padrões típicos de uma área de *pixels*. Para a identificação destes padrões e realizar o agrupamento das classes, o método utiliza da iteratividade, realizando repetidas classificações, e de análises estatísticas das amostras, sendo utilizado o desvio-padrão e a média (LIU, 2006).

Para implementar o método ISODATA nos agrupamentos das classes, foi necessário definir os parâmetros:

- Número máximo de agrupamentos: Foi considerado como o máximo de agrupamentos a serem formados, o quantitativo de 30 agrupamentos;
- Limiar (*Threshold*) de convergência igual a 5. Este parâmetro representa a porcentagem máxima de *pixels* cujos valores de classe irão permanecer sem mudança entre as iterações;
- Mínimo de *pixels* em cada agrupamento igual a 20. Caso houver um menor número de *pixel* na classe ela é desconsiderada e os *pixels* vão para a classe mais próxima.

- Desvio-padrão igual a 1. Se o desvio-padrão de uma classe é menor do que o *Threshold*, então a classe é dividida em duas classes; e,

- Número de iterações igual a 30.

Após a definição das regiões homogêneas na área de estudo, foram definidas as classes de cada agrupamento, tomando como base o banco de dados de fitofisionomias do ZEE/MG (Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais).

Após a definição das classes, estas foram utilizadas como base para a realização de análises de correlação e teste de médias.

4.2.4.2 Precipitação – TRMM

Para a realização dos testes de correlação de médias, foram coletados e organizados os dados de precipitação do satélite TRMM. Foram coletadas 144 imagens de precipitação pluvial mensal, disponibilizadas pelo produto 3B43 do satélite TRMM.

As imagens de precipitação TRMM adquiridas em coordenadas ao Norte do Equador foram convertidas para coordenadas Sul e também foram convertidas da unidade de milímetros por hora (mm/h), para milímetros por mês (mm/m).

Outro procedimento auxiliar foi necessário, objetivando a verificação da concordância dos dados de precipitação TRMM com os dados de precipitação das estações pluviométricas. Para isto, utilizou-se de dados de precipitação das estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas – ANA, do sistema *Hidroweb*. Os dados coletados de 55 estações, para todo o período de estudo, foram utilizados para verificação de concordância com aqueles dados provindos do satélite TRMM.

Por meio da localização das estações foram coletados, junto das imagens TRMM de cada ano, os valores de precipitação correspondente. Os resultados de ambos dados, do TRMM e das estações pluviométricas, analisados através de gráficos de correlações, fomentando a avaliação de sua adequação para o uso dos dados de precipitação TRMM nos testes de médias e de correlação.

4.2.4.3 Testes de correlação e de médias

Por meio dos dados da série temporal precipitação e anomalia de precipitação (ambos do TRMM) e armazenamento de água (GRACE), foram analisados os eventos

de seca/estiagem estimados pelo processamento de anomalia padronizada de NDWI, utilizando de testes de correlação e de médias.

Para todos os testes realizados foram analisados valores médios de polígonos, em cada classe homogênea, definida no processo de *clustering* ISODATA considerando a variabilidade temporal da vegetação, utilizando o NDVI.

Buscou-se relacionar os dados apresentados pelo NDWI e a anomalia padronizada de NDWI, com dados de precipitação, anomalia de precipitação e variação de água da subsuperfície, sendo que os dados de anomalia de precipitação foram obtidos por meio da Equação 17.

$$\text{Anomalia de Precipitação} = TRMM_i - \overline{TRMM_i} \quad (17)$$

Onde: $TRMM_i$ corresponde ao valor da precipitação/TRMM no período i e $\overline{TRMM_i}$ corresponde ao valor da média da precipitação/TRMM nos diversos anos da série temporal em estudo, no período i .

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Classes homogêneas quanto a variabilidade temporal de NDVI

Para fomentar as análises estatísticas de anomalia padronizada de NDWI e de precipitação, foram definidas regiões homogêneas com base na variabilidade temporal do NDVI, utilizando da técnica ISODATA. As classes identificadas representam cinco grandes regiões homogêneas (Campo, Campo cerrado, Cerrado, Floresta Estacional Decidual e Outros), Figura 12, apresenta as regiões definidas a partir da comparação com o mapa de fitofisionomias da cobertura vegetal de Minas Gerais, elaborado pelo ZEE para o ano de 2009 (Figura 13).

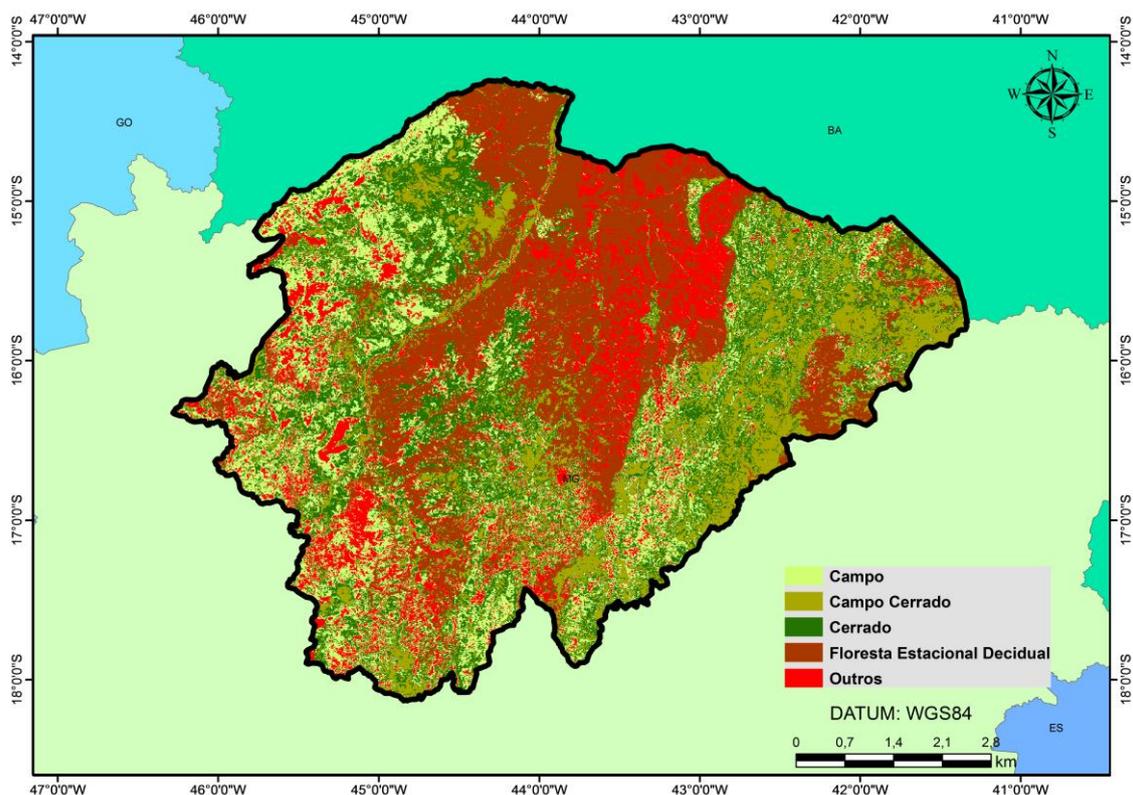


Figura 12: Regiões homogêneas quanto à variabilidade temporal do NDVI, entre 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais.

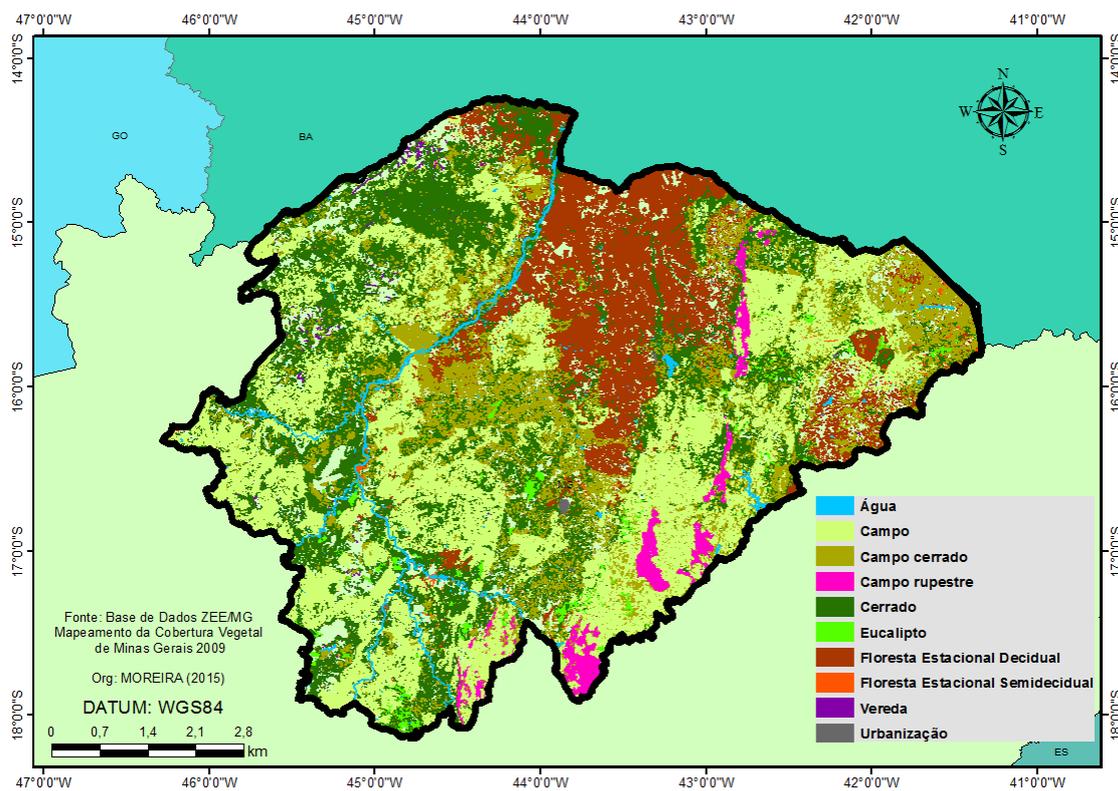


Figura 13: Mapeamento da Cobertura Vegetal no norte de Minas - 2009. Fonte: ZEE/MG.

A classe Outros compõe mais de uma classe, sendo, principalmente, a classe solo exposto e campo rupestre. No mapeamento realizado pelo ZEE/MG, estas classes foram definidas separadamente, mas no processo de *clustering*, devido a resposta espectral de algumas fitofisionomias se apresentam muito próximas entre si, o resultado da técnica alocou em uma mesma classe estas regiões.

Conforme Oliveira Filho (*apud* Scolforo e Carvalho, 2006), o campo rupestre ocorre, principalmente, em regiões de serras e afloramento rochosos que possuem resposta espectral muito próximo ao solo exposto e área construída. Conforme IEF (2016), os campos rupestres possuem característica de cobertura vegetal de menor porte e predomínio de vegetação herbácea em que os arbustos são escassos e as árvores raras e isoladas. Essa característica favorece o aparecimento do solo, e em uma classificação, devido a presença de áreas de solo exposto e afloramentos rochosos, a confusão entre essa classe com a de solo exposto apresenta-se significativa.

A região homogênea de campo se localiza mais ao oeste e sul da região. Engloba as gramíneas, que de acordo com Oliveira Filho (*apud* Scolforo e Carvalho, 2006), sofrem grandes pressões de substituição por áreas de pastagens. Principalmente devido a uma economia baseada na criação de gado, e áreas de pastagens plantadas. A classe

campo, muitas vezes, é considerada como pastagens em alguns mapeamentos de uso do solo na região norte de Minas, conforme Leite *et al.* (2011), Souza e Reis (2011), Leite *et al.* (2012) e Moreira *et al.* (2014).

A vegetação do cerrado se caracteriza pela presença de árvores pequenas, troncos tortuosos e cascudos. Contém dois estratos, o campestre e o lenhoso, o clima é sazonal, com duas estações bem definidas, uma chuvosa e outra seca, sendo alta a incidência de fogo na estação seca. OLIVEIRA FILHO (*apud* SCOLFORO E CARVALHO, 2006; CAVASSAN, 2013).

As classes de campo cerrado e cerrado são bem próximas, principalmente, nas porções leste e oeste. Assim como as áreas de campo, a vegetação de campo cerrado, também sofre pressões antrópicas de substituição de sua vegetação por áreas agrícolas e pastoris. As áreas de cerrado também sofrem com questões de desmatamento e queimadas.

No norte de Minas Gerais a Floresta Estacional Decidual e a Caatinga Arbórea têm a mesma identidade. Estas regiões estão sujeitas ao corte ilegal de madeira e queimadas irregulares. Assim, como o cerrado, possui clima sazonal, com duas estações bem marcadas, a seca e a chuvosa, e ainda pode ser associado aos solos eutróficos OLIVEIRA FILHO (*apud* SCOLFORO E CARVALHO, 2006).

5.2 Qualidade dos dados de Precipitação – TRMM

Por meio das Figuras 14 e 15 é possível analisar o quão relacionado estão as precipitações provindas das estações da ANA com aquelas estimadas pelo satélite TRMM.

A Figura 14 apresenta a distribuição temporal das precipitações médias mensais, da ANA e do TRMM.

Verifica-se que os dados de precipitação apresenta uma distribuição similar ao longo da série temporal, apresentando uma subestimação dos dados do satélite TRMM. Apesar dos dados TRMM se apresentarem subestimados na análise da série temporal, ambos apresentam o mesmo comportamento ao longo do tempo e demonstram uma mesma distribuição.

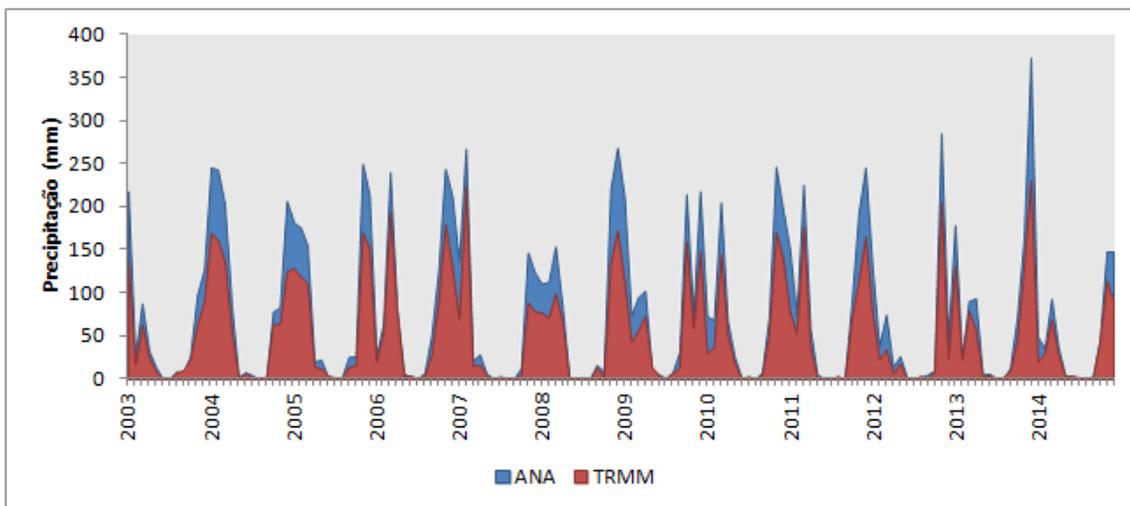


Figura 14: Distribuição temporal dos dados de precipitação médio mensal do satélite TRMM e das estações pluviométricas da ANA.

Corroborando com os resultados obtidos na análise da qualidade dos dados TRMM, Silva *et al.* (2013), Sousa *et al.* (2013) e Diaz *et al.* (2015) avaliaram a confiabilidade das estimativas de precipitação do TRMM. Foram observadas diferenças consideráveis devido as escalas de cobertura dos dados, as estações apresentam escala pontual e os valores estimados pelo TRMM uma maior resolução espacial, de $0,25^\circ$. Apesar destas diferenças, os dados TRMM apresentaram um bom desempenho quando comparados com os dados de estações, e ainda, esses dados apresentaram valores muito próximos aos registrados pelas estações pluviométricas. Além de ressaltaram a evolução da eficiência e consistência das estimativas de precipitação do TRMM ao longo dos anos.

A Figura 15 apresenta a dispersão das precipitações, da ANA e do TRMM, para cada localidade das estações pluviométrica para cada ano da série temporal. São observados por meio destes gráficos, graus de coeficiente de determinação (R^2), variando de 0,6331 a 0,8545, sendo esses valores considerados satisfatoriamente concordantes entre si.

Corroborando com a qualidade dos dados TRMM analisada neste trabalho, Camparotto *et al.* (2013) que analisaram a qualidade dos dados de precipitação do satélite TRMM para o Estado de São Paulo, também verificaram que estes apresentaram boa concordância com os dados de estações de medição *in situ*, e que ainda, os dados provenientes do satélite TRMM são uma alternativa eficiente na aquisição de informações acerca da precipitação pluvial.

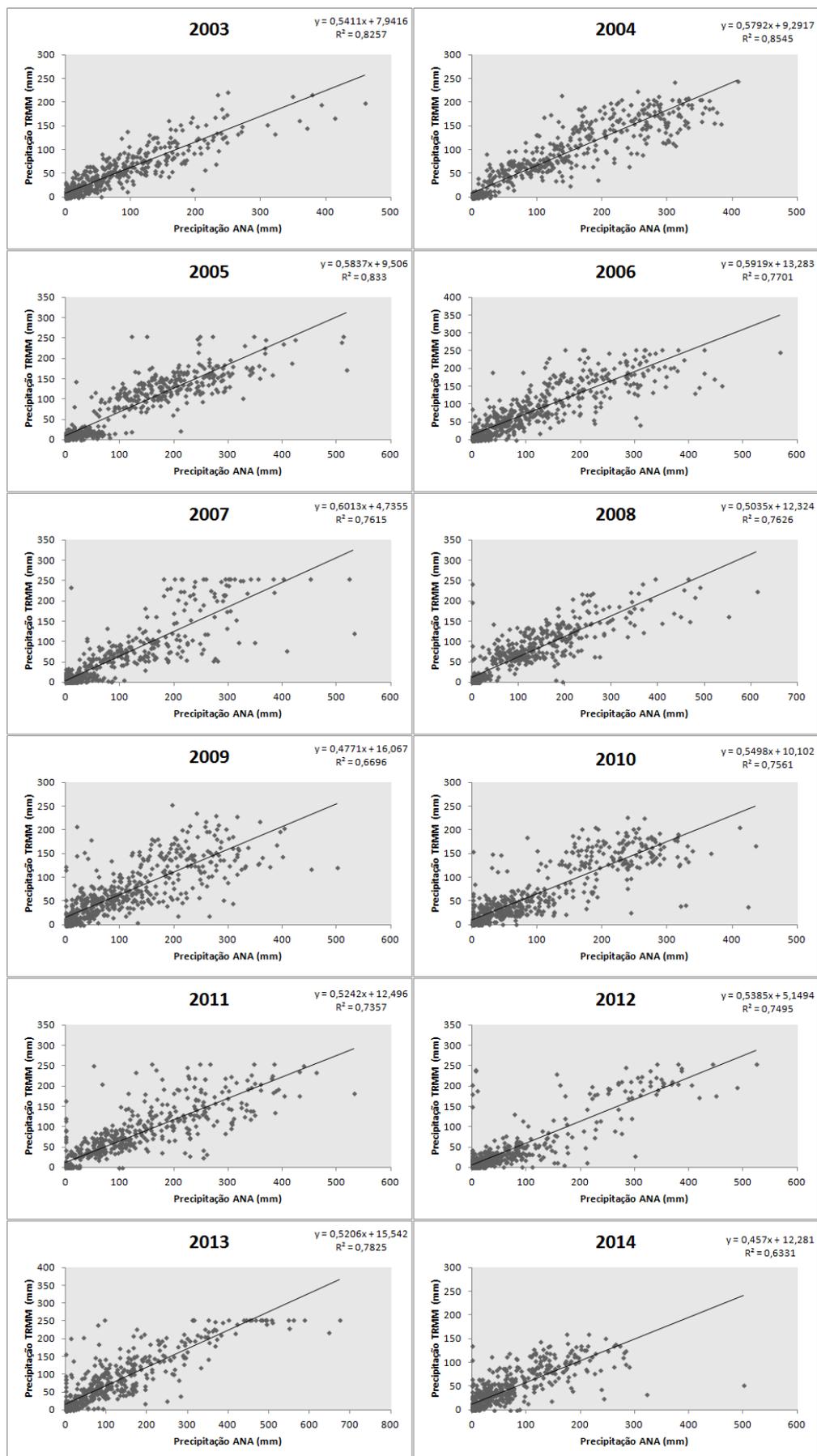


Figura 15: Gráficos de dispersão entre os dados de precipitação do satélite TRMM e das estações pluviométricas da ANA.

A Tabela 4 apresenta os valores de erro padrão para cada ano da série temporal em estudo. Conforme Naghettini e Andrade Pinto (2007), o erro padrão de uma estimativa é a raiz quadrada da variância dos resíduos e visa a medição da dispersão dos resíduos em torno da reta de regressão.

Tabela 4: Coeficiente de determinação (R^2) e Erro padrão para os dados de precipitação do TRMM e das estações pluviométricas da ANA.

	R^2 *	Erro Padrão (mm)
2003	0,8257	30,9126
2004	0,8545	41,1196
2005	0,833	43,4198
2006	0,7701	50,0289
2007	0,7615	46,0258
2008	0,7626	50,8252
2009	0,6696	56,8322
2010	0,7561	47,4655
2011	0,7357	55,3162
2012	0,7495	46,3316
2013	0,7825	56,3371
2014	0,6331	40,7509

* Coeficiente de determinação para nível de significância de 5%.

Neste estudo foram verificado que os maiores valores de erro padrão foram para os anos de 2009, 2011 e 2013, sendo 56,8322; 55,3162 e 56,3371 milímetros, respectivamente.

5.3 Distribuição Espaço-Temporal do NDWI médio mensal

Com o intuito de entender o comportamento médio, com o intuito de fomentar o monitoramento da área de estudo, realizou-se a de composição de imagens médias de NDWI (Figura 16) para comparação com a anomalia padronizada de NDWI.

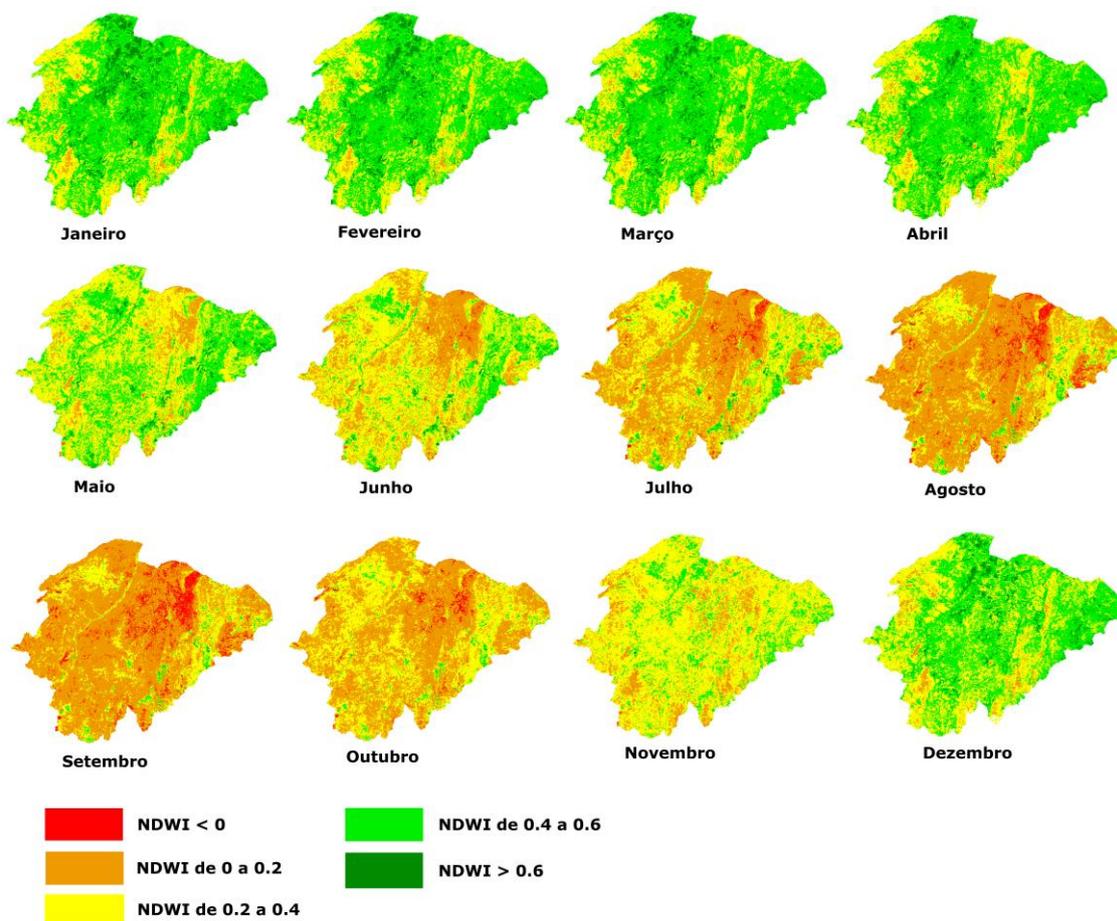


Figura 16: Variabilidade Temporal do NDWI, período de 2003 a 2014, para a região norte de Minas Gerais.

Analisando a Figura 16, foi observado que por meio das médias mensais do período 2003-2014 foi identificada uma sazonalidade bem marcante no norte de Minas Gerais, com um período mais úmido e outro mais seco. Maciel *et al.* (2012) também identificaram esses dois períodos para a região. Os autores, por meio da análise de série histórica da precipitação, de 1980 a 2011, observaram que a precipitação se concentra entre os meses de outubro a março e, nos meses de abril a setembro a precipitação é baixa ou muito baixa, caracterizando o período seco.

No presente estudo, com a aplicação do NDWI médio foi identificado que entre os meses de dezembro a abril a região apresenta valores de NDWI consideráveis de um período mais úmido. Nos outros meses, principalmente de julho a outubro, predominam valores baixos de NDWI que não ultrapassam 0,20. Nos meses de julho a setembro são verificados valores inferiores a zero, caracterizando um período de menor umidade da vegetação, conforme Gao (1996).

Verificou-se através do NDWI médio que o período seco tem seu início entre os meses de maio e junho, sendo que nos próximos quatro meses o comportamento médio apresenta valores de NDWI consideráveis para uma estação seca, de até 0,20 e ainda com valores abaixo de zero. A partir de novembro, se estabelece um período de maiores valores de NDWI, entre 0,4 a 0,6; e a partir de dezembro são observados valores superiores a 0,6, que indicam uma maior umidade da vegetação (GAO, 1996).

Comparando com o mapa das regiões homogêneas quanto a variabilidade do NDVI (Figura 12) se observa que na região de ocorrência da fitofisionomia Floresta Estacional Decidual é onde primeiro se verifica o aparecimento da categoria de NDWI mais baixo, no mês de junho, o que indica o período de maior déficit hídrico.

Nessa região também se verificam as áreas de maiores valores de NDWI no período chuvoso, indicando uma alta variabilidade de NDWI.

A dinâmica desta fitofisionomia pode estar associada à perda das folhas no período seco, quando esta diminui o seu conteúdo arbóreo. No entanto, basta a ocorrência de precipitações para a região apresentar um maior verdor, resultando em maiores valores dos índices de vegetação. Essas relações corroboram com os trabalhos de Pezzini (2008) e Costa *et al.* (2013) que estudaram essa fitofisionomia no estado de Minas Gerais, e indicam a sazonalidade da Floresta Estacional Decidual com a ocorrência ou não de precipitações.

5.4 Períodos de seca/estiagem e a sua relação com o *El Niño*

Foram identificados três períodos que apresentam significativa anormalidade negativa de NDWI (Figura 17). Os períodos em destaque correspondem aos anos de 2003, 2007-2008 e 2012-2014.

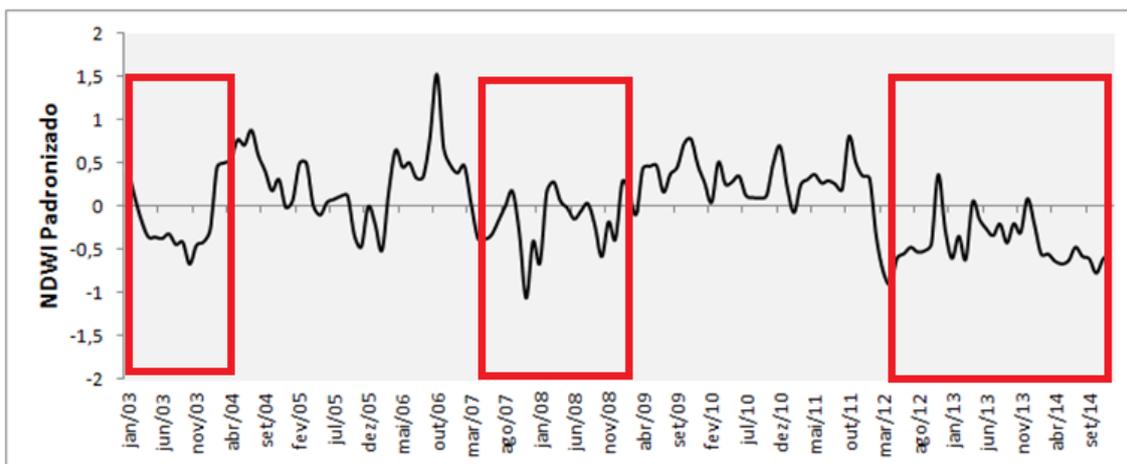


Figura 17: Variação da anomalia padronizada de NDWI, período de 2003 a 2014, para o norte de Minas Gerais.

Considerando que a influência do ENOS se apresenta mais marcada, nas regiões Sul e Nordeste do Brasil, onde em anos de *El Niño* ocorrem precipitações acima da média na região Sul e abaixo da média na região Nordeste, ocasionando nesta última, estiagens e secas (ALVES e REPELLI, 1992; BERLATO e FONTANA, 1998; MINUZZI *et al.*, 2005), foi verificado que a concordância destes períodos com anos de *El niño*.

Para o Estado de Minas Gerais, foi verificado por Minuzzi *et al.* (2005), que em anos de *El Niño* na metade sudoeste do Estado existe a tendência de precipitações acima da média e na metade nordeste, a tendência é de precipitações abaixo do normal, e ainda ocorre o atraso na temporada do período chuvoso.

Neste contexto, a comparação dos anos de ocorrência do fenômeno ENOS (Tabela 5) com aqueles períodos identificados como de seca/estiagem (Figura 17), foi verificado que no norte de Minas Gerais, nem todos os eventos de seca/estiagem, identificados por meio da aplicação da anomalia padronizada de NDWI, coincidiram com os anos de *El Niño*.

Tabela 5: Anos de ocorrência do Fenômeno ENOS.

OCORRÊNCIA DO FENÔMENO ENOS	
Ano	Fenômeno
2002 - 2003	<i>El Niño</i>
2004 - 2005	<i>El Niño</i>
2006 - 2007	<i>El Niño</i>
2007 - 2008	<i>La Niña</i>
2009 - 2010	<i>El Niño</i>
2010 - 2011	<i>La Niña</i>
2011 - 2012	<i>La Niña</i>

Fonte: NOAA (2016).

O período 2002-2003, identificado como um período de seca/estiagem, coincidiu com um período de ocorrência de *El Niño*. No entanto, em 2004-2005 e em 2009-2010, que também foram períodos de *El Niño*, não foi identificado uma situação de estiagem/seca por meio da anomalia padronizada de NDWI. O período de 2007-2008 foi identificado como um período de seca/estiagem, quando ocorreu de 2006 a início de 2007 o *El Niño*, e final do ano de 2007 e em 2008 ocorreu o fenômeno *La Niña*. Destaca-se que nem em todos os períodos identificados por meio da aplicação da anomalia padronizada de NDWI, coincidiu com a ocorrência de *El Niño*.

Neste contexto, entende-se que existe uma relação entre a ocorrência de períodos de seca/estiagem na região e de anos de *El Niño*, no entanto, assim como em Alves e Repelli (1992), não foi observada a predominância de ocorrência do fenômeno em períodos identificados pela aplicação da anomalia padronizada de NDWI, como de seca/estiagem.

5.5 Decretações de anormalidade por seca/estiagem

A Figura 18 apresenta o quantitativo de decretações de anormalidade por motivo de seca ou estiagem nos municípios do norte de Minas Gerais.

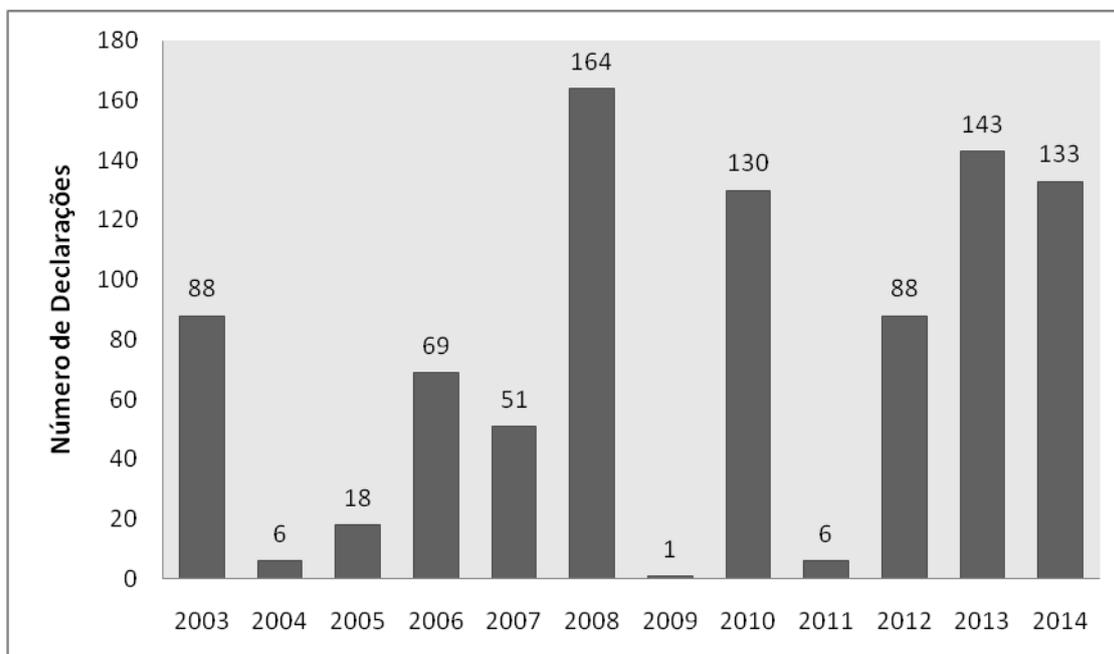


Figura 18: Número de declarações de anormalidade devido a seca ou estiagem, período de 2003 a 2014, nos municípios do norte de Minas Gerais.

Destacam-se os anos de 2003, 2008, 2010 e o período de 2012 a 2014, como aqueles com número expressivo de decretos de anormalidade.

De acordo com o alto número de decretos por ano, em 2008, 2010, 2013 e 2014, sendo estes superiores ao número de municípios da região, que são 89 municípios, verificou que nesses anos, houve municípios que decretaram situação de anormalidade mais de uma vez no mesmo ano.

Em relação aos meses com maior número de decretos, foi identificado que em praticamente todos os meses do ano, houve um número significativo de decretos por anormalidade, conforme Figura 19. Em julho, mês que possui menor número de decretos, nesta série temporal, obteve 24 declarações, seguido do mês de Fevereiro, com 27 declarações. No entanto, é possível destacar os meses de junho, agosto e novembro, com número de declarações acima de 100.

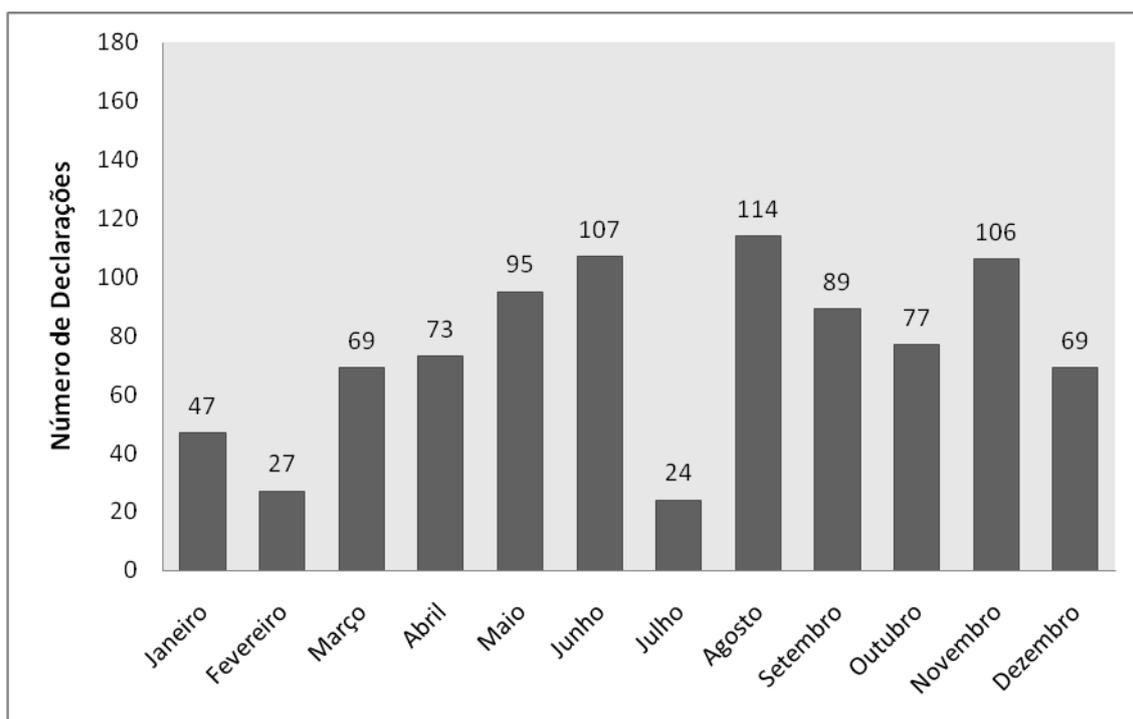


Figura 19: Declarações de anormalidade, por mês, devido a seca ou estiagem, período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais.

É importante salientar, que no caso de desastres, por motivo de seca ou estiagem, de acordo com Castro (2003), para ser considerado uma estiagem é necessário atraso superior a 15 dias do início das precipitações e médias mensais da precipitação do período chuvoso abaixo de 60%.

Diante dessa situação, entende-se que os meses organizados com os números de decretos, correspondem ao período em que a situação de uma estiagem/seca já estava instalada, ou ainda, a situação de seca ou estiagem pode ter atraso para a sua decretação, visto que o fenômeno se instala de forma gradual, dificultando a identificação de seu início e término.

A Figura 20 apresenta a espacialização do número de decretações realizadas pelos municípios do norte de Minas Gerais, entre 2003 a 2014. Observa-se que a maioria dos municípios da região, durante o período de estudo, apresentam mais de 10 declarações de anormalidade por motivo de seca/estiagem.

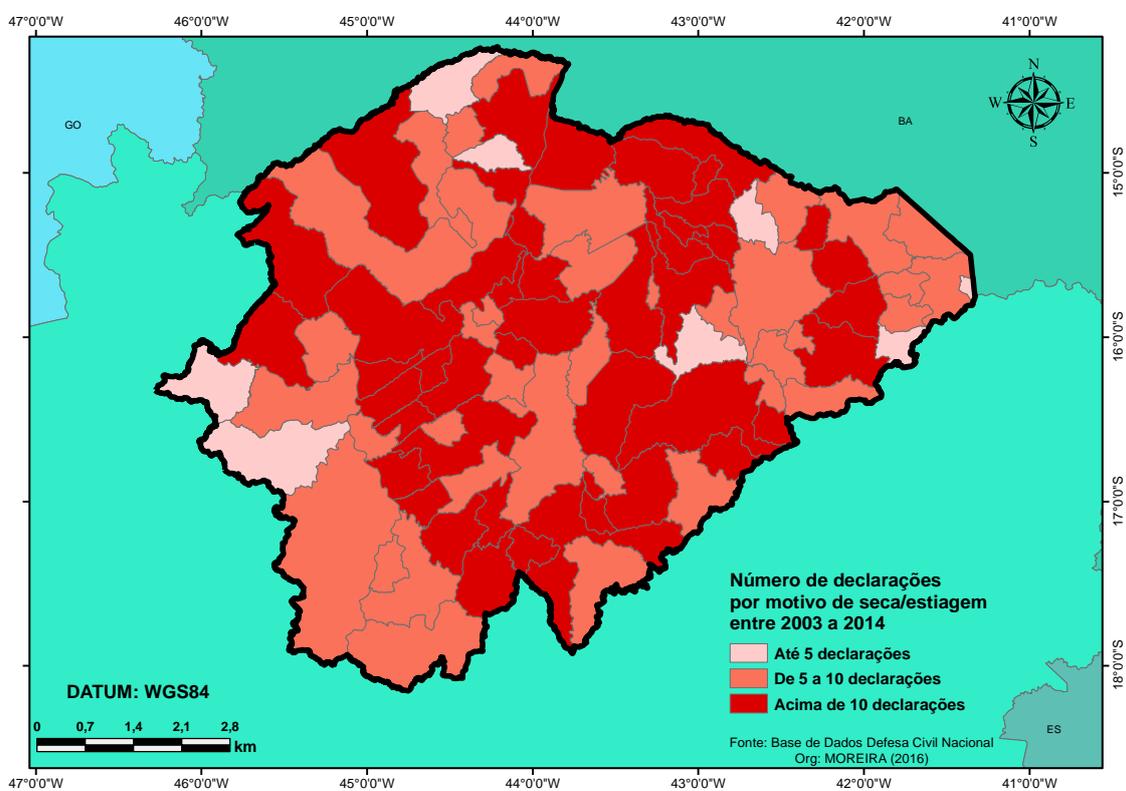


Figura 20: Espacialização do número de decretos de anormalidade por motivo de seca/estiagem, entre 2003 a 2014, nos municípios do norte de Minas Gerais.

A região também apresentou um padrão espacial de declarações de anormalidade, no período de estudo, diversificado. Nota-se que a região mais ao sul apresentou um número de entre 5 a 10 declarações entre 2003 a 2014, ainda que haja poucos municípios em que as declarações são de até 5 no período em análise. Constatou-se também que não há, em nenhum ano, ao menos um município, que não estivesse no enfrentamento de problemas decorrentes das secas ou estiagens. Todos os

municípios, em algum momento tiveram que recorrer à ajuda para enfrentar esses desastres, e em alguns municípios, isso ocorreu mais de uma vez.

5.6 Distribuição Espaço-Temporal de seca/estiagem por meio da anomalia padronizada de NDWI

As Figuras 21 e 22 apresentam a distribuição temporal da anomalia padronizada de NDWI em comparativo com os dados de precipitação e de declarações de anormalidade junto a defesa civil.

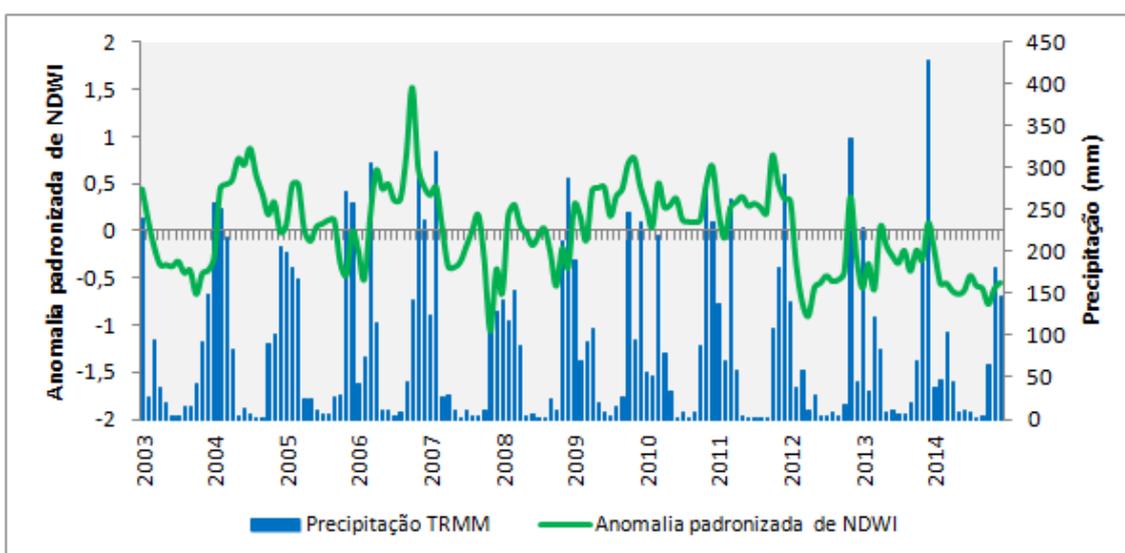


Figura 21: Variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e da precipitação TRMM.

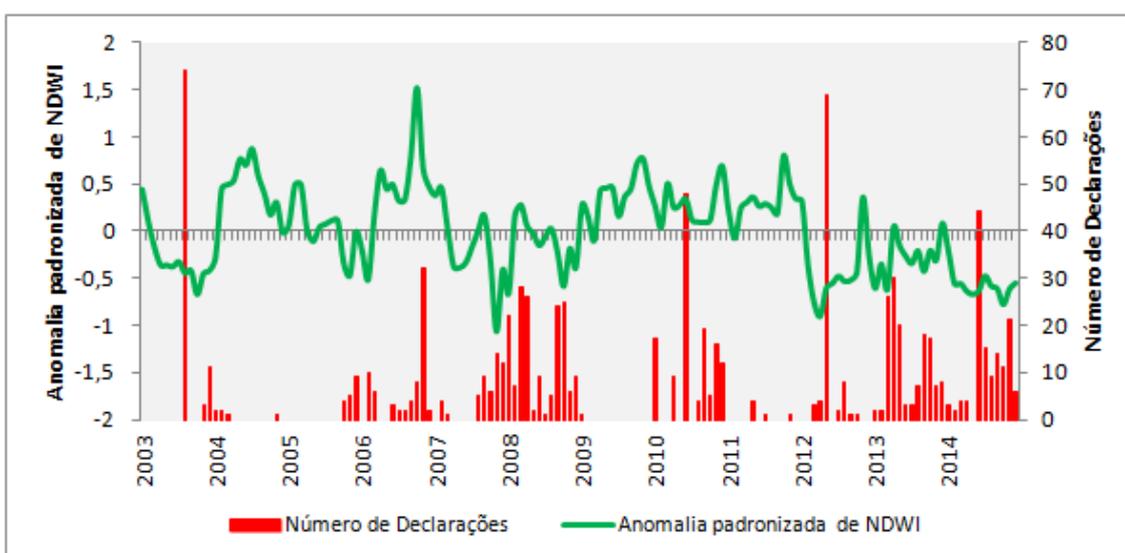


Figura 22: Variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e do número de declarações de situação de emergência e calamidade pública.

A Figura 21 apresenta a variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e a distribuição da precipitação, para o período de estudo. Pode-se verificar que existe uma relação entre valores mais baixos da anomalia padronizada de NDWI com a distribuição irregular e deficiente da precipitação. Esse aspecto pode ser verificado para o período entre 2003 e 2004, onde se observam precipitações bem baixas, principalmente em 2003 e uma anormalidade negativa do NDWI. Em 2007 e 2008, também há essa anormalidade negativa e uma distribuição deficiente da precipitação, principalmente em 2008. Também se ressalta o período entre 2012 a 2014, que apresenta uma anormalidade negativa e também, uma distribuição irregular da precipitação, com alguns a maioria dos meses, desses três anos, de baixas precipitações.

Comparando com um período que apresenta uma distribuição da precipitação, com valores mais altos, como entre 2004 e 2005, a anomalia padronizada de NDWI apresentou-se positivamente, indicando uma maior umidade da vegetação.

Na análise da variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e o número de declarações de situações de emergência ou calamidade pública por motivo de seca/estiagem (Figura 22), analisa-se que as concentrações do número de decretos em alguns meses, em 2008 e 2012-2014, são coincidentes com anormalidade negativa do NDWI. Em 2003, que o NDWI também se apresenta negativo, também foi onde ocorreu um maior número de decretações.

Para 2010 verificou uma concentração considerável de alguns meses com decretações de anormalidade, no entanto para esse período, a anomalia padronizada de NDWI, não se apresentou de forma negativa, como foi verificado, para 2003, 2008 e de 2012 a 2014.

Na espacialização das áreas afetadas por anomalias negativas de NDWI, essas são identificadas nas imagens elaboradas para cada ano da série temporal, em tonalidades de vermelho. Estas áreas se destacam das outras áreas, de tonalidades amarelo que indicam um padrão normal e de tonalidades em verde, sendo áreas onde não houve a constatação de ocorrência de seca/estiagem.

A Figura 23 apresenta a espacialização da anomalia padronizada de NDWI para o ano de 2003.

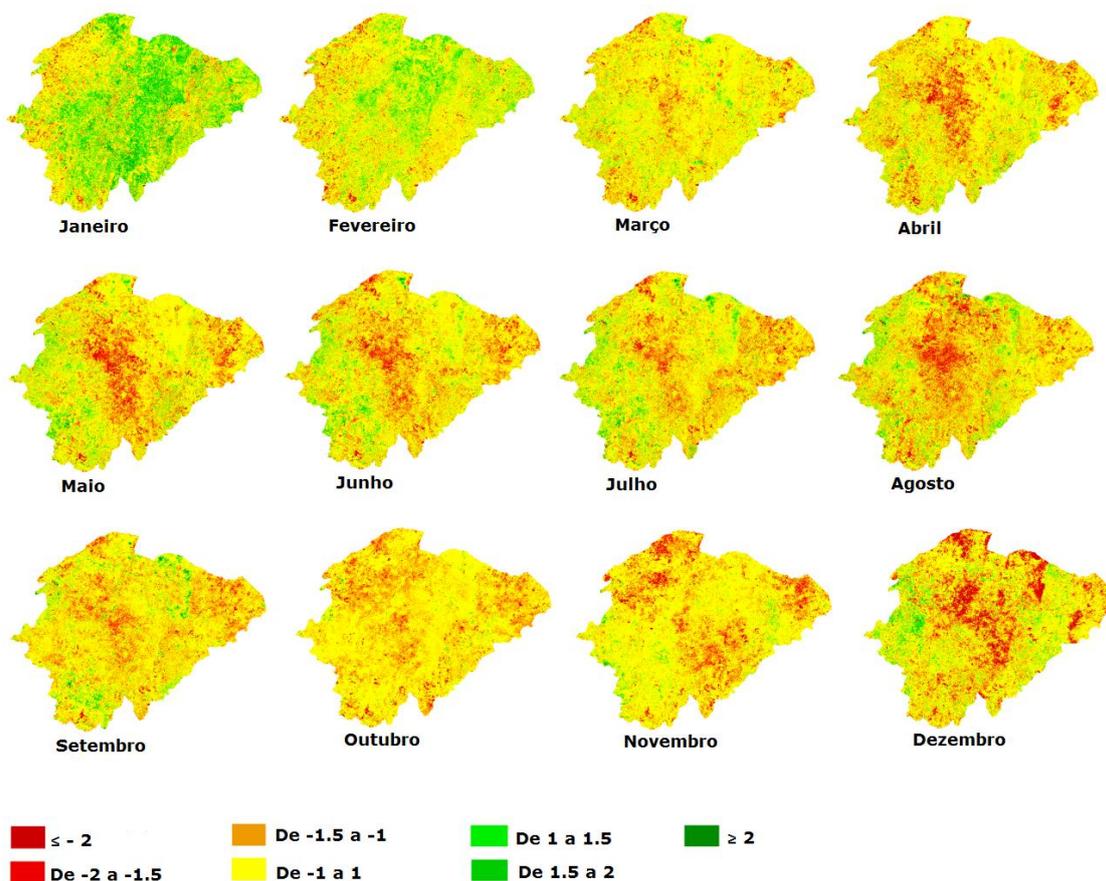


Figura 23: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2003, no norte de Minas Gerais.

Em 2003 foi verificado um número considerável de declarações de emergência ou calamidade pública por motivo de seca ou estiagem. Foram 88 declarações, que refletem a situação encontrada no mapeamento elaborado por meio da anomalia padronizada de NDWI para este ano.

Foi identificada anormalidade negativa do índice em 2003 de forma mais significativa, de abril a dezembro (Figura 23), sendo indicativa de seca/estiagem. Foi verificada a ocorrência de 9 a 10 meses de seca/estiagem, de março/abril a dezembro.

Nos meses do período chuvoso, novembro e dezembro houve a indicação de anormalidade negativa, que corrobora com os déficits de precipitação (Figura 24). Esses dois meses são meses chuvosos para a região (MACIEL *et al.*, 2012), sendo que a falta, atraso ou precipitação abaixo do esperado neste período pode comprometer a atividade agropecuária da região.

De acordo com a Figura 24, que apresenta a distribuição da precipitação média do período de 2003 a 2014 e ao longo do ano de 2003, é possível observar a ocorrência precipitação inferior a média do período de 2003-2014.

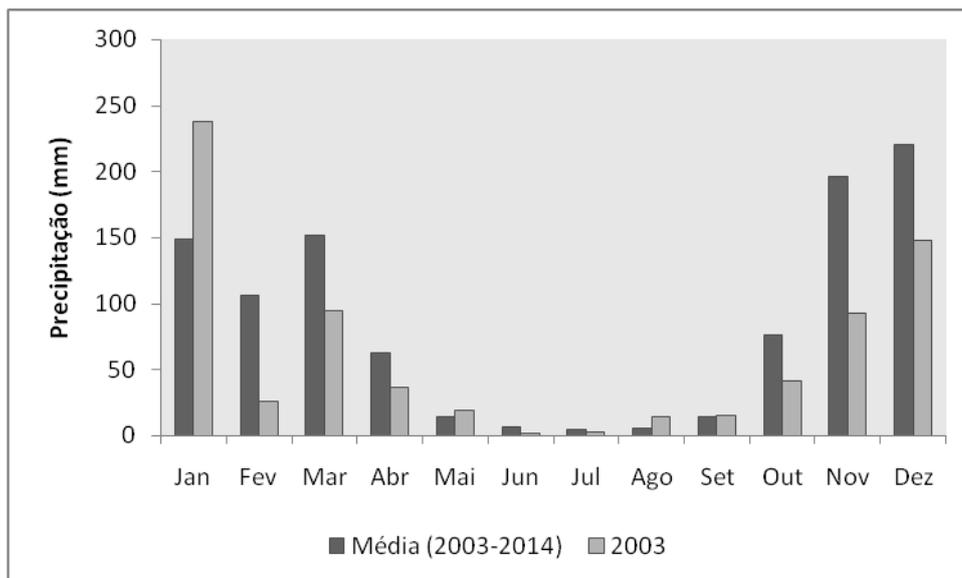


Figura 24: Distribuição da precipitação do ano de 2003 e a precipitação média, período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais. Fonte: Dados do satélite TRMM.

Além dos dados de anomalia padronizada de NDWI e de precipitação, que indicaram uma situação abaixo da média, os documentos do AVADAN (Avaliação de Danos), indicam que neste mesmo ano, houve situações de prejuízos devido a seca/estiagem em municípios da região, principalmente na zona rural, com perdas expressivas na lavoura e pecuária.

Ainda corroborando com essa identificação de ocorrência de seca/estiagem em 2003. Santos (2011), com o intuito de caracterizar as secas, na parte mineira da bacia do Rio São Francisco, identificou pela análise de dados de SPI, para a região norte desta bacia, no âmbito do estado de Minas Gerais, a ocorrência de seca em 2003.

Outro período que vale ser destacado é 2007-2008. Esse período foi considerado como de seca significativa para a região norte de Minas, sendo observado o maior número de decretos de situação de emergência e calamidade pública. Foram 164 no ano de 2008, que refletem a situação identificada por meio da aplicação da anomalia padronizada de NDWI (Figuras 25 e 26) e dos relatos, tanto de danos, perdas e consequências desse evento, que foram identificados por meio de reportagens em jornais e também pelos documentos do AVADAN.

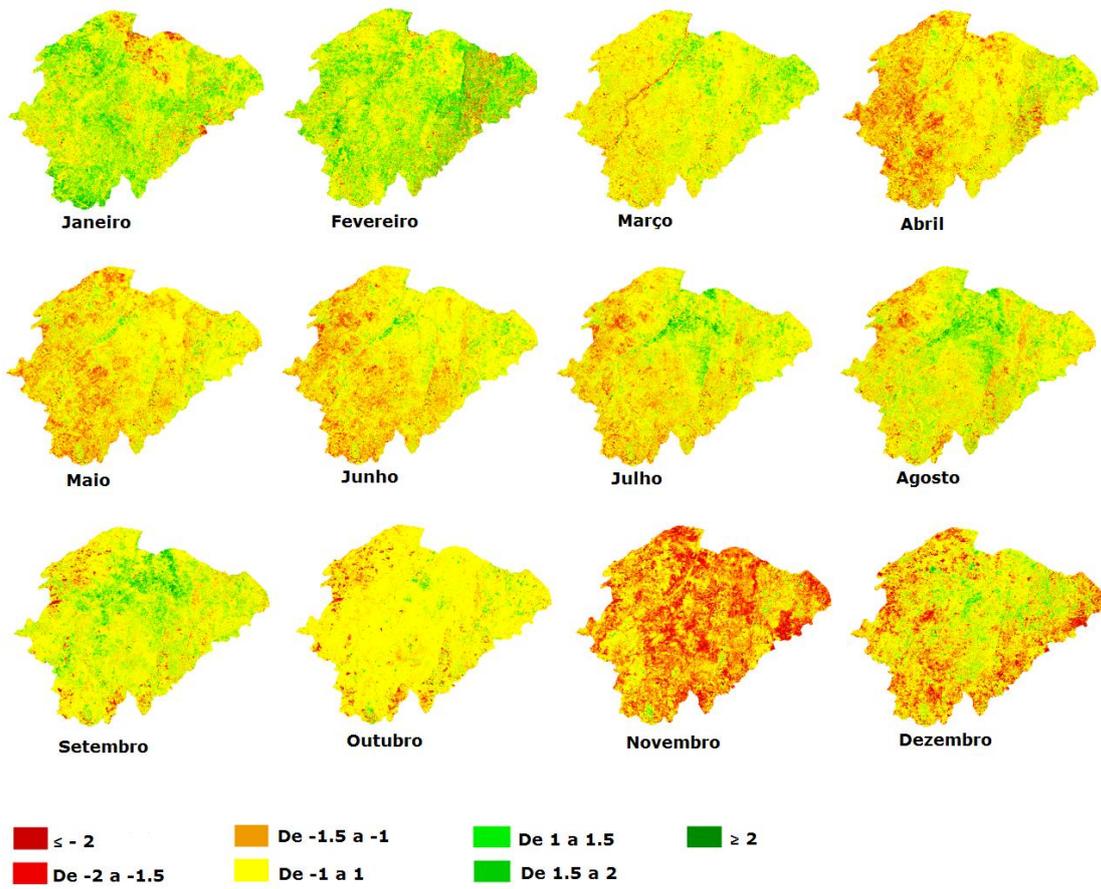


Figura 25: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2007, no norte de Minas Gerais.

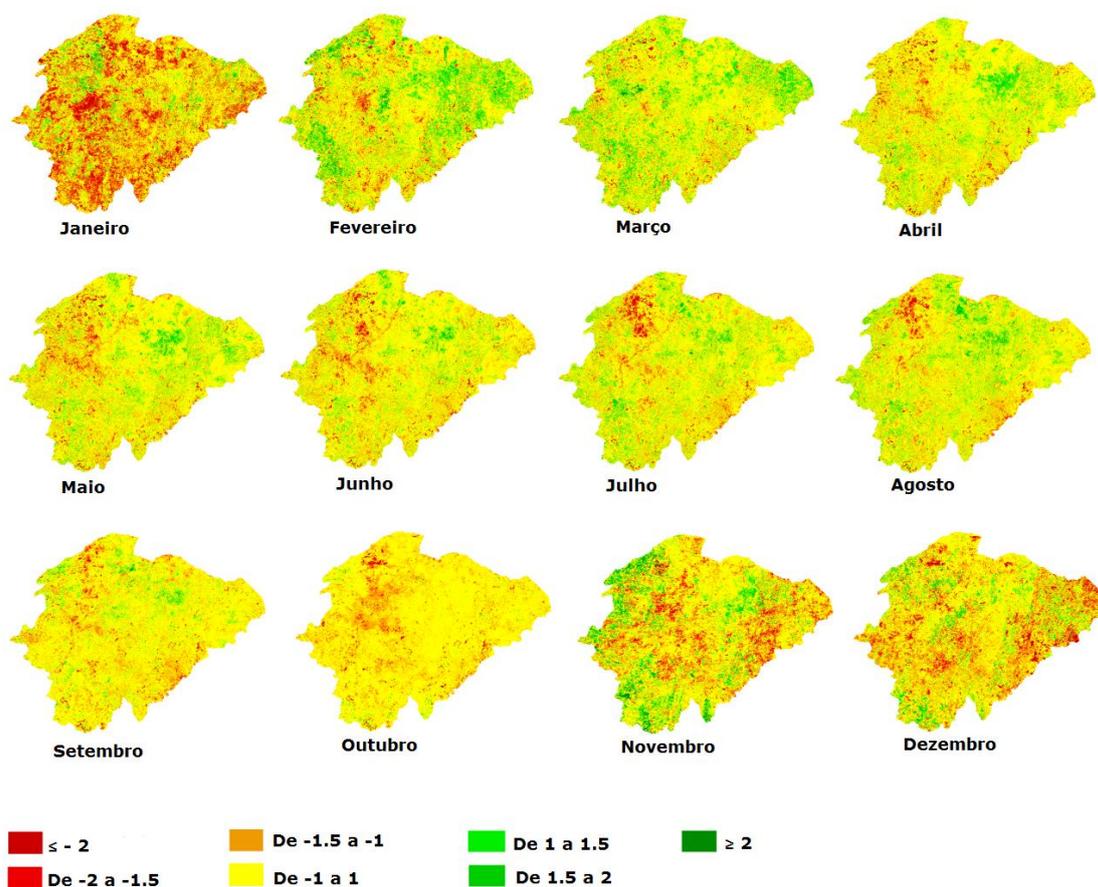


Figura 26: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2008, no norte de Minas Gerais.

Guedes (2015) relata que em 2007 ocorreu no norte de Minas Gerais, um dos piores períodos de seca no estado até então. A Figura 27 apresenta os dados de precipitação para o ano de 2007, que ficaram abaixo da média para praticamente todos os meses, com exceção do mês de fevereiro. De março a outubro, quase não choveu na região, desencadeando impactos significativos, como a decretação de estado de emergência pelos municípios da região.

O período seco de 2007/2008 na região foi antecipado, devido ao atraso no início da temporada de chuvas. Isso acarretou sérios danos para o norte de Minas, principalmente para a pecuária, com uma diminuição de aproximadamente 300 mil cabeças de gado da região, devido a morte e a venda a baixo preço do rebanho (ESTADO DE MINAS, 2012).

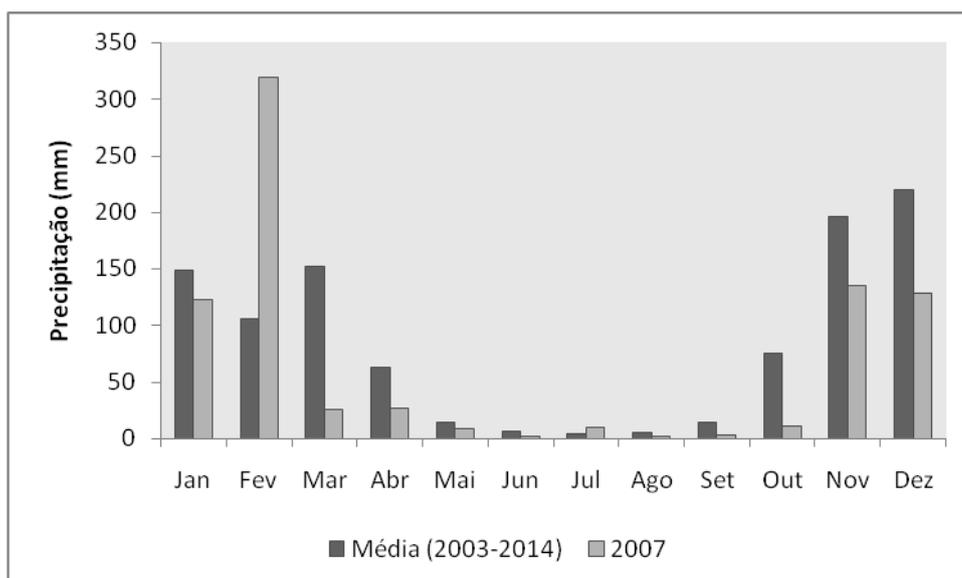


Figura 27: Distribuição da precipitação do ano de 2007 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais. Fonte: Dados do satélite TRMM.

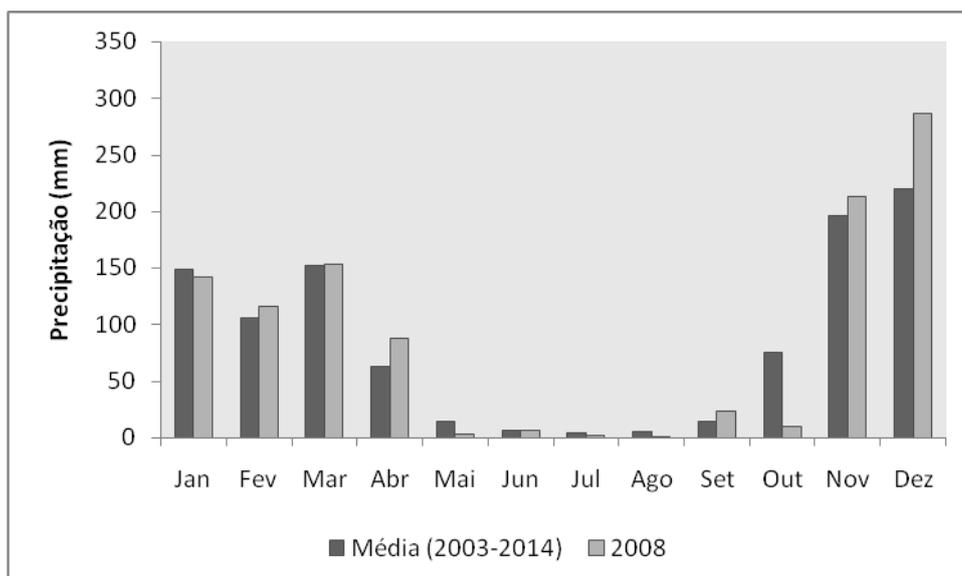


Figura 28: Distribuição da precipitação do ano de 2008 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais. Fonte: Dados do satélite TRMM.

Conforme relatório do AVADAN, em 2007, Montes Claros, a maior cidade do norte de Minas sofreu impactos devido a irregularidade das precipitações e a sua ausência nos últimos 210 dias na região, período entre março a outubro de 2007.

Os relatórios de perdas e danos registrados em 2008 descrevem os reflexos da irregularidade e atraso das precipitações do ano anterior. Apesar dos índices pluviométricos de 2008 apresentarem próximo da média (Figura 28), os efeitos não são anulados de imediato, demandando algum tempo de precipitações normais para que a situação na região se normalize.

A anomalia padronizada de NDWI (Figura 25), também reflete a situação de baixos índices pluviométricos de 2007, que ocasiona em 2008, apesar dos índices de precipitação próximos à média, uma situação ainda de baixos volumes de água em reservatórios, e uma vazão dos rios, córregos e poços, ainda comprometidos. A precipitação ocorrida em 2008, não foi suficiente para minimizar as perdas nas lavouras e redução do rebanho bovino da região norte de Minas, como é possível verificar pelos relatórios do AVADAN.

Em 2010, os dois primeiros meses do ano, que são importantes meses de chuva, também se apresentam comprometidos a sua quantidade para a região (Figura 29).

A distribuição da precipitação abaixo do esperado para o período compromete a atividade agrícola da região, principalmente dos pequenos produtores. Também influencia nos níveis dos córregos e rios, uma vez que no período seco, estes diminuem a sua vazão, chegando a ficar secos e se recuperam com a chegada das chuvas no período chuvoso.

Em 2010 houve um número significativo de declarações de anormalidade para os municípios do norte de Minas. Foram 130 declarações junto à Defesa Civil, que ocorreram em sua maioria em junho, com 48 declarações.

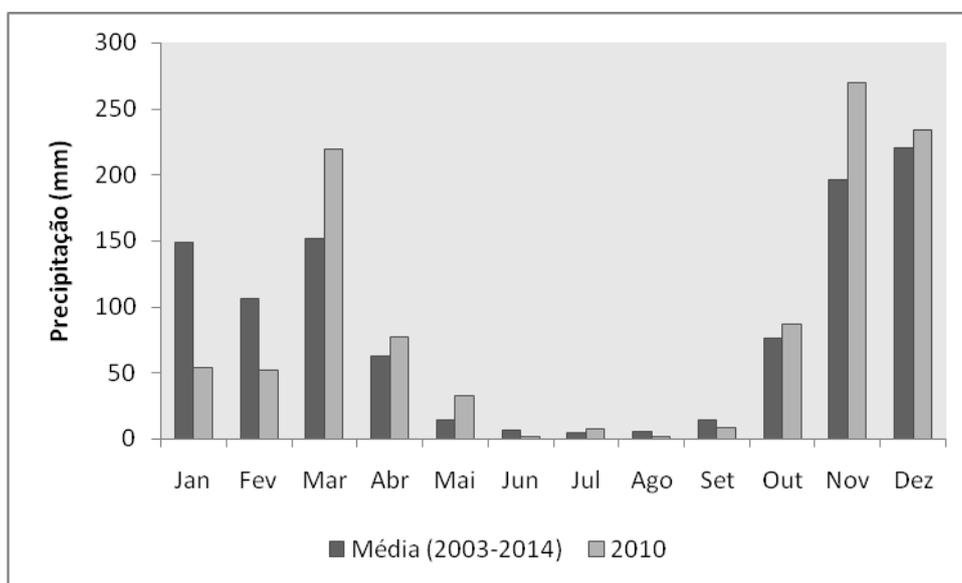


Figura 29: Distribuição da precipitação do ano de 2010 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais. Fonte: Dados do satélite TRMM.

Ainda neste contexto, uma reportagem de fevereiro de 2010 do Jornal Estado de Minas (ESTADO DE MINAS, 2010), mostra uma seca verde que ocorreu na região. A

seca verde, conforme Nobre e Melo (2001) é uma estiagem intercalada com episódios de precipitações mais intensas. Para Marengo (2008) a seca verde é um veranico que ocorre em meio ao período chuvoso, que pode ser causado por um número de dias com elevado déficit hídrico.

Apesar das paisagens verdes em 2010, os agricultores do norte de Minas enfrentaram muitas perdas nas lavouras, sendo que em alguns municípios, as perdas foram superiores a 50% nas lavouras de milho e feijão. Situação que pode estar relacionada às baixas precipitações em janeiro de 2010, que ocasionou as perdas das lavouras implantadas no final do ano anterior (ESTADO DE MINAS, 2010).

Conforme as informações de prejuízos econômicos devido a estiagem que ocorreram em 2010 e de acordo com o alto número de decretos de anormalidade devido as ocorrências de seca e estiagens no norte de Minas, é possível analisar que a aplicação da anomalia padronizada de NDWI por si só, não foi suficiente na identificação de períodos de seca/estiagem visto que a sua incidência pode se dar conforme ocorreu em 2010, com prejuízos e perdas, em meio a uma paisagem verde. No entanto, ainda assim, mesmo que de forma pontual, o índice identificou nos primeiros meses do ano de 2010 (Figura 30) uma anormalidade, que pode estar relacionada a baixa precipitação do mesmo período.

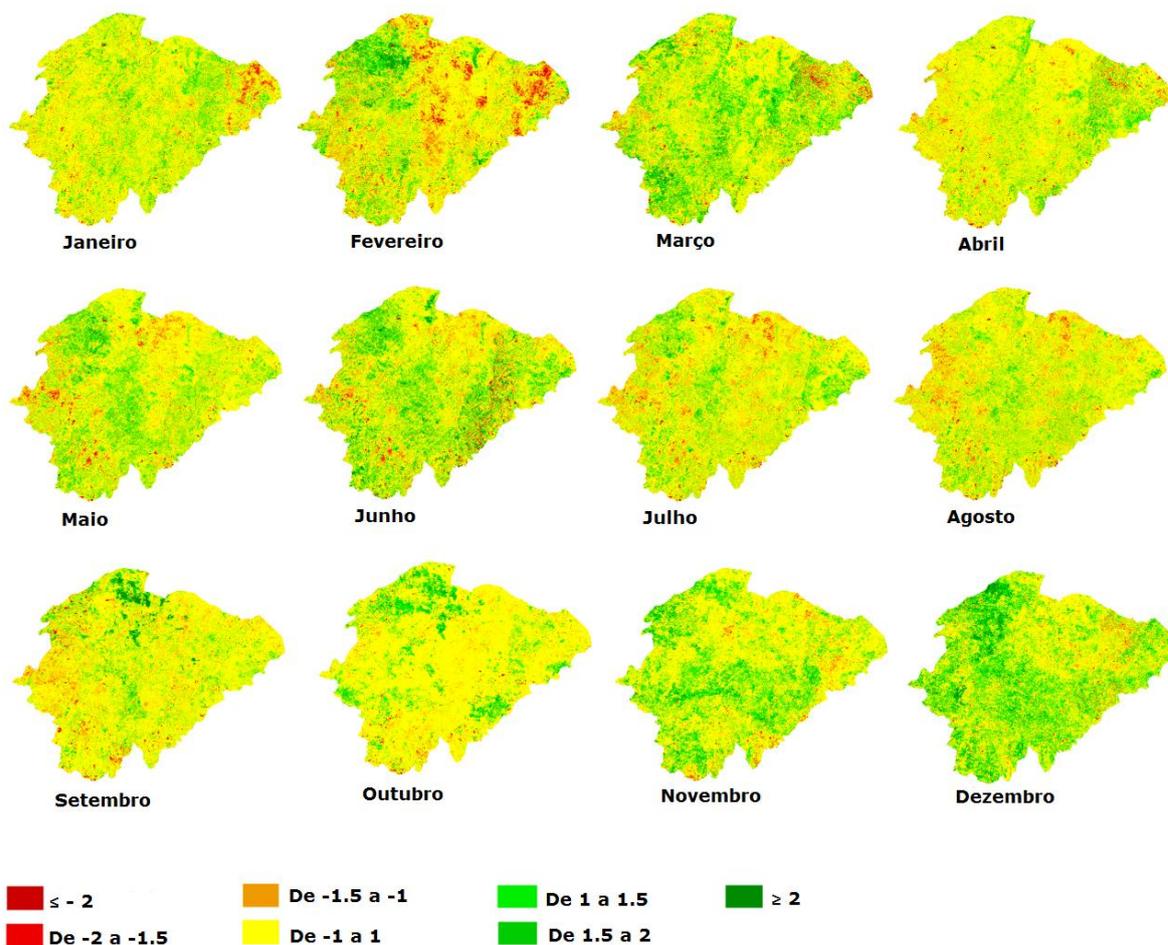


Figura 30: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2010, no norte de Minas Gerais.

A Figura 31 apresenta a variação da anomalia padronizada de NDWI para o ano de 2012. Em comparação aos outros anos de anomalia padronizada de NDWI, verifica-se em 2012 a identificação de áreas mais extensas indicativas de seca/estiagem. Além disso, os meses de fevereiro e março, onde se concentram parte das precipitações do período chuvoso, conforme a Figura 31, já se apresentava comprometidos.

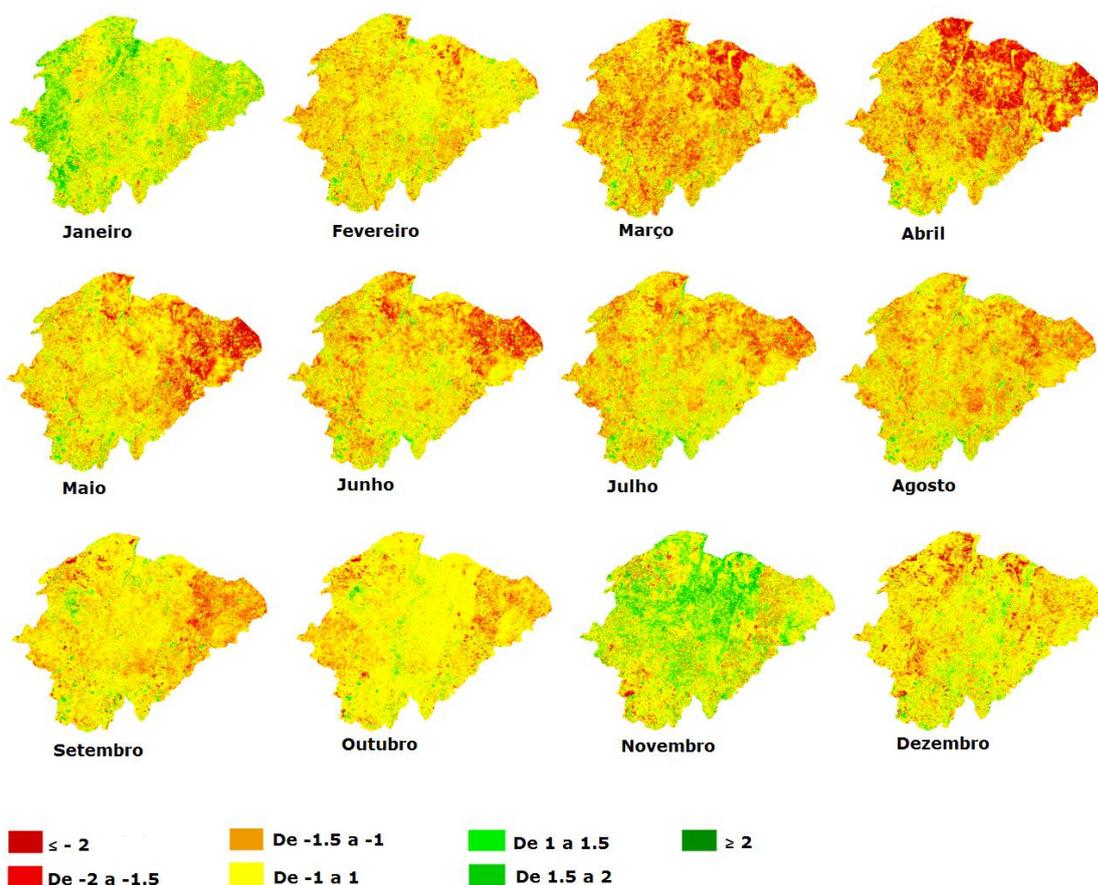


Figura 31: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2012, no norte de Minas Gerais.

Ainda é possível relacionar os dados calculados de anomalia padronizada de NDWI com aqueles da distribuição da precipitação (Figura 32). É notória a baixa distribuição da precipitação em praticamente todo o ano, e ainda que no período chuvoso, de outubro a março, apenas em dois meses as precipitações ocorreram próximo ou acima da média. Essa situação de déficit de chuvas no período chuvoso, como já relatada anteriormente, acarreta sérias consequências para a organização do sistema socioeconômico nesta região.

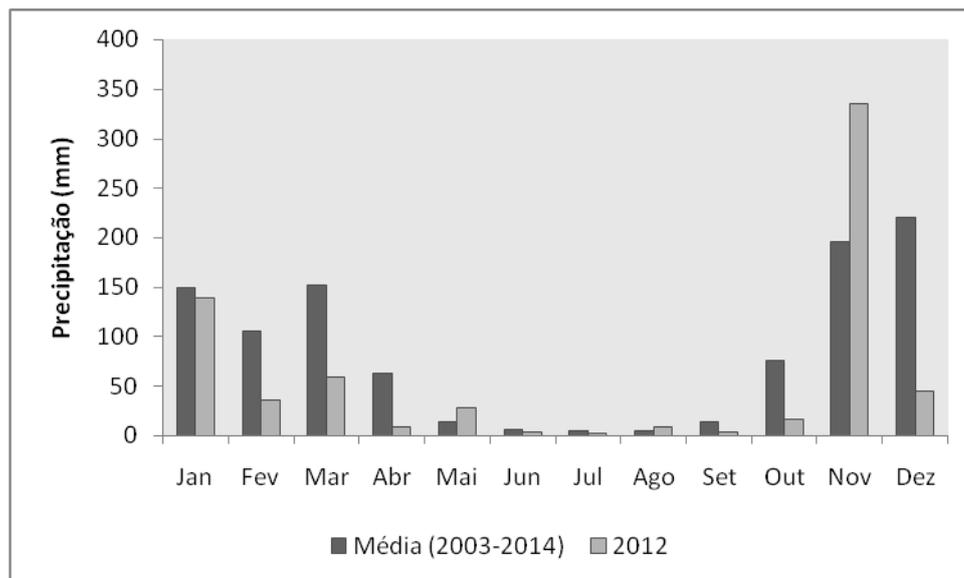


Figura 32: Distribuição da precipitação do ano de 2012 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais. Fonte: Dados do satélite TRMM.

Foi reportado que em 2012, foi ano crítico de seca na região, assim como em 2007. Em maio, já haviam 96 municípios em estado de emergência, nas regiões norte de Minas e no Vale do Jequitinhonha, com perdas nas lavouras que superaram os 70% e registro da morte de rebanhos de gado e, devido a falta de água nos rios, córregos e em reservatórios (ESTADO DE MINAS, 2012b).

Em 2012, para a região Nordeste do Brasil, também foi verificada a ocorrência de seca neste mesmo período (ALBUQUERQUE *et al.*, 2015; LEIVAS, *et al.*, 2013). Leivas *et al.* (2013), analisaram a seca 2011/2012 no estado da Bahia por meio de aplicação de NDVI e Anomalia padronizada de NDWI, verificando que este desenvolveu-se de forma mais intensa, a partir de 2012.

Nos anos seguintes, em 2013 e 2014, houve continuidade deste período anormal, perpetuando os impactos decorrentes dos períodos de seca/estiagem. As Figuras, 33 e 34, apresentam a variação espacial e temporal da anomalia padronizada de NDWI para 2013 e 2014, respectivamente. Assim como em 2012 são observadas áreas consideráveis nas categorias indicativas de seca/estiagem. Em todos os meses destes dois anos houve a ocorrência de anormalidade negativa.

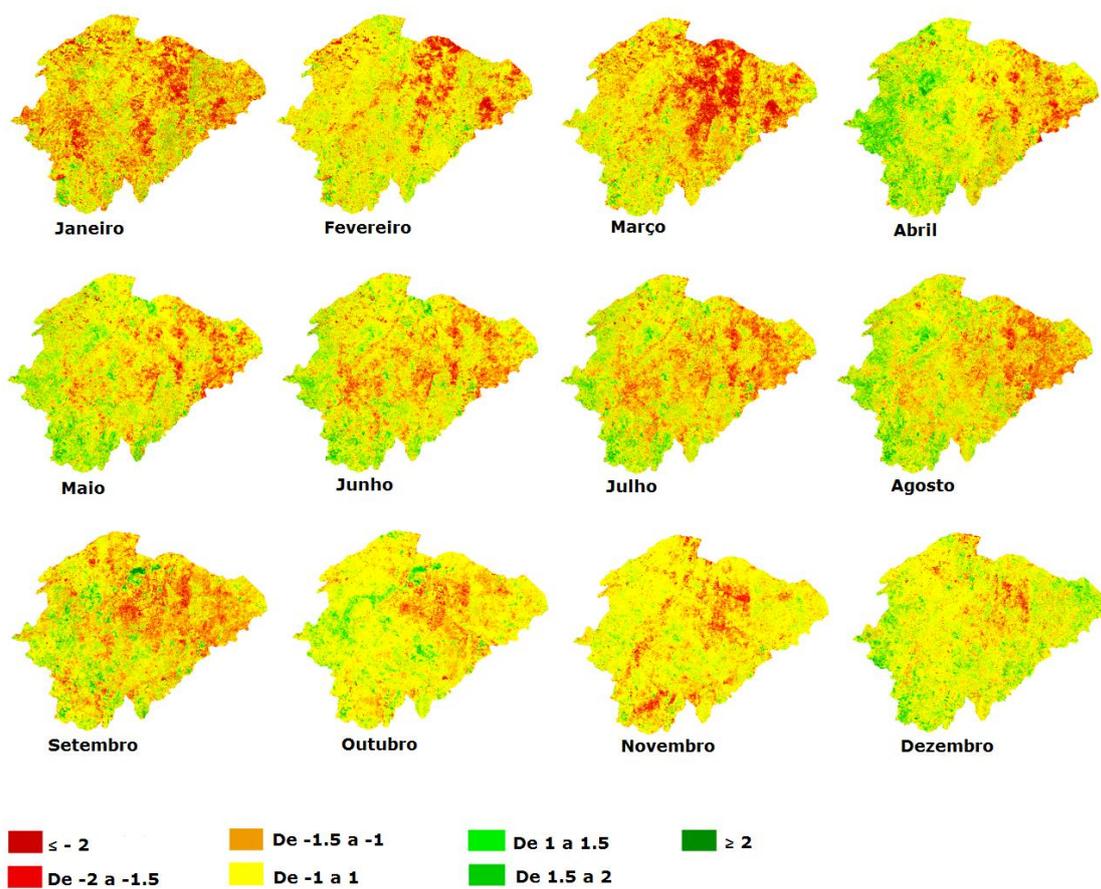


Figura 33: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2013, no norte de Minas Gerais.

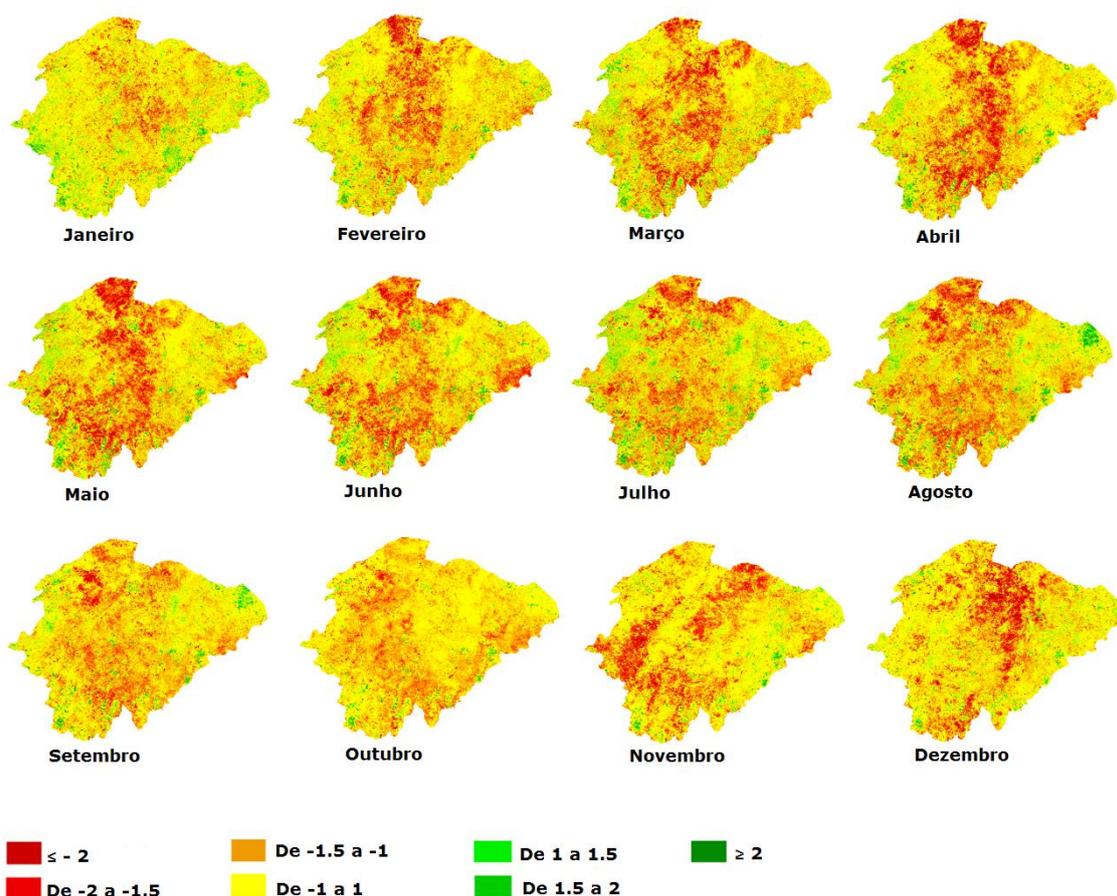


Figura 34: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2014, no norte de Minas Gerais.

Além da predominante ocorrência das categorias indicativas de seca/estiagem nos mapeamentos de 2013 e 2014, assim como em 2012, pode ser observado a partir dos gráficos de precipitação (Figuras 35 e 36) a distribuição abaixo da média, no período chuvoso da região.

O intervalo de tempo mais crítico nesses últimos três anos, é o primeiro trimestre do ano, com precipitações bem abaixo do esperado. Esse período é considerado crítico em função do desenvolvimento de algumas culturas da região, implantadas normalmente no início do período chuvoso, entre outubro a novembro; a exemplo da culturas de milho e feijão; sendo estas colhidas entre fevereiro e julho, conforme calendário agrícola (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2016).

Foram 143 e 133 declarações de anormalidade em 2013 e 2014, respectivamente, por motivo de seca ou estiagem. Como são 89 municípios na região, nesses dois anos, houve casos em que um município realizou mais de uma declaração de anormalidade.

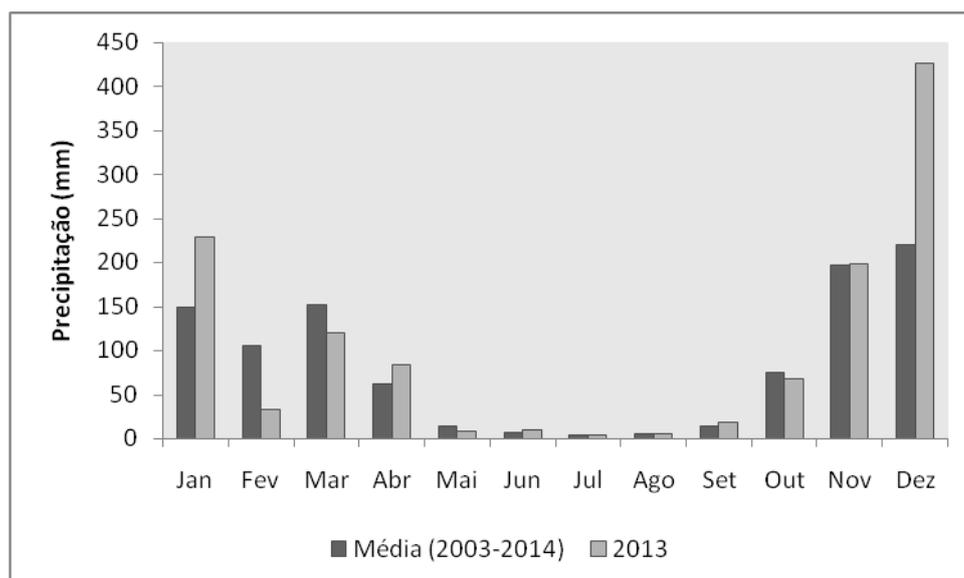


Figura 35: Distribuição da precipitação do ano de 2013 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais. Fonte: Dados do satélite TRMM.

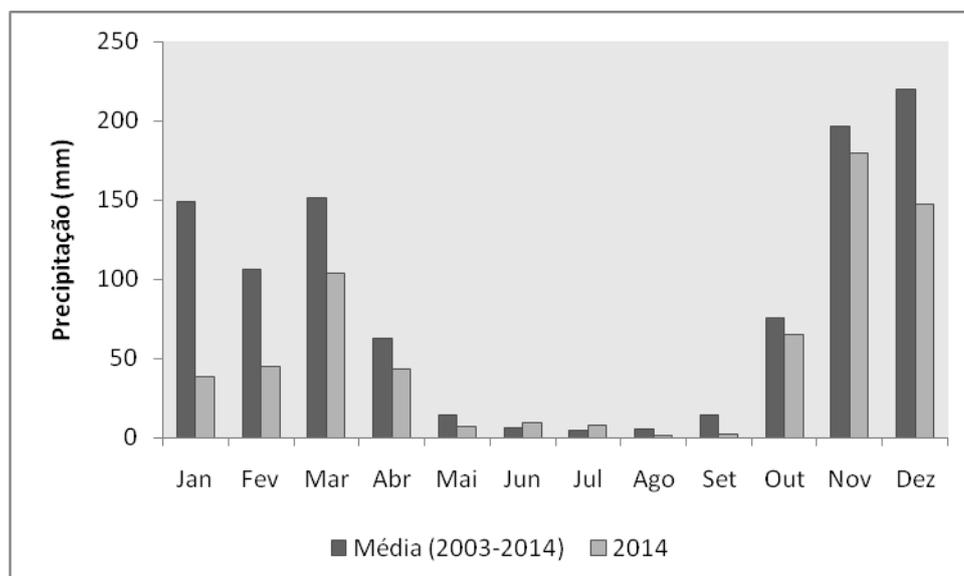


Figura 36: Distribuição da precipitação do ano de 2014 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais. Fonte: Dados do satélite TRMM.

Os dados coletados junto a Defesa Civil, de decretos e perdas e danos, corroboram com a situação identificada por meio da aplicação da metodologia deste trabalho. E ainda, as informações veiculadas em jornais também relataram a ocorrência de uma situação grave de seca/estiagem em todo o estado de Minas Gerais.

Em 2013, o período chuvoso obteve apenas um terço do volume previsto de precipitações. Houve falta de água de forma tão grave na região, que o racionamento de água atingiu os centros urbanos das cidades (O TEMPO, 2013).

A situação crítica de 2013 continuou em 2014. Foi noticiado que até o mês de julho haviam 136 municípios em estado emergência, que quase todos localizados nas regiões norte de Minas e Vale do Jequitinhonha. Informações da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER) ressaltam que as consequências deste período para o norte de Minas foram piores em 2014, devido a região acumular três anos seguidos de estiagens prolongadas (ESTADO DE MINAS, 2014).

A Tabela 6 e a Figura 37 apresentam o quantitativo de áreas afetadas anomalia negativa padronizada de NDWI. Por meio destes dados é possível verificar que o quantitativo de áreas afetadas pela anomalia padronizada de NDWI, em sua forma negativa, que são compostas pelas classes de seca moderada, severa e extrema, apresenta-se coincidentes com os registros de ocorrência junto a defesa civil, com os dados de precipitação e com a variação temporal de anomalia padronizada de NDWI.

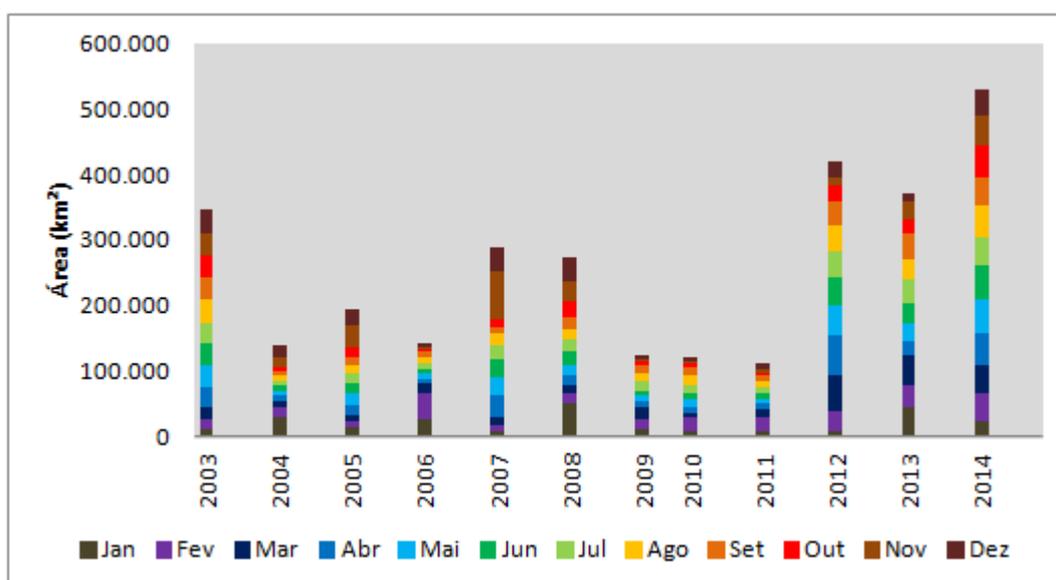


Figura 37: Gráfico do quantitativo de áreas afetadas negativamente pela anomalia padronizada de NDWI entre 2003 a 2014 no norte de Minas Gerais.

Assim como nas outras análises, verifica-se que os períodos com um maior quantitativo de áreas afetadas são os anos de 2003, 2007-2008 e 2012-2014. Vale ressaltar que o ano de 2014 apresentou um maior acumulado de área afetada por seca/estiagem, sendo aproximadamente 600.000 km² ao longo dos doze meses deste ano. E ainda que os últimos três anos da série temporal são os mais significativos em quantidade de áreas afetadas com seca, corroborando com os dados de precipitação e de ocorrências de anormalidade.

Tabela 6: Quantitativo das áreas afetadas por anomalias negativas de vegetação, correspondentes ao somatório das classes; moderadamente, severamente e extremamente seco; da anomalia padronizada de NDWI.

	Áreas afetadas por anomalia negativa de NDWI (km ²)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2003	10.882,45	14.798,39	20.789,24	30.534,86	32.649,28	32.269,56	30.305,08	38.351,21	31.644,10	36.312,72	32.175,93	37.310,52
2004	31.371,44	13.341,99	96.98,71	85.55,70	69.43,18	78.83,46	7.302,39	8.457,82	6.849,31	6.972,09	12.814,42	19.688,15
2005	14.766,49	8.880,13	8.165,84	15.609,79	20.862,29	14.671,28	15.072,74	12.907,15	11.287,01	14.158,48	34.168,78	22.747,78
2006	25.850,43	41.395,12	15.808,91	6.479,12	7.582,73	6.540,78	8.726,58	10.761,71	8.324,00	2.067,52	3.827,11	6.362,64
2007	9.421,07	8.509,46	13.027,47	31.254,61	28.999,77	26.643,21	22.071,16	17.282,71	9.595,25	12.614,51	73.707,51	36.092,95
2008	50.227,45	16.176,46	11.094,01	15.269,59	17.496,11	19.598,90	17.920,52	15.916,82	19.092,32	25.386,12	29.971,42	34.640,33
2009	11.583,96	14.174,80	19.355,09	8.350,99	8.783,74	8.657,85	15.621,24	12.013,17	12.314,92	4.818,74	1.801,93	6.223,37
2010	9.458,62	19.724,80	7.749,59	8.845,34	10.350,50	11.108,75	13.158,28	13.285,49	11.234,5	6.130,65	5.240,38	4.927,00
2011	9.836,48	19.159,74	13.875,14	9.402,18	6.673,81	8.423,57	8.302,95	9.802,72	8.876,41	3.320,17	5.119,11	9.810,75
2012	10.220,71	29.117,86	54.037,77	62.980,88	44.829,26	42.496,21	38.873,80	41.326,87	34.727,19	24.543,18	11.824,60	26.075,75
2013	46.849,1	31.854,03	46.862,05	21.057,35	27.096,82	30.955,67	35.625,66	31.096,68	39.111,32	21.834,72	25.807,05	14.118,60
2014	25.258,66	41.909,26	43.782,81	47.686,22	51.712,52	50.227,21	42.995,77	48.311,07	44.033,64	48.799,72	44.682,43	40.439,78

5.7 Análise comparativa dos dados de anomalia padronizada de NDWI, anomalia de precipitação e dados GRACE

Nesta etapa buscou a verificação de quão relacionados estão os dados gerados pela anomalia padronizada de NDWI com os dados de precipitação e sua respectiva anomalia. Foram relacionados os dados médios extraídos de cada região homogênea, para os dados de NDWI, anomalia padronizada de NDWI, dados precipitação e de anomalia de precipitação, e elaborados gráficos do comportamento médio de cada região, apresentados nas Figuras 38, 39, 40, 41 e 42. E também por meio dos valores médios dos dados, foram testadas correlações estatísticas e teste de média, o teste t de *Student* para o intervalo de confiança de 95%.

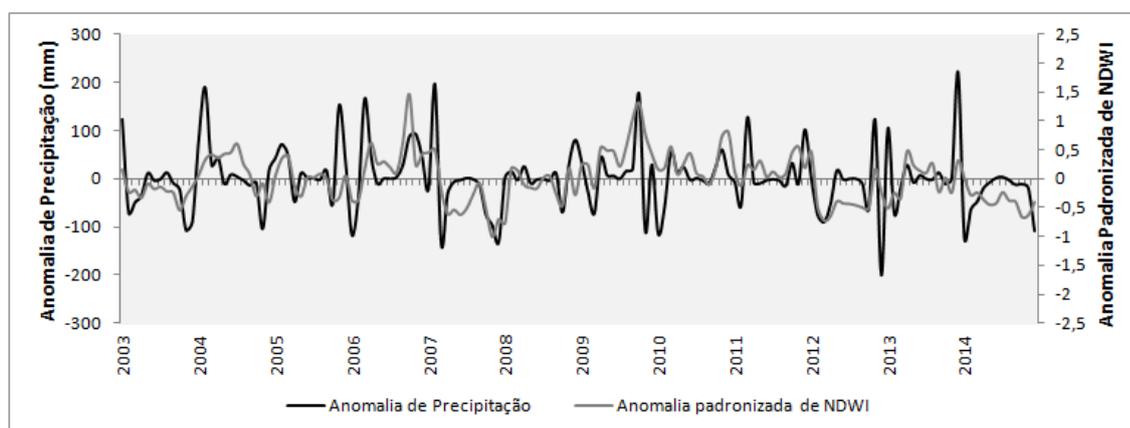


Figura 38: Variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e anomalia de precipitação para a Classe Campo.

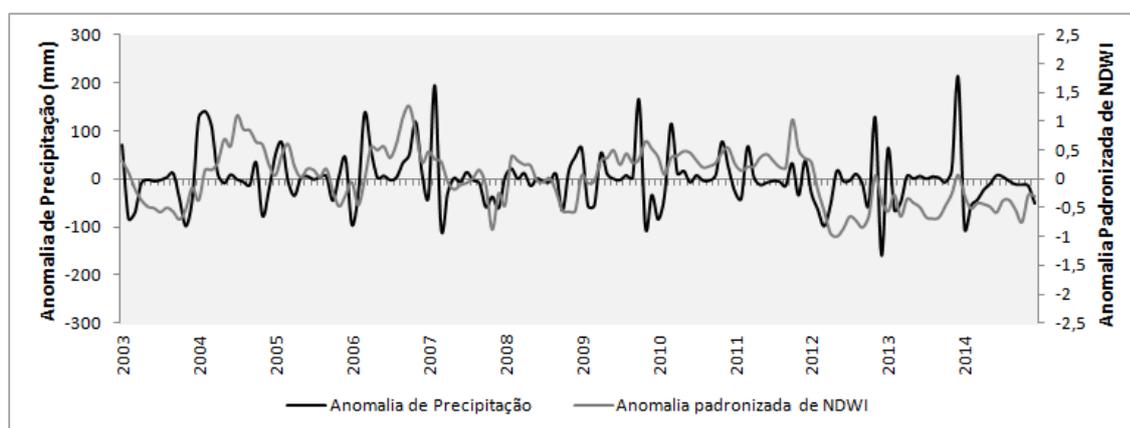


Figura 39: Variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e anomalia de precipitação para a Classe Campo Cerrado.

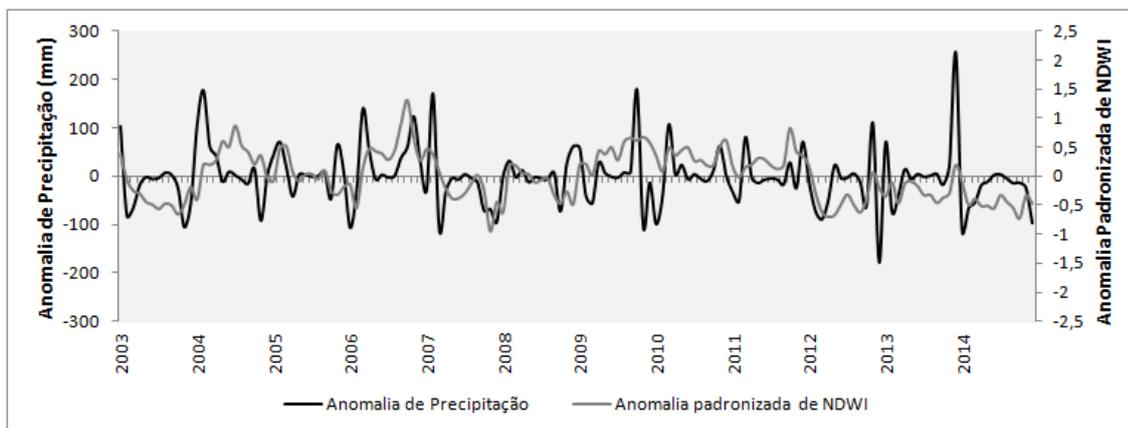


Figura 40: Variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e anomalia de precipitação para a Classe Cerrado.

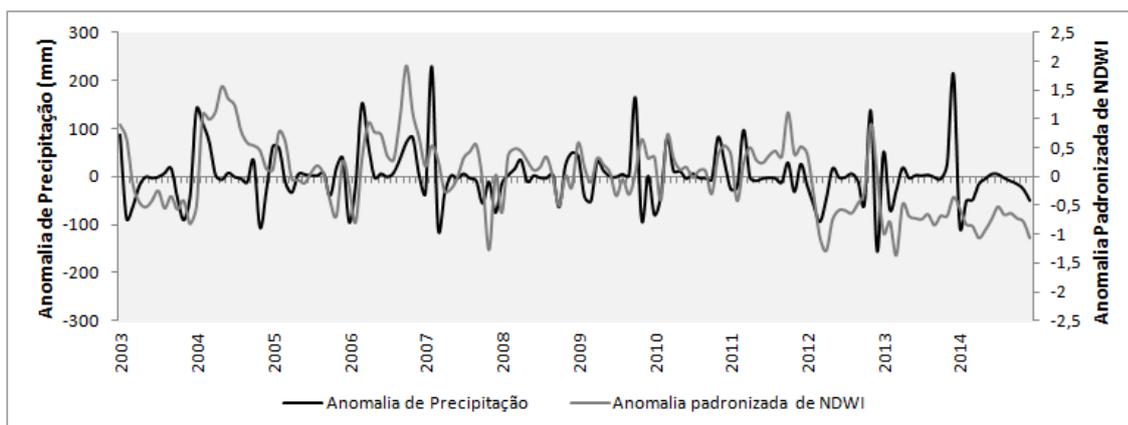


Figura 41: Variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e anomalia de precipitação para a Classe Floresta Estacional Decidual.

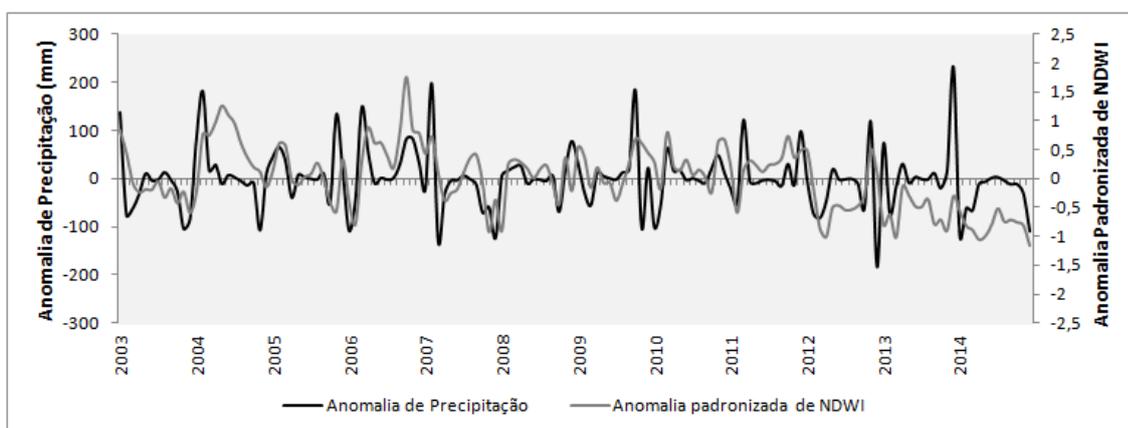


Figura 42: Variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e anomalia de precipitação para a Classe Outros.

A análise do comportamento da anomalia padronizada de NDWI e da anomalia de precipitação, mostra que ambos apresentam um comportamento similar para as cinco regiões. Também se observa que existem períodos em que os comportamentos da anomalia padronizada de NDWI e da anomalia de precipitação apresentam-se com maiores diferenças, como acontece para todas as classes entre 2004 a 2005.

Vale ressaltar que a precipitação apresenta uma resposta mais imediata e sofre uma maior variação quando comparada com dados de NDWI, NDVI, EVI, por exemplo. Esses índices muitas vezes respondem a precipitação com atrasos de 30, 60 ou 90 dias, como ressaltam Nicácio *et al.* (2009), Cordeiro (2014) e Leivas *et al.* (2014). Desta forma verifica que a anomalia padronizada de NDWI, mesmo com variações e atrasos nas respostas, acompanha o comportamento da anomalia de precipitação.

Também realizou-se análises de correlação de Pearson para os dados de cada região homogênea com 30 dias de defasagem entre a ocorrência da precipitação e a resposta do índice e também correlações sem defasagem. O coeficiente de correlação de Pearson (r) mede o grau de relação linear entre duas variáveis. Este coeficiente varia de -1 a 1, no qual os valores positivos e negativos indicam a sentido da correlação e a proximidade de -1 ou 1 indicam a intensidade desta correlação (FIELD, 2009).

Foram testados as relações entre a anomalia padronizada de NDWI com a anomalia de precipitação e do NDWI com a precipitação (Tabelas 7, 8, 9, 10 e 11).

Tabela 7: Resultados dos testes de correlação entre dados de NDWI e Precipitação, anomalia padronizada de NDWI e precipitação e anomalia de precipitação, para a classe Campo.

Classe Campo	NDWI	X	NDWI	X	Anomalia	Anomalia
	Precipitação		Precipitação	(um	padronizada	de
			mês de defasagem)	padronizada	de	padronizada
				NDWI X Anomalia	Anomalia	de
				Precipitação	Precipitação	Anomalia
						(um
						mês de defasagem)
	r		r		r	
2003	0,5254		0,6436		0,5874	-0,1233
2004	0,6125		0,8749		0,2327	0,5821
2005	0,4527		0,7971		0,1555	0,5210
2006	0,5376		0,6279		0,5451	0,4019
2007	0,5811		0,7641		0,6046	0,4371
2008	0,5146		0,7666		0,2058	0,4112
2009	0,4855		0,6283		0,5710	0,1891
2010	0,5536		0,6897		0,4325	0,1862
2011	0,5807		0,7319		0,2909	0,0518
2012	0,4188		0,6235		0,3968	0,5038
2013	0,4304		0,6990		0,1979	0,4291
2014	0,2103		0,5687		-0,5416	0,4610

Tabela 8: Resultados dos testes de correlação entre dados de NDWI e Precipitação, anomalia padronizada de NDWI e precipitação e anomalia de precipitação, para a classe Campo Cerrado.

Classe	Campo	NDWI	X	NDWI	X	Anomalia	Anomalia
		Precipitação		Precipitação	(um	padronizada	de
				mês de defasagem)	padronizada	de	padronizada
					de	de	de
					NDWI X Anomalia	NDWI X Anomalia	de
					Precipitação	Precipitação	(um
							mês de defasagem)
		r	r		r		r
2003		0,4538		0,6069		0,1248	-0,0628
2004		0,4961		0,7513		-0,6782	-0,1649
2005		0,3108		0,7094		0,1086	0,7484
2006		0,3825		0,6387		0,3639	0,3607
2007		0,3283		0,6844		0,2402	0,4418
2008		0,2339		0,6901		0,0688	0,4799
2009		0,2368		0,5932		-0,0522	0,1310
2010		0,3574		0,6504		0,3420	0,6176
2011		0,4055		0,6758		0,2441	-0,0465
2012		0,2143		0,5447		0,0934	0,2663
2013		0,3736		0,6375		0,6079	0,3117
2014		0,1232		0,4768		-0,4026	0,3641

Tabela 9: Resultados dos testes de correlação entre dados de NDWI e Precipitação, anomalia padronizada de NDWI e precipitação e anomalia de precipitação, para a classe Cerrado.

Classe	Campo	NDWI	X	NDWI	X	Anomalia	Anomalia
		Precipitação		Precipitação	(um	padronizada	de
				mês de defasagem)	padronizada	de	padronizada
					de	de	de
					NDWI X Anomalia	NDWI X Anomalia	de
					Precipitação	Precipitação	(um
							mês de defasagem)
		r	r		r		r
2003		0,4860		0,6349		0,3606	-0,0343
2004		0,5723		0,8303		-0,4691	0,2162
2005		0,3796		0,7497		0,2349	0,5979
2006		0,4870		0,6609		0,4702	0,4507
2007		0,4970		0,7304		0,4401	0,4509
2008		0,4235		0,7657		0,0839	0,4770
2009		0,3986		0,6142		0,1650	0,1192
2010		0,4801		0,6875		0,4197	0,5204
2011		0,5226		0,7230		0,3189	0,0504
2012		0,3351		0,5900		0,1764	0,4825
2013		0,4075		0,6776		0,6165	0,4036
2014		0,1915		0,5326		-0,5116	0,6550

Tabela 10: Resultados dos testes de correlação entre dados de NDWI e Precipitação, anomalia padronizada de NDWI e precipitação e anomalia de precipitação, para a classe Floresta Estacional Decidual.

Floresta Estacional Decidual	NDWI	X	NDWI	X	Anomalia padronizada de NDWI X Anomalia Precipitação	Anomalia padronizada de NDWI X Anomalia Precipitação (um mês de defasagem)
	Precipitação		Precipitação (um mês de defasagem)			
	r		r		r	r
2003	0,6050		0,7257		0,2479	0,6193
2004	0,6786		0,8894		-0,2050	0,4935
2005	0,6184		0,9130		0,4001	0,7896
2006	0,6271		0,7568		0,4835	0,5730
2007	0,5048		0,7718		0,2498	0,3496
2008	0,6426		0,8505		0,4458	0,4480
2009	0,4228		0,7635		-0,1103	0,4222
2010	0,5895		0,7478		0,5443	0,4225
2011	0,6883		0,8293		0,2271	0,1982
2012	0,5051		0,6821		0,4010	0,3537
2013	0,5716		0,7446		0,5228	0,5428
2014	0,4012		0,6632		0,0085	0,5516

Tabela 11: Resultados dos testes de correlação entre dados de NDWI e Precipitação, anomalia padronizada de NDWI e precipitação e anomalia de precipitação, para a classe Outros.

Outros	NDWI	X	NDWI	X	Anomalia padronizada de NDWI X Anomalia Precipitação	Anomalia padronizada de NDWI X Anomalia Precipitação (um mês de defasagem)
	Precipitação		Precipitação (um mês de defasagem)			
	r		r		r	r
2003	0,5658		0,7283		0,5634	0,7716
2004	0,6814		0,9444		0,0836	0,5722
2005	0,5547		0,8956		0,0003	0,6520
2006	0,6492		0,7333		0,6210	0,6052
2007	0,5880		0,7972		0,5672	0,4307
2008	0,6525		0,7626		0,2248	0,5497
2009	0,5222		0,7385		0,2959	0,3733
2010	0,5566		0,7240		0,4269	0,2966
2011	0,6999		0,8214		0,3986	0,1785
2012	0,5344		0,7094		0,2383	0,5500
2013	0,4926		0,7405		0,2780	0,4236
2014	0,2358		0,6651		0,1522	0,5263

Observa-se que o NDWI responde a precipitação com correlações positivas sem defasagem, com intensidades variando de fraca (0,2 a 0,4), a moderada (0,4 a 0,6) e forte (0,6 a 0,8), sendo essas duas últimas, a maioria das correlações observadas para todas as classes em estudo. Para as correlações entre o NDWI e a precipitação com um intervalo de 30 dias entre a ocorrência da precipitação e a resposta do NDWI, as correlações se mostram mais fortes, com intensidade que variam de moderada a forte. Desta forma verificou-se uma relação expressiva entre a ocorrência de precipitação e a resposta do NDWI.

Na análise da anomalia padronizada de NDWI relacionado à anomalia de precipitação, foram verificadas correlações de sentido positivo e negativo. O sentido negativo é observado

principalmente na análise dos dados sem defasagem. Na análise dos dados de anomalia padronizada de NDWI e de anomalia de precipitação os melhores graus de correlação foram aqueles observados na correlação com 30 dias de defasagem. No entanto, existem melhores correlações entre os dados de precipitação e NDWI, em comparação aos dados de anomalia padronizada de NDWI e de anomalia de precipitação.

Os dados de anomalia padronizada de NDWI e de anomalia de precipitação apresentaram correlações não muito significativas, e variação de grau de correlação, principalmente, de fraca a moderada. No entanto, a variação temporal apresentada pelas Figuras 38 a 42, demonstram haver relação similar entre esses dados, e que a precipitação influencia de forma expressiva na resposta da anomalia padronizada de NDWI.

Neste contexto, Leivas *et al.* (2014) utilizaram dados de anomalia padronizada de NDWI para monitorar a seca no nordeste brasileiro, e encontraram correlações fracas entre o NDWI padronizado e o índice padronizado de precipitação. Atribuíram às fracas correlações à resolução espacial dos dois sensores (TRMM, com resolução espacial de 0,25° e *SPOT-Vegetation* com 1 km).

No presente estudo também se utilizou de dados com resoluções espaciais diferentes (NDWI com resolução espacial de 250 metros e TRMM de 0,25°), podendo essa diferença de resoluções espaciais ser fator influenciador dos baixos graus de correlação entre os dados de anomalia padronizada de NDWI e anomalia de precipitação.

Neste sentido, em busca da análise da relação a anomalia padronizada de NDWI com a precipitação, realizou-se uma investigação do quanto as médias destes dois dados eram diferentes, aplicando para isso, o teste *t* de *student* com um intervalo de confiança de 95%, conforme a Tabela 12.

Tabela 12: Resultado da análise de teste *t* de *Student* para as Regiões homogêneas, no norte de Minas Gerais.

	p-value Campo	Classe	p-value Campo Cerrado	Classe	p-value Cerrado	Classe	p-value Floresta Estacional Decidual	Classe	p-value Outros	Classe
2003	0,259		0,127		0,233		0,179		0,315	
2004	0,371		0,228		0,234		0,421		0,460	
2005	0,182		0,408		0,272		0,380		0,211	
2006	0,261		0,216		0,205		0,204		0,271	
2007	0,307		0,590		0,342		0,701		0,395	
2008	0,567		0,857		0,634		0,800		0,458	
2009	0,657		0,849		0,761		0,780		0,690	
2010	0,935		0,505		0,747		0,645		0,972	
2011	0,459		0,909		0,853		0,847		0,507	
2012	0,207		0,215		0,203		0,263		0,223	
2013	0,351		0,435		0,402		0,402		0,356	
2014	0,018**		0,015**		0,014**		0,015**		0,018**	

** Não Significativo a 5% de probabilidade.

Os melhores resultados da aplicação do teste t para todas as classes homogêneas estão entre o período de 2008 a 2011. As médias da anomalia padronizada de NDWI e da anomalia de precipitação apresentam diferenças entre si apenas para o ano de 2014. Apesar de em todos os outros períodos as médias não serem estatisticamente diferentes entre si, são verificados valores baixos em muitas observações. Apenas no intervalo de 2008 a 2011 são observados resultados melhores, com valores de p -value variando de 0,4 a 0,9. E que por meio da variação temporal dos dados de anomalia de precipitação e de anomalia padronizada de NDWI, pode ser observada a existência de uma relação entre eles, apesar de não serem muito bem explicadas pela aplicação dos testes de correlação e de médias.

Por fim, foi testado também a relação entre os dados de anomalia padronizada de NDWI com os dados provenientes das soluções GRACE, Figura 43.

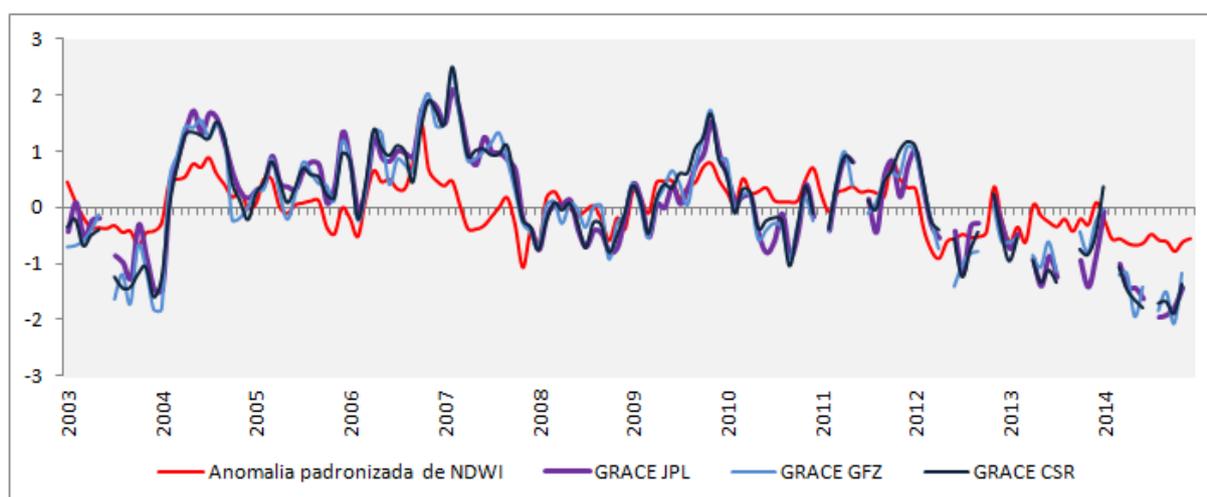


Figura 43: Variação temporal da anomalia padronizada de NDWI e variação da água da subsuperfície das soluções GRACE, no norte de Minas Gerais.

Os dados das soluções GRACE e da anomalia padronizada de NDWI, Figura 43, mostram uma situação de seca similar. Em 2003, 2007-2008 e 2012-2014, verifica-se a indicação de uma situação de anormalidade abaixo da média, que podem estar relacionada aos períodos de seca/estiagem.

As soluções GRACE têm sido empregadas com sucesso no estudo de eventos de seca e de estiagem, conforme ressalta Chen *et al.* (2009) ao monitorar a seca de 2005, na bacia do rio Amazonas. Os dados GRACE indicaram claramente um déficit de armazenamento de água terrestre em 2005. Apesar de não terem dados *in situ* para validação, foi considerada a capacidade dos dados GRACE no monitoramento de seca e estiagem em escala regional. Yirdaw *et al.* (2008) também atestaram o potencial do GRACE no monitoramento de seca, e

demonstraram que este pode ser uma alternativa considerável, principalmente em localidades onde os dados para esta finalidade são escassos.

A relação dos dados de anomalia padronizada de NDWI e dos dados GRACE, evidenciou os mesmos períodos de seca/estiagem na região norte de Minas Gerais, demonstrando que esses dois dados corroboram entre si quanto à investigação dos períodos de seca/estiagem no norte de Minas.

Neste trabalho não foram incorporados dados coletados *in situ* para avaliação do potencial da aplicação da anomalia padronizada de NDWI no monitoramento de seca/estiagem. Apesar disso os dados estimados pelo TRMM e GRACE, considerando as limitações devido a resolução espacial, evidenciaram que a anomalia padronizada de NDWI possui potencial para o monitoramento destes eventos, sendo relacionados com a precipitação e variação de água da subsuperfície.

6 CONCLUSÕES

A utilização de imagens de reflectância do sensor MODIS para geração de série temporal de anomalia padronizada de NDWI obteve resultado satisfatório neste trabalho.

Por meio da série temporal de anomalia padronizada de NDWI foi possível identificar três períodos de seca/estiagem no norte de Minas Gerais: 2003; 2007 a 2008; 2012 a 2014. Estes períodos corroboraram com os períodos de maior número de decretos de situação anormal devido a seca/estiagem junto a defesa civil.

Dois períodos identificados como de seca/estiagem foram noticiados como críticos no norte de Minas, sendo estes; 2007-2008 e 2012-2014. Destaque para o intervalo de 2012-2014, que perfazia três anos consecutivos de precipitações irregulares e má distribuídas, ocasionando impactos sociais e número elevado de declarações de estado de anormalidade junto a defesa civil.

Foi verificada uma relação considerável dos períodos de seca/estiagem com distribuição da precipitação. Nos períodos de seca/estiagem, a precipitação apresentou-se abaixo da média, corroborando com os apontamentos pela anomalia padronizada de NDWI. Além disso, os dados de anomalia padronizada de NDWI também apresentaram resultados favoráveis quando comparados com os dados da defesa civil, sejam de decretos de anormalidade ou em relação aos danos e prejuízos.

Apesar do desempenho satisfatório da anomalia padronizada de NDWI na identificação de períodos de seca/estiagem no norte de Minas, foi constatado que apenas a utilização deste índice por si só, pode não ser suficiente para a identificação da ocorrência de períodos de seca/estiagem, visto que estes podem ocorrer e causar danos e prejuízos em meio a uma paisagem verde, como constatado para o ano de 2010.

Os quantitativos de áreas afetadas negativamente pela anomalia padronizada de NDWI foram estimados de forma satisfatória. Foi verificado que os períodos de maior quantitativo de áreas afetadas negativamente por anomalia padronizada de NDWI são coincidentes com os mesmos períodos da série temporal que apresentaram valores significativos de precipitações comprometidas e de ocorrências de anormalidade junto a defesa civil.

Na análise de correlação entre o NDWI e a precipitação verificou-se que o NDWI responde a precipitação com melhores correlações com uma defasagem de 30 dias, com intensidade variando de moderada a forte.

Na análise da anomalia padronizada de NDWI relacionada à anomalia de precipitação, também foi verificado que os melhores graus de correlações são aqueles para os dados com 30

dias de defasagem. Foi constatado que existem melhores correlações entre os dados de precipitação e NDWI, em comparação aos dados de anomalia padronizada de NDWI e de anomalia de precipitação. Apesar das correlações não serem tão significativas deste último teste, foi observado por meio da variação temporal que estes dois dados demonstram haver uma relação evidente.

A aplicação do teste t demonstra que os melhores resultados são verificados para o período de 2008 a 2011. As médias da anomalia padronizada de NDWI e da anomalia de precipitação apresentam diferenças entre si apenas para o ano de 2014, e apesar de em todos os outros períodos as médias não serem estatisticamente diferentes entre si, são verificados valores baixos de p -value em muitas observações. No entanto, destaca-se que a variação temporal dos dados de anomalia de precipitação e de NDWI evidencia uma relação existente entre esses dados, apesar de não serem muito bem explicadas pela aplicação dos testes de correlação e de médias.

A análise comparativa da anomalia padronizada de NDWI com os dados das soluções GRACE mostra a identificação de um mesmo período de seca/estiagem, demonstrando que esses dois dados corroboram entre si quanto à investigação dos períodos de seca/estiagem no norte de Minas.

REFERÊNCIAS

ADEYEWA, Z. D.; NAKAMURA, K. Validation of TRMM radar rainfall data over major climatic regions in Africa. **Journal of Applied Meteorology**, v. 42, n. 2, p. 331-347, 2003.

AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. HidroWeb. Sistemas de Informações Hidrológicas. Disponível em < <http://hidroweb.ana.gov.br/>> Acesso em 12 de Setembro de 2014.

AGHAKOUCHAK, A.; FARAHMAND, A.; MELTON, F. S.; TEIXEIRA, J.; ANDERSON, M. C.; WARDLOW, B. D.; HAIN, C. R. Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. **Reviews of Geophysics**, v. 53, n. 2, p. 452-480, 2015.

ALBUQUERQUE, E. M., DINIZ, J. M. T., LIMA, R. F., FERREIRA, F. N., SILVA, F. C. Técnicas de geoprocessamento no suporte à análise da seca na microbacia do açude Jatobá II. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 4, p. 27-33, 2015.

ALVES, J. M. B.; REPELLI, C. A. A variabilidade pluviométrica no setor norte do Nordeste e os eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 7, n. 2, p. 583-592, 1992.

AMBENJE, P. G. Regional Drought Monitoring Centres – The Case of Eastern and Southern Africa. In: Wilhite, D. A.; Sivakumar, M. V. K.; Wood, D. A. **Early warning systems for drought preparedness and drought management**. Proceedings of an Expert Group Meeting held in Lisbon, Portugal. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2000.

ANDERSON, L. O.; LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E.; CARVALHO JÚNIOR, O. D. Sensor MODIS: uma abordagem geral. **São José dos Campos: INPE**, 2003.

ANDERSON, M. C.; ZOLIN, C. A., HAIN; C. R., SEMMENS, K., YILMAZ, M. T.; GAO, F. Comparison of satellite-derived LAI and precipitation anomalies over Brazil with a thermal infrared-based Evaporative Stress Index for 2003–2013. **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 287-302, 2015.

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. A importância relativa do Atlântico tropical sul e Pacífico leste na variabilidade de precipitação do nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 1, p. 63-74, 2007.

ARAGÃO, J. O. R. O Impacto do ENSO e do Dipolo do Atlântico no Nordeste do Brasil. **Bull. Inst. fr. Études Andines**, v. 27, n. 3, p. 839-844, 1998.

BAJGIRAN, P. R.; DARVISHSEFAT, A. A.; KHALILI, A.; MAKHDOUM, M. F. Using AVHRR-based vegetation indices for drought monitoring in the Northwest of Iran. **Journal of Arid Environments**, v. 72, n. 6, p. 1086-1096, 2008.

BARROS, K. O. Índice de Aridez como Indicador da Susceptibilidade à Desertificação na Mesorregião norte de Minas. Monografia. Universidade Federal de Viçosa – UFV. p. 89, Viçosa – MG, 2010.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. El Niño e a Agricultura da região Sul do Brasil. **Embrapa** www.cnpt.embrapa.br/agromet, 1998.

BERLATO, M. A; FARENZENA, H.; FONTANA, D. C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 5, p. 423-432, 2005.

BHUIYAN, C. Various drought indices for monitoring drought condition in Aravalli terrain of India. In: **XXth ISPRS Congress**. p. 12-23, 2004.

BLAIN, G. C. Aplicação do conceito do índice padronizado de precipitação à série decenal da diferença entre precipitação pluvial e evapotranspiração potencial. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p. 234-245, 2011.

BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Avaliação e adaptação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) às condições climáticas do Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 64, n. 4, p. 695-705, 2005.

BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Análise da escala temporal de monitoramento das secas agrícolas e meteorológicas no Estado de São Paulo, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, p.255-261, 2007.

BOMFIM, E. P. Utilização dos Dados do GRACE para a caracterização da variabilidade das massas de água do Aquífero Guarani. Dissertação. (Mestrado). Universidade de São Paulo - USP, São Paulo - SP. p. 141, 2006.

BOMFIM, E. P.; MOLINA, E. C.. Análise da variação dos elementos do campo de gravidade na região do Aquífero Guarani a partir dos dados GRACE. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 1, p. 17-34, 2009.

BONIFACIO, R.; DUGDALE, G.; MILFORD, J. R. Sahelian rangeland production in relation to rainfall estimates from Meteosat. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, p. 2695 – 2711, 1993.

BRASIL. Lei nº 11.428, de 22 de Dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo. Brasília - DF, 22 dez. 2006. Disponível em < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/111428.htm> Acesso em 30 de Novembro de 2014.

BRASIL. Decreto nº 6.660, de 21 de Novembro de 2008. Regulamenta dispositivos da Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006, que dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo. Brasília - DF, 21 nov. 2008. Disponível em < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/decreto/d6660.htm> Acesso em 30 de Novembro de 2014.

CAMPAROTTO, L. B.; BLAIN, G. C.; GIAROLLA, A.; ADAMI, M.; CAMARGO, M. D. Validação de dados termopluiométricos obtidos via sensoriamento remoto para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 665-671, 2013.

CARVALHO, O.; RIBEIRO, R. T.; REBOUCAS, A. C.; ALBUQUERQUE, G. S. C.; SOUZA, F. F.; REIS, J. G.; HUZTLER, C. R.; PELLERIN, G.; BARROS, A. C. R. **Plano Integrado para o combate preventivo dos efeitos das secas no Nordeste**. Brasília, Minter. 1973, p. 85

CASTRO, Antônio Luiz Coimbra. **Manual de planejamento em defesa civil**. Ministério da Integração Nacional, Secretaria Nacional de Defesa Civil, 1999. Disponível em < <http://www.defesacivil.mg.gov.br/conteudo/arquivos/manuais/Manuais-de-Defesa-Civil/Manual-PLANEJAMENTO-1.pdf>> Acesso em 05 de Dezembro de 2015.

CASTRO, A. L. C. **Manual de Desastres: Desastres Naturais**. Brasília - DF: Ministério da Integração Nacional, 2003. 182 p.

CASTRO, H. M.; FERREIRA, VAGNER G.; DE FREITAS, S. R. C. Análise de deformação por variação do Geopotencial: estudo de caso para o terremoto Maule (mw 8, 8) com base em dados mensais da missão GRACE. **Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos**, v. 18, n. 1, p. 86-100, 2012.

CAVASSAN, Osmar. BAURU: TERRA DE CERRADO OU FLORESTA?. **Ciência Geográfica**, p. 46-54, 2013.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES. Universidade Federal de Santa Catarina (CEPED/UFSC). **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010**: volume Minas Gerais. Florianópolis – SC, p. 95, 2011.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES. Universidade Federal de Santa Catarina (CEPED/UFSC). **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2012**: volume Minas Gerais. Florianópolis – SC, p. 165, 2013.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES. Universidade Federal de Santa Catarina (CEPED/UFSC). **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2012**: volume Brasil. Florianópolis – SC, p. 126, 2013.

CHEN, J. L.; WILSON, C. R.; TAPLEY, B. D.; YANG, Z. L.; NIU, G.Y. drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models. *Journal of Geophysical Research*, v. 114, B05404. 2009.

CHEN, J. L.; WILSON, C. R.; TAPLEY, B. D. The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE. **Water Resources Research**, v. 46, n. 12, 2010.

COLLISCHONN, B. Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM me modelo hidrológico distribuído. Dissertação. (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Instituto Pesquisas Hidráulicas - IPH, Porto Alegre - RS. p. 193, 2006.

COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai superior. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, n. 1, 2007.

CORDEIRO, A. P. A. Padrões do Índice de Vegetação Associados à Variabilidade Climática do Estado do Rio Grande do Sul. Tese. (Doutorado). Faculdade de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia - UFRGS, Porto Alegre - RS. p. 154, 2014.

COSTA, D. S. M.; RUAS, K. F.; PEREIRA, A. M. As potencialidades da região semiárida do norte de Minas Gerais: Análise do Centro de Convivência com o Semiárido. In: **XVI Encontro Nacional de Geógrafos**, 2010, Porto Alegre - RS.

COSTA, J. A. O FENÔMENO EL NIÑO E AS SECAS NO NORDESTE DO BRASIL. **EDUCTE: Revista Científica do Instituto Federal de Alagoas**, v. 3, n. 1, 2012.

COSTA, S. R.; SANO, E. E.; BRITES, R. S. Identificação da floresta estacional decidual na bacia do rio São Miguel, região do Alto São Francisco – MG. In: **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu - PR, p. 8316 – 8321, 2013.

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**, São Paulo, n. 29 – Especial, p. 85-95, 2011.

CONEJO, J. G. L. **Panorama da qualidade das águas superficiais no Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Águas. (Caderno de Recursos Hídricos, 1). p. 49, 2005.

CROWLEY, J. W.; MITROVICA, J. X.; BAILEY, R. C.; TAMISIEA, M. E.; DAVIS, J. L. Land water storage within the Congo Basin inferred from GRACE satellite gravity data. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 19, 2006.

CUNHA, R. L. A. Definição de cenários de referência para avaliação dos impactos das secas. Dissertação. (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP, Porto. p. 147, 2008.

DAI, A. Drought under global warming: a review. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 2, n. 1, p. 45-65, 2011.

DEFESA CIVIL DE MINAS GERAIS. **Plano de Convivência com a seca 2015**. Belo Horizonte - CEDEC/MG. 85.p 2015. Disponível em <http://www.defesacivil.mg.gov.br/conteudo/arquivos/planoseca2015/1_Plano_Seca_2015.pdf> Acesso em 18 de Dezembro de 2015.

DIAZ, C. C. F.; PEREIRA, J. A. S.; NÓBREGA, R. S. Validação de dados de precipitação diária estimados por satélite sobre a bacia do rio Una. In: **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**. João Pessoa – PB, p. 4667- 4674, 2015.

DOUGHTY, C. E.; METCALFE, D. B.; GIRARDIN, C. A. J.; AMÉZQUITA, F. F.; CABRERA, D. G.; HUASCO, W. H.; FELDPAUSCH, T. R. Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia. **Nature**, v. 519, n. 7541, p. 78-82, 2015.

DU, L.; TIAN, Q.; YU, T.; MENG, Q.; JANCOSO, T.; UDVARDY, P.; HUANG, Y. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 23, p. 245-253, 2013.

ESTADO DE MINAS. Seca chega mais forte ao norte de Minas e arrasa plantações de milho e de feijão. Belo Horizonte - MG, 2010. Disponível em <http://www.em.com.br/app/noticia/economia/2010/02/22/internas_economia,148724/seca-chega-mais-forte-ao-norte-de-minas-e-arrasa-plantacoes-de-milho-e-de-feijao.shtml> Acesso em 12 de Janeiro de 2016.

ESTADO DE MINAS. Norte do estado tem longo histórico de secas rigorosas. Belo Horizonte - MG, 2012a. Disponível em <http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2012/05/20/interna_gerais,295312/norte-do-estado-tem-longo-historico-de-secas-rigorosas.shtml> Acesso em 10 de Janeiro de 2016.

ESTADO DE MINAS. Norte e Nordeste de Minas enfrentam uma das piores secas da história. Belo Horizonte - MG, 2012b. Disponível em <http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2012/05/20/interna_gerais,295307/norte-e-nordeste-de-minas-enfrentam-uma-das-piores-secas-da-historia.shtml> Acesso em 13 de Janeiro de 2016.

ESTADO DE MINAS. Em Minas, 117 cidades decretaram situação de emergência por causa da seca e estiagem. Belo Horizonte - MG, 2012c. Disponível em <http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2012/07/26/interna_gerais,308267/em-minas-117-cidades-decretaram-situacao-de-emergencia-por-cao-da-seca-e-estiagem.shtml> Acesso em 13 de Janeiro de 2016.

ESTADO DE MINAS. Falta água para viver no norte de Minas e no Vale do Jequitinhonha. Belo Horizonte - MG, 2014. Disponível em <http://www.em.com.br/app/noticia/economia/2014/07/25/internas_economia,551696/falta-agua-para-viver-no-norte-de-minas-e-no-vale-do-jequitinhonha.shtml> Acesso em 14 de Janeiro de 2016.

EZZINE, H.; BOUZIANE, A.; OUAZAR, D. Seasonal comparisons of meteorological and agricultural drought indices in Morocco using open short time-series data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 26, p. 36-48, 2014.

FERREIRA, T.; DI PACE, F.; DELGADO, J.; GOMES, T. Preliminary analysis of drought in 2012 in semi-arid of Alagoas using indices of vegetation through sensor MODIS. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 5, n. 1, p. 001-012, 2015.

FERRI, M. G. **IV Simpósio Sobre o Cerrado: bases para utilização agropecuária.**: São Paulo – SP: Itatiaia/EDUESP, 1977.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; DA PAZ, R. L.; AMORIM, A. O.; CARDOSO, A. S. **Índices para a Quantificação da Seca.** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Arroz e Feijão, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Santo Antônio de Goiás, GO, p. 48, 2009.

FIELD, A. **Descobrendo a estatística usando o SPSS**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed; 2009.

FRANCISCO, P. R. M.; CHAVES, I. B.; CHAVES, L. H. G.; LIMA, E. R. V. Detecção de Mudança da Vegetação de Caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, n. 06, p. 1473-1487, 2012.

FREITAS, R.M.; ARAI, E.; ADAMI, M.; FERREIRA, A.S.; Sato, F.Y.; SHIMABUKURO, Y.E.; ROSA, R.R.; ANDERSON, L.O.; RUDORFF, B.F. T. Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, v. 2, p.57 - 68, 2011.

GALVÃO, A. C; RODRIGUES, R. F. Nova Delimitação do Semiárido Brasileiro. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2005.

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

GAO, X.; HUETE, A. R.; NI, W.; MIURA, T. Optical–biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, p. 609 - 620, 2000.

GEOMINAS – Infraestrutura de Dados Espaciais. Governo do Estado de Minas Gerais. In: Atlas de zoneamento agroclimático do Estado de Minas Gerais—SEA (1980). Disponível em <<http://www.ide.ufv.br/geominas/srv/br/main.home>> Acesso em 14 de Setembro de 2014.

GOUVEIA, C. M.; BASTOS, A.; TRIGO, R. M.; DACAMARA, C. C. Drought impacts on vegetation in the pre-and post-fire events over Iberian Peninsula. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 12, n. 10, p. 3123-3137, 2012.

GU, Y.; BROWN, J. F.; VERDIN, J. P.; WARDLOW, B. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 6, 2007.

GU, Y.; HUNT, E.; WARDLOW, B.; BASARA, J. B., BROWN, J. F.; VERDIN, J. P. Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 22, 2008.

GUEDES, A. E. D. S.; CÂNDIDO, L. A.; DO ESPÍRITO SANTO, A. R. S. Variabilidade do estoque de água continental e sua relação com as cheias e vazantes extremas na Amazônia. **Revista Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**: v. 8, n. 2, 2013.

GUEDES, M. H. **As Estiagens!**. Clube de Autores (Edição Digital). p. 88, 2015.

GUTTMAN, N. B. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 35, n. 2, p. 311-322, 1999.

HAYES, M. J.; SVOBODA, M. D.; WILHITE, D. A.; VANYARKHO, O. V. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 80, n. 3, p. 429-438, 1999.

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

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

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; WOLFF, D. B.; ADLER, R. F.; GU, G.; STOCKER, E. F. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 1, p. 38-55, 2007.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Área territorial oficial**. Rio de Janeiro, 2001.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa do Potencial Agrícola do Brasil**. Atlas Nacional do Brasil, 4ª Edição. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa dos Biomas continentais do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2004.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa do Semiárido Brasileiro**. Rio de Janeiro: IBGE, 2005 Disponível em < ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/mapas_regionais/sociedade_e_economia/semi_arido/semiarido_brasileiro.pdf > Acesso em 20 de Junho de 2016.

IEF – INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS. **Cobertura vegetal de Minas Gerais**. Disponível em < <http://www.ief.mg.gov.br/florestas> > Acesso em 20 de Fevereiro de 2016.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Implantação de Sistema de Monitoramento Hídrico e de Alerta de Secas no Semi-Árido do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte – MG, 2010.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Bases Cartográficas Digitais**. Bacias Federais. Disponível em < <http://www.igam.mg.gov.br/geoprocessamento/downloads/1245> > Acesso em 12 de Setembro de 2014.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - BDMEP**. Disponível em < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep> > Acesso em 29 de Novembro de 2014.

JENSEN, J. R.; EPIPHANIO, J. C. N. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F., MASUOKA, E., WOLFE, R. E., SALEOUS, N., ROY, D. P., MORISETTE, J. T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n.1-2, Nov. p 3 –15, 2002.

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

KINYANJUI, M. J. NDVI-based vegetation monitoring in Mau forest complex, Kenya. **African Journal of Ecology**, v. 49, n. 2, p. 165-174, 2011.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; RUDORFF, F. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109 p.

KOGAN, F. N. Vegetation index for a real analysis of crop conditions. In: **Proceedings of the 18th Conference on Agricultural and Forest Meteorology**, AMS, W. Lafayette, Indiana, USA, p. 103–106, 1987.

KOGAN, F. N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 76, n. 5, p. 655-668, 1995.

KOGAN, F. N. Global drought watch from space. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 4, p. 621-636, 1997.

KUMMEROW, C. *et al.* The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, n. 12, p. 1965-1982, 2000.

LATORRE, M.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Sensor MODIS: Características gerais e aplicações. **Revista Espaço e Geografia**, v. 6, n.1, p. 91 - 121, 2003.

LEITE, M. E.; ALMEIDA, M. I. S.; VELOSO, G. A.; FERREIRA, M. F. F. Sensoriamento remoto aplicado ao mapeamento da dinâmica do uso do solo na bacia do rio Pacuí, no norte de Minas Gerais, nos anos de 1989, 1999 e 2009. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 23, p. 217-231, 2012.

LEITE, M. E.; SANTOS, I. S.; ALMEIDA, J. W. L. Mudança de Uso do Solo na Bacia do Rio Vieira, em Montes Claros/MG. **Revista Brasileira de Geografia Física** 04 -779-792, 2011.

LEIVAS, J. F., ANDRADE, R. G., VICENTE, L. E., TORRESAN, F. E., VICTORIA, D., BOLFE, É. L. Monitoramento da seca de 2011/12 a partir do NDWI e NDVI padronizado do SPOT-Vegetation. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto–SBSR**, p. 364-370, 2013.

LEIVAS, J. F. ANDRADE, R. G.; VICTORIA, D. C.; TORRESAN, F. E.; BOLFE, E. L. Monitoramento da seca 2011/2012 no nordeste brasileiro a partir do satélite SPOT-VEGETATION e TRMM. **Reveng**, v. 22, n. 3, p.211-221, 2014.

LI, K. Drought Early Warning and Impact Assessment in China. In: Wilhite, D. A.; Sivakumar, M. V. K.; Wood, D. A. Early warning systems for drought preparedness and drought management. Proceedings of an Expert Group Meeting held in Lisbon, Portugal. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2000.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: UNIDERP, 2006. p. 908.

LIU, W. T. H.; VILELA, T. A.; VIEIRA, C. A. O.; GOTTARDO, T. V.; KOGAN, F. Previsão de Safra da soja no município de Capinópolis/MG através do sensoriamento remoto. **II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésias e Tecnológicas da Geoinformação**. Recife – PE, p. 8-11, 2008.

LIU, W. T. H.; KOGAN, F. N. Monitoring regional drought using the vegetation condition index. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 14, p. 2761-2782, 1996.

MA, M.; REN, L.; YUAN, F.; JIANG, S.; LIU, Y.; KONG, H.; GONG, L. A New Standardized Palmer Drought Index for Hydro-Meteorological use. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 23, p. 5645-5661, 2014.

MACEDO, M. J. H.; SOUZA, R. V. G.; SOUSA, F. D. A. S.; CUNHA, F. R. D. Análise do índice padronizado de precipitação para o estado da Paraíba, Brasil. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 5, n. 1, p. 204-214, 2010.

MACIEL, A. S.; BARCELOS, B. F.; OLIVEIRA, L. A. A análise da influência da altitude na temperatura e na precipitação da mesorregião norte de Minas – Minas Gerais. **Rev Geonorte**, v. 2, p. 250-261, 2012.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. Brasília-DF: MMA, 2006.

MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. **Parcerias estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 149-176, 2008.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to the time scales. In: Conference on Applied Climatology, 8., Anaheim, CA. **Proceedings**. Boston: American Meteorological Society, p. 179-184, 1993.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. Drought monitoring with multiple times scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 9., 1995, Boston. **Anais...** Boston: p.233 – 236, 1995.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. Mapeamento de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p. 37- 44, 2013.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Calendário de Plantio 2015**. Disponível em < <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/noticias/2015/04/produtores-devem-ficar-atentos-aos-prazos-de-plantio-e-colheita-das-culturas>> Acesso em 18 de Fevereiro de 2016.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2012**. Brasília: CENAD, 84 p, 2012.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Download de dados geográficos. Disponível em < <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>> Acesso em 23 de Junho de 2016.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado**. Brasília - DF, 2010a.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Mata Atlântica**. Manual de Adequação Ambiental. Brasília - DF, 2010b.

MINUZZI, R. B.; SEDIYAMA, G. C.; RIBEIRO, A.; COSTA, J. M. El Niño: ocorrência e duração dos veranicos do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 364-371, 2005.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A Review of Drought Concepts. *Journal of Hydrology*, v. 391, n. 1, p. 202-216, 2010.

MOREIRA, A. A.; FERNANDES, F. H. S.; ALMEIDA, R. P.; NERY, C. V. M.. O Algoritmo Support Vector Machine Aplicado ao Mapeamento do Uso e Ocupação do Solo (The Support Vector Machine Algorithm Applied to Mapping and Land Use). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 2, p. 291-303, 2014.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NASA. Agência Espacial Norte Americana. Disponível em < http://www.nasa.gov/mission_pages/Grace/news/index.html#VjGGULerTDC> Acesso em 24 de Outubro de 2015.

NICÁCIO, R. M.; ARAUJO, L. L.; GONZAGA, E. P.; LIBOS, M.; OLIVEIRA, L. M. T. Relação NDVI e precipitação na bacia do rio Coxim–MS. **2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Corumbá**, p. 7-11, 2009.

NIMER, E.; BRANDÃO, A. M. P. M. Balanço Hídrico e Clima da região do Cerrado. Rio de Janeiro, IBGE, 1989.

NOAA. National Weather Service. Climate Prediction Center. Disponível em < http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml >. Acesso em 18 de Fevereiro de 2016.

NOBRE, P.; MELO, A. B. C. Variabilidade climática intrasazonal sobre o Nordeste do Brasil em 1998-2000. **Revista Climanalise**, v. 2, 2001.

NUNES, H. M. T.; NUNES, G. S. S.; HADAD, R. M. Avaliação da Incidência de Secas no norte do Estado de Minas Gerais. In: **III Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 1984, Belo Horizonte. Anais III Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1984. v. 1. p. 150-160.

NUNES, M. A. J.; COSTA, S. G.; SILVA, R. G. O quadrilátero Ferrífero e o norte de Minas Gerais: Análise da História e Importância Econômica. UNIMONTES – Universidade Estadual de Montes Claros, 2012. Disponível em <http://unimontes.br/arquivos/2012/geografia_ixerg/eixo_politica_meio_ambiente/o_quadri_late_ro_ferrifero_e_o_norte_de_minas_gerais_analise_da_historia_e_import%C3%82ncia_econ%C3%94mica.pdf> Acesso em 29 de Novembro de 2014.

O TEMPO. Norte de Minas vive a pior seca dos últimos 40 anos. Belo Horizonte - MG, 2013. Disponível em: <<http://www.otempo.com.br/super-noticia/norte-de-minas-vive-a-pior-seca-dos-%C3%BAltimos-40-anos-1.222956>> Acesso em 11 de Janeiro de 2016.

OLIVEIRA, M. F. M. Norte de Minas o Estado mais pobre do Nordeste. 1998. Disponível<https://www.almg.gov.br/opencms/export/sites/default/consulte/publicacoes_assembleia/periodicas/revistas/arquivos/pdfs/21/marcos21.pdf> Acesso em 04 de Abril de 2015.

OLIVEIRA, S. B. P.; SOUZA, M. J. N.; LEITE, F. R. B.; COSTA, R. N. S. Contribuição ao Estudo da Degradação Ambiental no município de Caridade-CE. **Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 1391-1398. Belo Horizonte – MG, 2003.

OLIVEIRA FILHO, A. T. *et al.* **Definição e delimitação de domínios e subdomínios das paisagens naturais do estado de Minas Gerais**. In: SCOLFORO, J. R.; CARVALHO, L. M. T. (Ed.). Mapeamento e Inventário da Flora e dos Reflorestamentos de Minas Gerais. Lavras: UFLA, p.21-35, 2006.

PALMER, W. C. **Meteorological drought**. Washington, DC, USA: US Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.

PANU, U. S.; SHARMA, T. C. Challenges in drought research: some perspectives and future directions. **Hydrological Sciences Journal**, v. 47, n. S1, p. S19-S30, 2002.

PARK, J.S.; KIM, K.T.; CHOI, Y.S. Application of vegetation condition index and standardized vegetation index for assessment of spring drought in South Korea. In: **Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS. IEEE International**. p. 774-777, 2008.

PEREIRA JÚNIOR. S. Nova delimitação do Semi-Árido brasileiro. Brasília, Câmara dos Deputados, 2007.

PEZZINI, F. F. Fenologia e características reprodutivas em comunidades arbóreas de três estágios sucessionais em Floresta Estacional Decidual do norte de Minas Gerais. Dissertação. Mestrado. **Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG**, p.130, Belo Horizonte – MG, 2008.

QUIRING, S. M.; GANESH, S. Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 3, p. 330-339, 2010.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3, Washington. **Proceedings...** Whashington: NASA, 1974, v.1, p.309-317, 1973.

RUDORFF, B. F. T; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. **Sensor Modis e Suas Aplicações Ambientas no Brasil**. Editora Parêntese, 2007.

SANNIER, C. A. D. Real-time vegetation monitoring with NOAA-AVHRR in southern Africa for wildlife management and food security assessment. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 4, 1998, p. 621-639, 1998.

SANSIGOLO, C. A. Análise comparativa do desempenho dos Índices de Seca de Palmer (PDSI) e da Precipitação Normalizada (SPI) em Piracicaba, SP (1917–2001). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 1, p. 51-56, 2004.

SANTOS, M. J. J. Caracterização e Monitoramento de Secas. **Instituto da Água – Direção de Serviços** de Recursos Hídricos (INAG – DSRH), p. 1-26, 1998.

SANTOS, M. S. Caracterização espaço-temporal de secas utilizando ondaletas e o standardized precipitation index: uma aplicação para a parcela mineira da Bacia do Rio São Francisco. Dissertação. Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. p 148, Belo Horizonte – MG, 2011.

SANTOS, N. B. F. Padrões de distribuições espaciais e temporais de temperatura de superfície no bioma Cerrado: Uma análise integrada a partir de dados orbitais de resolução moderada. Tese. Doutorado. Universidade Federal de Goiás - UFG. p. 94, Goiânia - GO, 2010.

SEILER, R. A.; KOGAN, F.; SULLIVAN, J. AVHRR-based vegetation and temperature condition indices for drought detection in Argentina. **Advances in Space Research**, v. 21, n. 3, p. 481-484, 1998.

SERRA GERAL. Seca leva prefeito a decretar emergência em Janaúba. Janaúba - MG, 2010. Disponível < http://www.jornaldaserrageral.com.br/v2/index.php?option=com_content&task=view&id=1600&Itemid=1> Acesso em 15 de Janeiro de 2016.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. Geodiversidade do Estado de Minas Gerais. Programa de Geologia do Brasil. Levantamentos da Geodiversidade. 2010. Disponível em < http://www.cprm.gov.br/publique/media/Geodiversidade_MG.pdf> Acesso em 29 de Novembro de 2014.

SINGH, R. P.; ROY, S.; KOGAN, F. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 22, p. 4393-4402, 2003.

SILVA, B. B. **Aplicações Ambientais Brasileiras de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto**. Embrapa Algodão-Livros científicos (ALICE), Campina Grande: EDUFPG, 216 p. 2013.

SILVA, D. F.; PANTANO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Análise de dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o vale do médio Parapanema-SP. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 21, n. 2, p. 138-147, 2013.

SILVA, M. L. Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto Aplicado ao Mapeamento e Caracterização de Superfícies Aplainadas no norte de Minas Gerais. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. p. 91, Belo Horizonte – MG, 2012.

SOUSA, S. B.; Arantes, A. E.; Cardoso, M. R D.; Ferreira, L. G. Análise comparativa entre dados TRMM e estações pluviométricas no Pantanal brasileiro: ano base 2006. **In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**. Foz do Iguaçu – PR, p. 6945-6952, 2013.

SOUSA JÚNIOR, M. A.; SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. **Monitoramento de estiagem na região Sul do Brasil utilizando dados ENVI/MODIS no período de dezembro de 2000 a junho de 2009**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos – SP, p. 122, 2010.

SOUZA, J. R.; REIS, L. N. G. Mapeamento e Análise do Uso dos Solos no Município de Ibiá – MG Utilizando o Software SPRING 5.1.8: Análise da dinâmica agropecuária. **Revista Eletrônica de Geografia**, v.3, n.8, p.141-163, dez.2011.

SUN, H.; ZHAO, X.; CHEN, Y.; GONG, A.; YANG, J. A new agricultural drought monitoring index combining MODIS NDWI and day–night land surface temperatures: a case study in China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 24, p. 8986-9001, 2013.

SWENSON, S.; WAHR, J.; MILLY, P. C. D. Estimated accuracies of regional water storage variations inferred from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). **Water Resources Research**, v. 39, n. 8, 2003.

THENKABAIL, P. S.; GAMAGE, M. S. D. N.; SMAKHTIN, V.U. **The use of Remote Sensing data for drought assessment and monitoring in Southwest Asia**. Internacional Water Management Institute - IWMI, Colombo, Sri Lanka, v.85, 2004.

VIANA, D. R.; FERREIRA, N. J.; CONFORTE, J. C. Avaliação das estimativas de precipitação 3B42 e 3B43 do satélite TRMM na Região Sul do Brasil. **In: Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMet), XVI**. 2010.

VICENTE-SERRANO, S. M. Evaluating the impact of drought using remote sensing in a Mediterranean, semi-arid region. **Natural Hazards**, v. 40, n. 1, p. 173-208, 2007.

WAHR, J.; WINGHAM, D.; BENTLEY, C.. A method of combining ICESat and GRACE satellite data to constrain Antarctic mass balance. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)**, v. 105, n. B7, p. 16279-16294, 2000.

WILHITE, D. A.; SVOBODA, M. D. Drought early warning systems in the context of drought preparedness and mitigation. **Early warning systems for drought preparedness**

and drought management, p. 1-21, 2000. Proceedings of an Expert Group Meeting held in Lisbon, Portugal. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO. **Drought monitoring and early warning: concepts, progress and future challenges**. WMO – n. 1006. 2006.

XAVIER, L. N. R. Modelagem hidrológica com o aporte de dados da missão espacial GRACE: Aplicação a bacias brasileiras. Tese. (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro - RJ. p. 250, 2012.

YAN, N.; WU, B.; CHANG, S.; BAO, X. Evaluation of TRMM precipitation product for meteorological drought monitoring in Hai Basin. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2014. p. 012093.

YIRDAW, S. Z.; SNELGROVE, K. R.; AGBOMA, C. O. GRACE satellite observations of terrestrial moisture changes for drought characterization in the Canadian Prairie. **Journal of Hydrology**, v. 356, n. 1, p. 84-92, 2008.

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

ZENG, N.; JIN-HO YOON, MARIOTTI, A. R.; SWENSON, S. Variability of Basin-Scale Terrestrial Water storage from a PER Water Budget Method: The Amazon and the Mississippi. **Journal of Climate**, v. 21, p. 248-264, 2008.

ZHANG, A.; JIA, G. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. **Remote sensing of Environment**, v. 134, p. 12-23, 2013.

ANEXOS

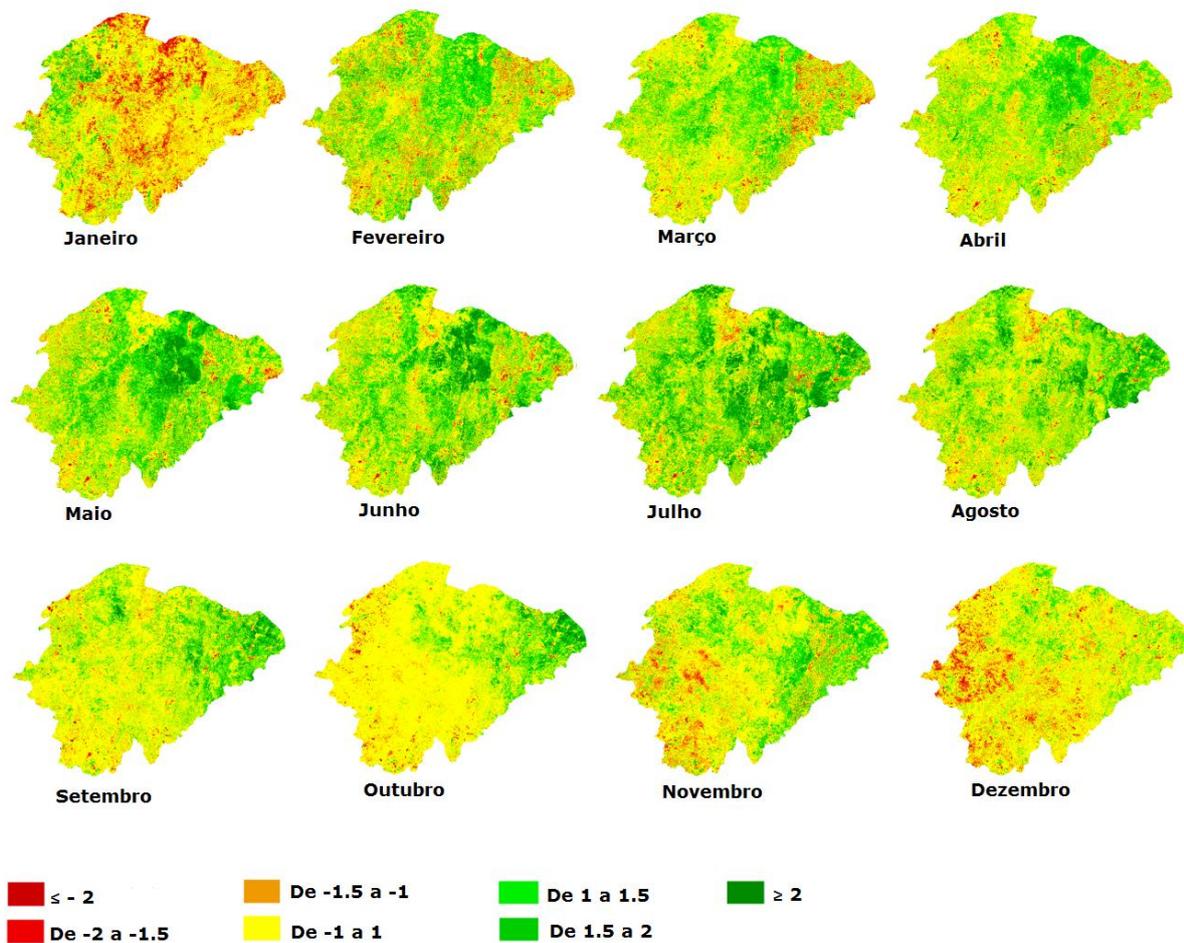


Figura A. 1: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2004, no norte de Minas Gerais.

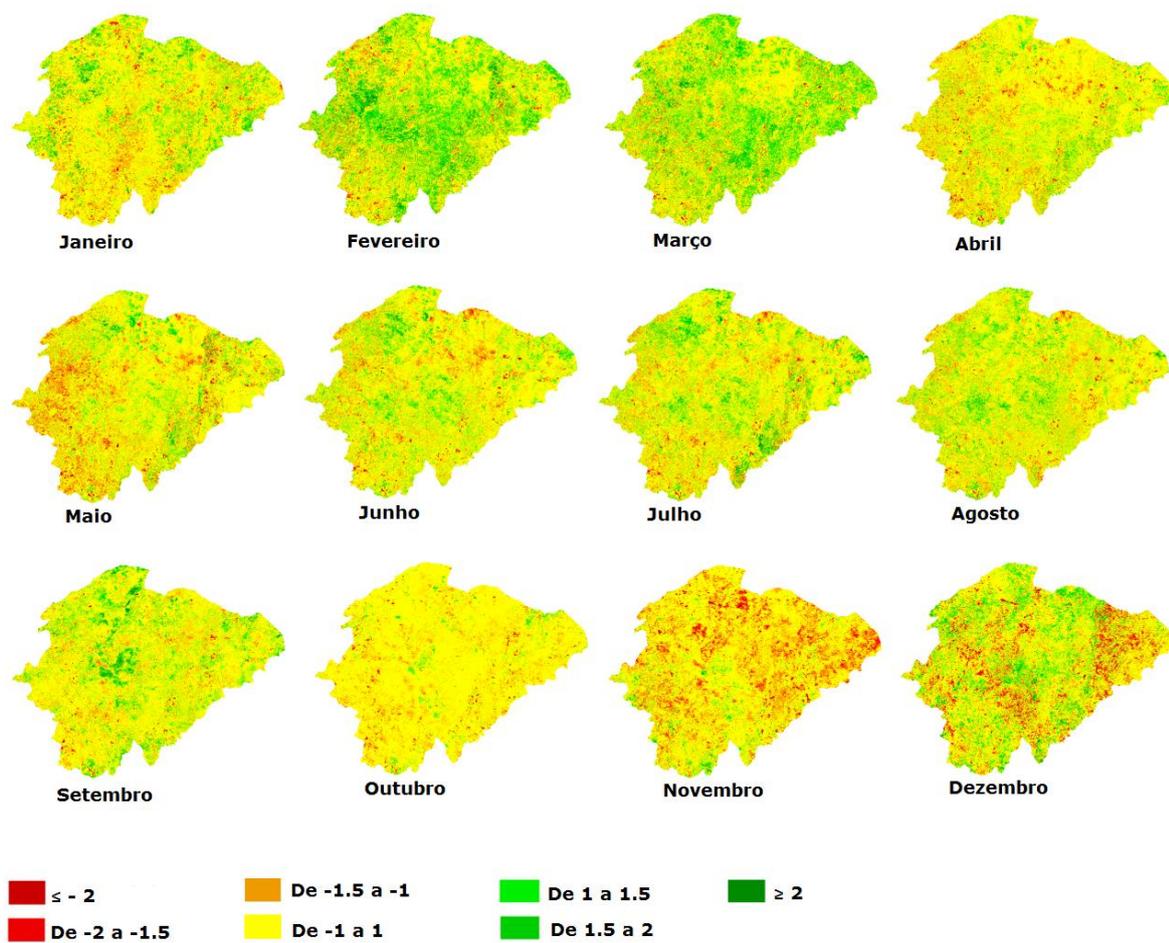


Figura A. 2: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2005, no norte de Minas Gerais.

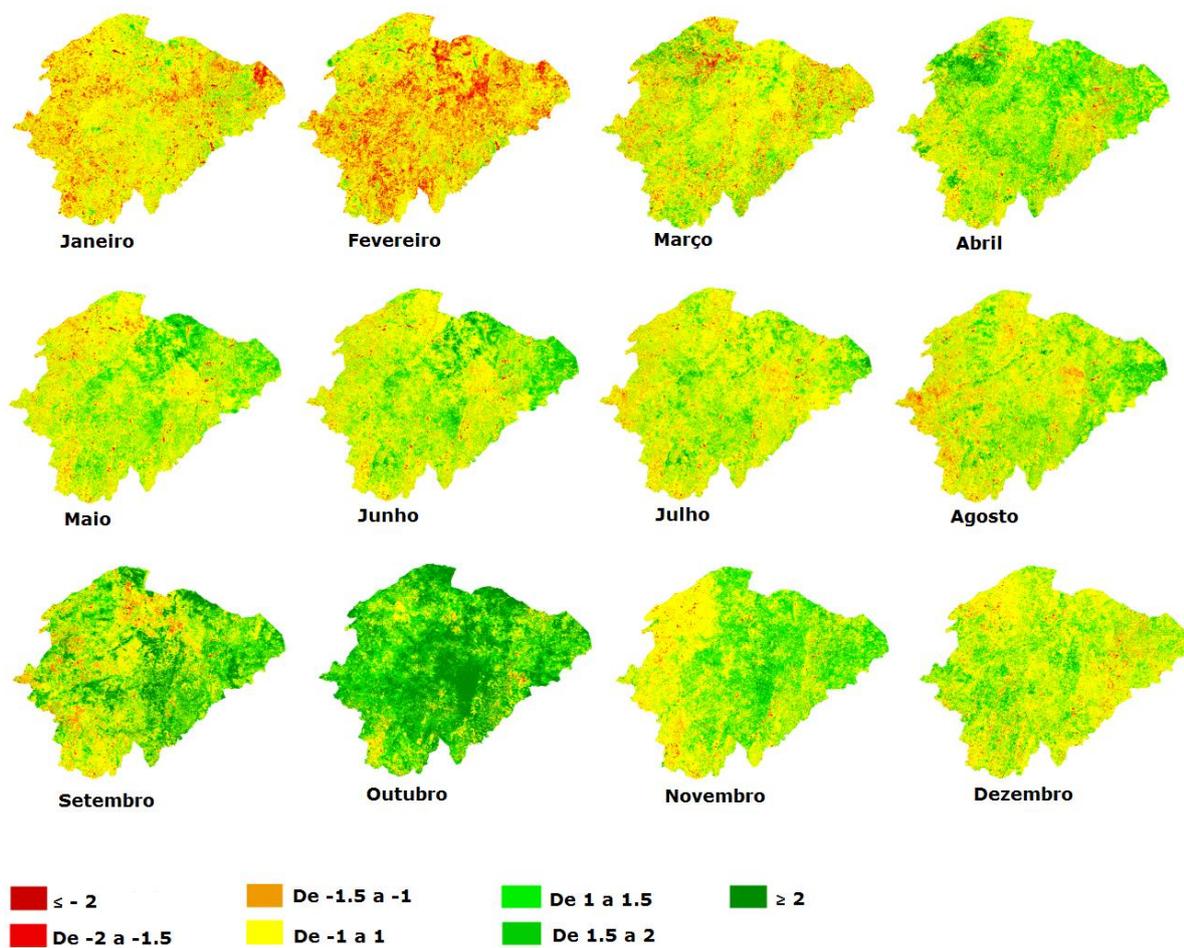


Figura A. 3: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2006, no norte de Minas Gerais.

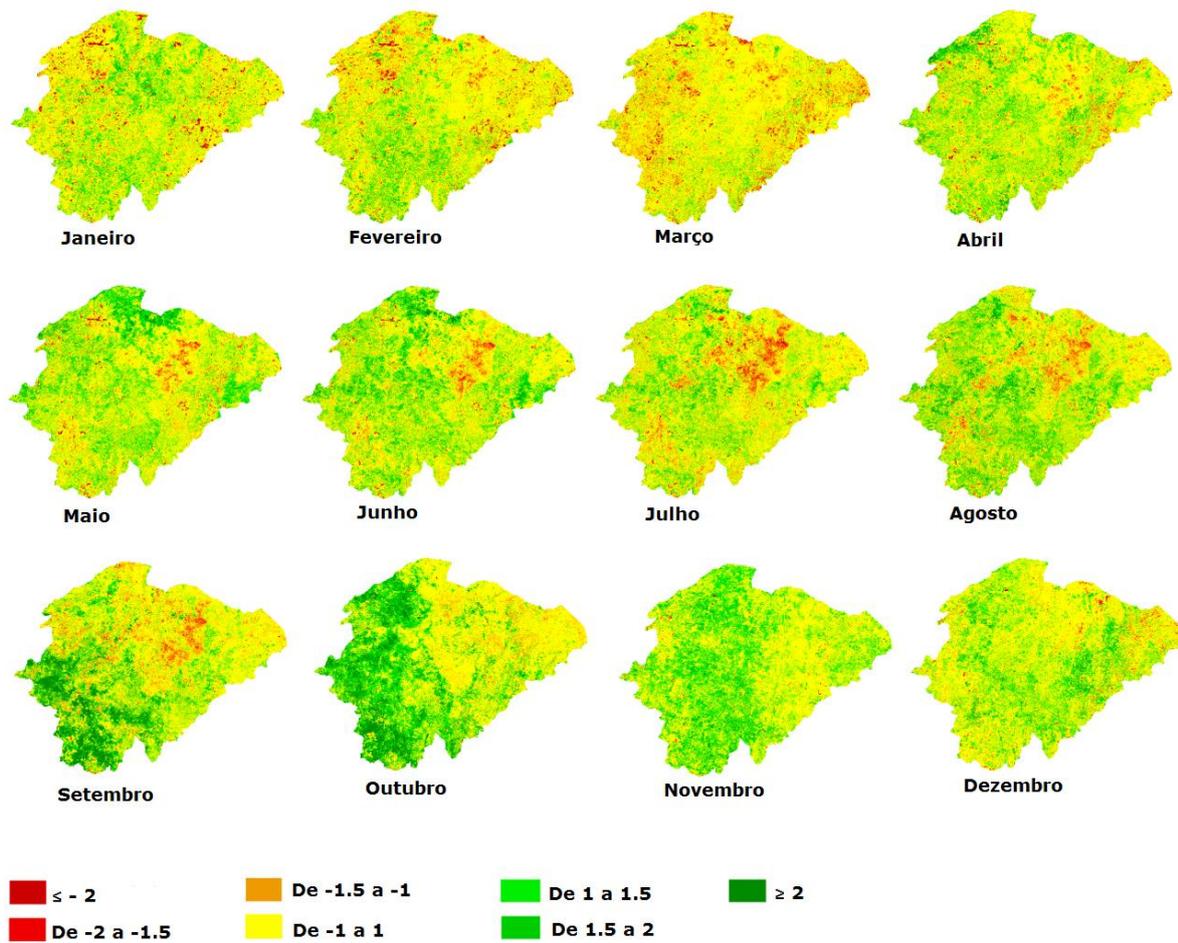


Figura A. 4: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2009, no norte de Minas Gerais.

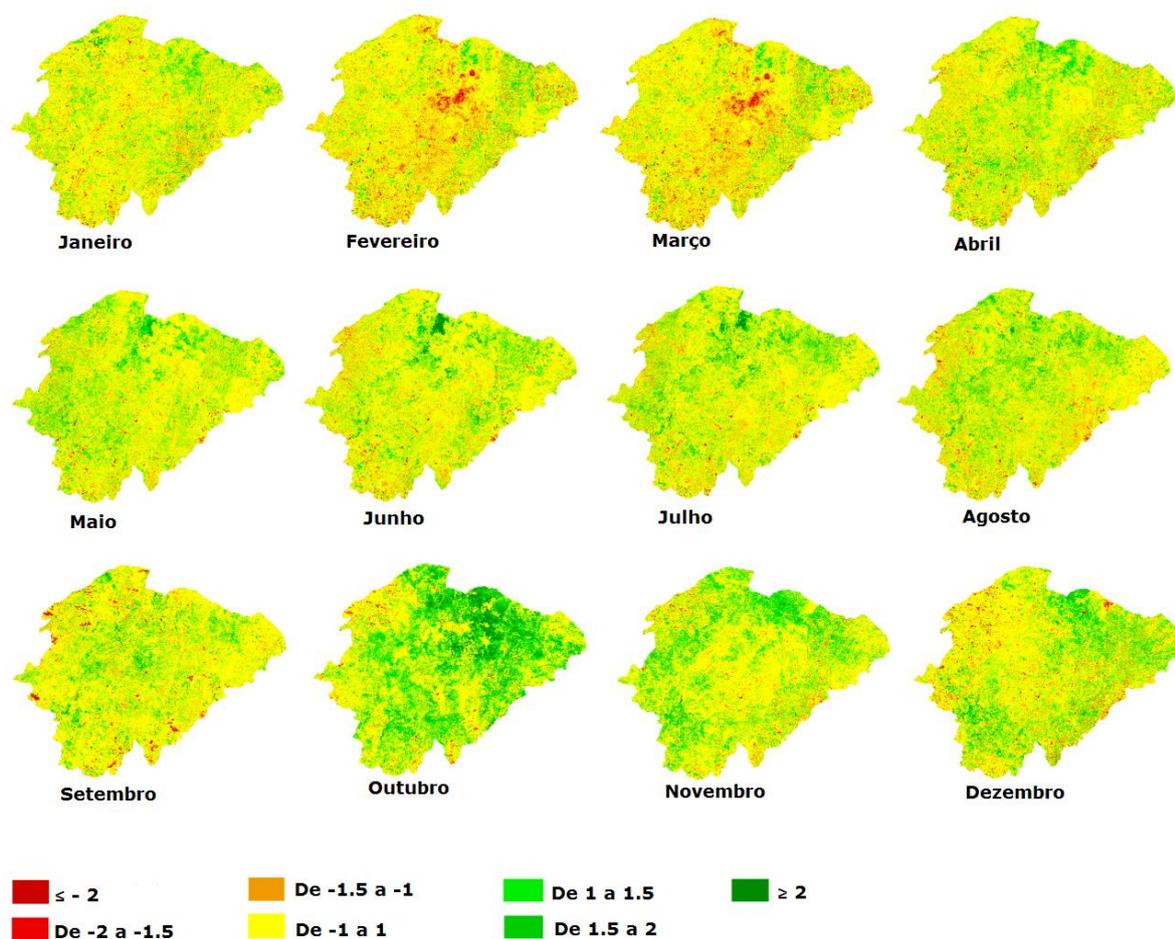


Figura A. 5: Anomalia padronizada de NDWI, no ano de 2011, no norte de Minas Gerais.

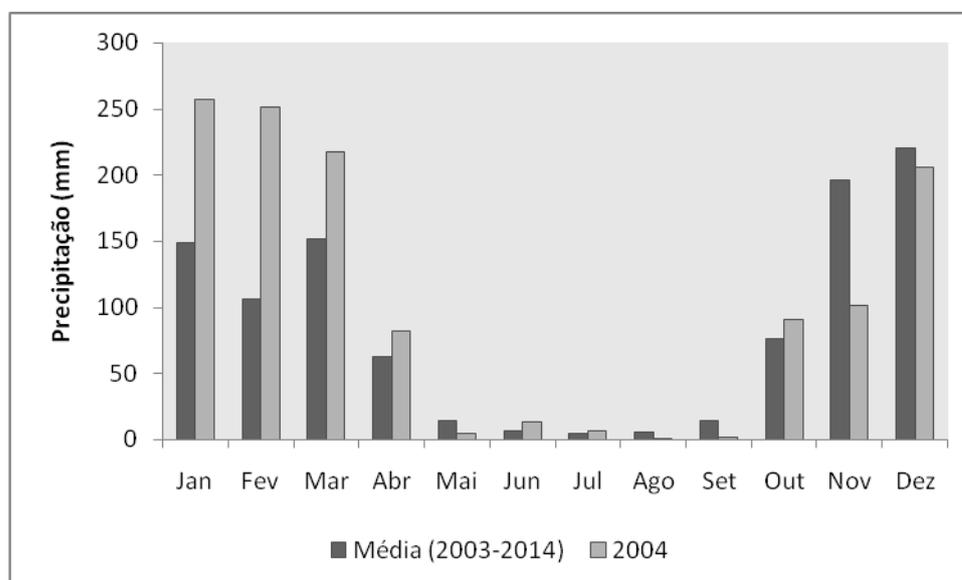


Figura A. 6: Distribuição da precipitação do ano de 2004 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais. Fonte: Dados do satélite TRMM.

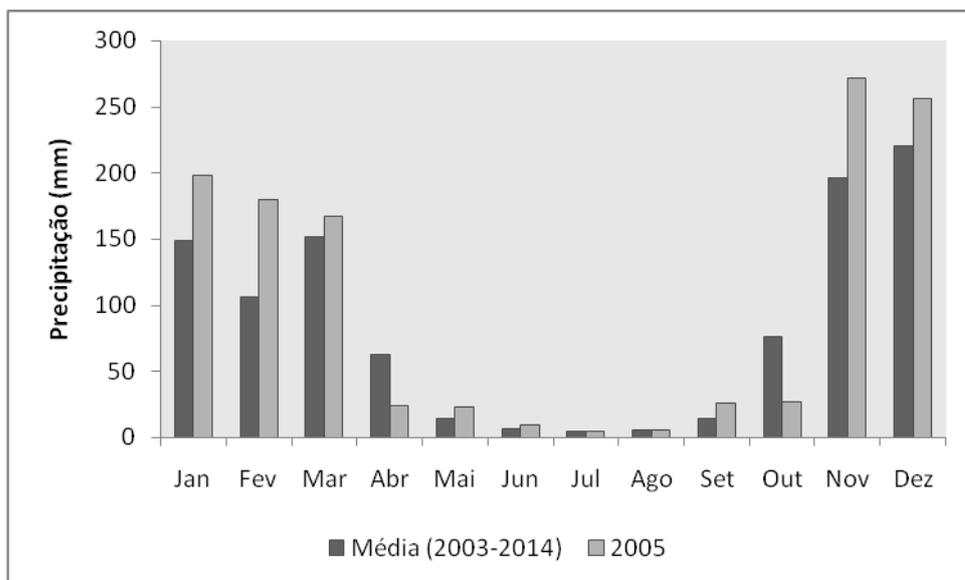


Figura A. 7: Distribuição da precipitação do ano de 2005 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais. Fonte: Dados do satélite TRMM.

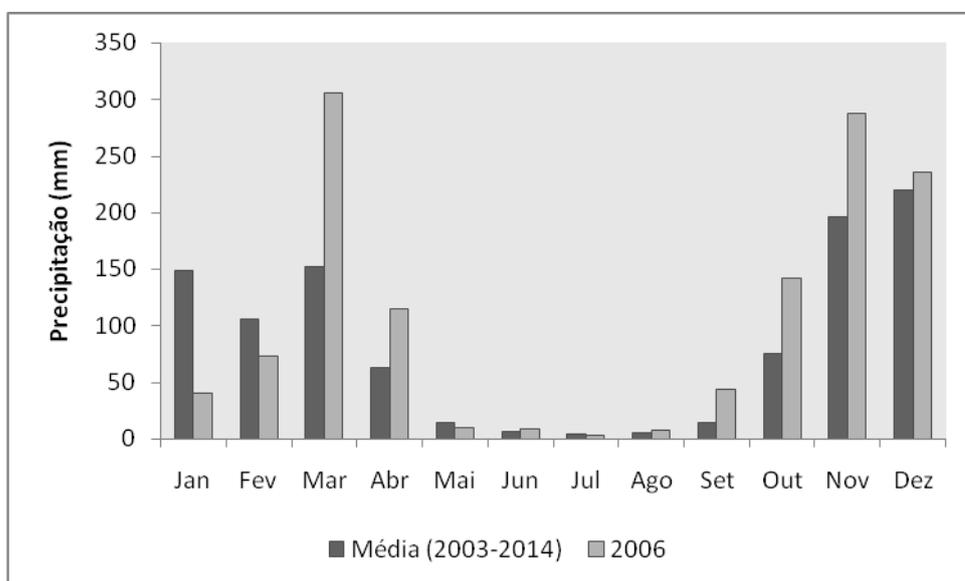


Figura A. 8: Distribuição da precipitação do ano de 2006 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais. Fonte: Dados do satélite TRMM.

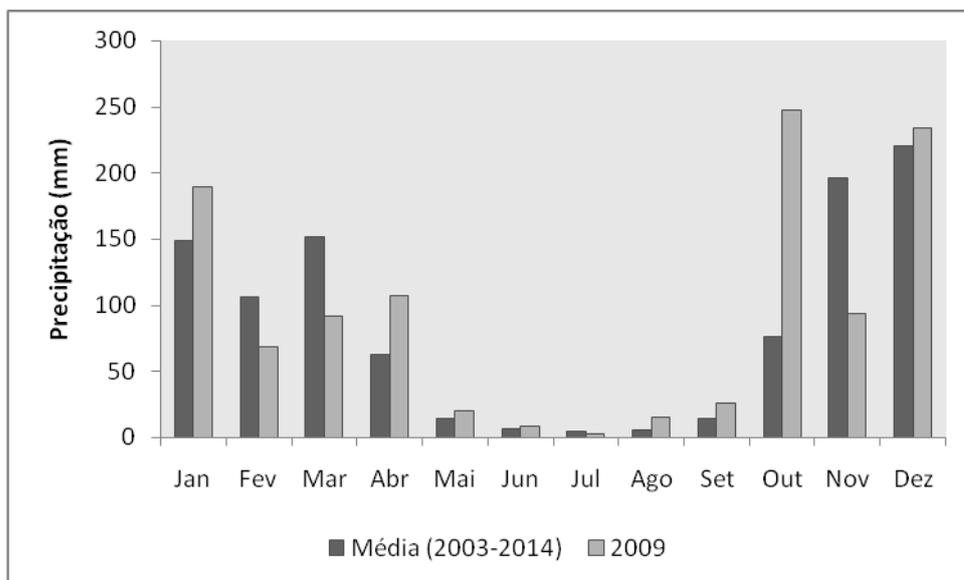


Figura A. 9: Distribuição da precipitação do ano de 2009 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais. Fonte: Dados do satélite TRMM.

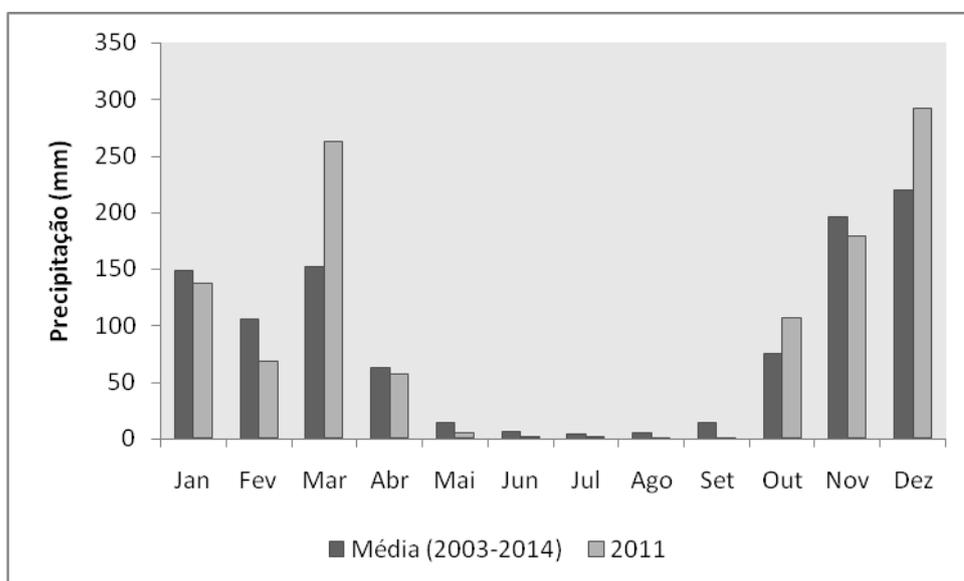


Figura A. 10: Distribuição da precipitação do ano de 2011 e a precipitação média do período de 2003 a 2014, no norte de Minas Gerais. Fonte: Dados do satélite TRMM.