



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

ELVIS RICARDO FIGUEIRA BRANCO

**OCORRÊNCIAS DE SECA E TENDÊNCIAS DA VEGETAÇÃO NA RESERVA
BIOLÓGICA DE SOORETAMA E ZONA DE AMORTECIMENTO, NO ESTADO DO
ESPÍRITO SANTO, BRASIL**

JERÔNIMO MONTEIRO - ES

2016

ELVIS RICARDO FIGUEIRA BRANCO

**OCORRÊNCIAS DE SECA E TENDÊNCIAS DA VEGETAÇÃO NA RESERVA
BIOLÓGICA DE SOORETAMA E ZONA DE AMORTECIMENTO, NO ESTADO DO
ESPÍRITO SANTO, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais, na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane

JERÔNIMO MONTEIRO - ES

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Branco, Elvis Ricardo Figueira, 1989

B816o Ocorrências de seca e tendências da vegetação na Reserva Biológica de Sooretama e zona de amortecimento, no estado do Espírito Santo, Brasil/ Elvis Ricardo Figueira Branco. – 2016.

97f. : il.

Orientador: Alexandre Rosa dos Santos.

Coorientador: José Eduardo Macedo Pezzopane.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Secas – Ocorrências. 2. Vegetação – Tendências. 3. Imagens MODIS. 4. Sensoriamento remoto. 5. Variação climática. 6. Variáveis meteorológicas. I. Santos, Alexandre Rosa dos. II. Pezzopane, José Eduardo Macedo. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. IV. Título.

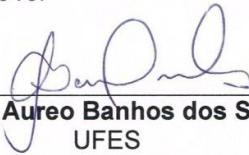
CDU: 630

**OCORRÊNCIAS DE SECA E TENDÊNCIAS DA VEGETAÇÃO NA RESERVA
BIOLÓGICA DE SOORETAMA E ZONA DE AMORTECIMENTO, NO
ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, BRASIL**

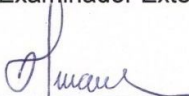
Elvis Ricardo Figueira Branco

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 08 de julho de 2016.



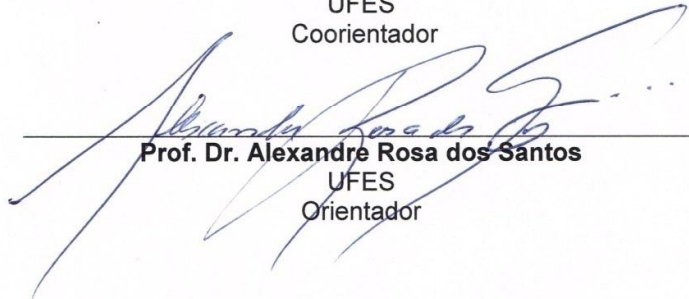
Prof. Dr. Aureo Banhos dos Santos
UFES
Examinador Externo



Prof. Dr. Rodrigo Sobreira Alexandre
UFES
Examinador Interno



Prof. Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane
UFES
Coorientador



Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos
UFES
Orientador

AGRADECIMENTOS

AGRADEÇO:

- Em primeiro lugar a Deus pelo presente da vida e por todas as bênçãos a mim concedidas;
- A toda minha família, em especial, à minha mãe Ranielce Janne Alves Figueira e meu pai Edison Araújo Branco pelo seu amor incondicional, que jamais mediram esforços para me oferecer condições para estudar;
- Aos meus irmãos Everon Richardson Figueira Branco e Elbia Ramayanni Figueira Branco pelo apoio e incentivo e por serem pessoas muito especiais na minha vida;
- À Vanessa Pimentel Bernardes por todo apoio, carinho, afeto e companherismo ao longo dessa trajetória;
- Ao meu orientador Alexandre Rosa dos Santos, pela amizade, atenção e conhecimentos compartilhados, por ser uma pessoa de grande coração e que nunca mediu esforços para ajudar seu próximo;
- À equipe de pesquisa Geotechnology Applied to Global Environment (GAGEN), pela amizade, companherismo e experiências compartilhadas; em especial a Rosane pela parceria nos estudos;
- Aos amigos do laboratório de Geoprocessamento e modelagem hidrológica Tamires, Carlos, Natália, Ana Paula, Giselle, Marques, Stefânia, Sueliane e Regiane, pelos bons momentos compartilhados e apoio durante o tempo de mestrado;
- Ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade do Federal do Espírito Santo, pela oportunidade de cursar o mestrado e à CAPES pela concessão da bolsa no período da pós-graduação.
- Aos membros da banca examinadora, Áureo Banhos dos Santos e Rodrigo Sobreira Alexandre, pelas valiosas contribuições.

“A persistência é o menor caminho do êxito” (Charles Chaplin) e “todas as vitórias ocultam uma abdicação” (Simone de Beauvoir).

RESUMO GERAL

BRANCO, Elvis Ricardo Figueira. **Ocorrências de seca e tendências da vegetação na Reserva Biológica de Sooretama e zona de amortecimento, no estado do Espírito Santo, Brasil.** 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos. Coorientador: Prof. Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane.

A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto em séries temporais têm se tornado uma forte ferramenta que vem se destacando na comunidade científica por permitir uma avaliação rápida e de baixo custo, dentro de uma margem de precisão. Nesse sentido, o registro frequente de imagens por sensores orbitais cobrindo grandes áreas da superfície terrestre permite a construção e a análise de séries temporais de dados de vegetação de diferentes fisionomias, auxiliando no estudo da dinâmica da vegetação e na disposição espacial de eventos de seca de intensidades distintas. Objetivou-se com este trabalho analisar ocorrências de seca e tendências espaço-temporal da vegetação e relacioná-las com a variação climática no período de 2007 a 2015 na Reserva Biológica de Sooretama e zona de amortecimento. Para isso foram utilizadas imagens NDVI, EVI e TST do sensor MODIS e para a análise espaço-temporal de secas, foi utilizado o Índice de Condição da Vegetação (ICV). Foi calculada a correlação de Pearson entre os valores médios dos índices de vegetação e as variáveis climáticas de modo a definir o índice mais adequado para a área de estudo e posterior emprego no índice de seca. As imagens e gráficos de ocorrência de seca na sua classe mais crítica (severa e extrema) foram comparadas com o acumulado de precipitação pluvial, deficiência hídrica e suas anomalias para cada estação do ano. Além disso, foram obtidos os valores máximos, médios e mínimos de ICV e relacionados com os valores máximos, médios e mínimos de TST por meio da análise gráfica e de regressão. Posteriormente, foram calculadas as anomalias de TST e cruzadas com as estações do ano que apresentaram maiores extensões de seca de maior severidade. Em relação às análises das tendências interanuais das séries temporais de índices de vegetação, estas foram realizadas por meio das metodologias de tendência monotônica de Mann-Kendal e análises de tendências sazonais. As imagens foram importadas, em formato .img para o software TerrSet, no qual foi utilizado o módulo *Earth Trends Modeler* (ETM) para processamento e análise das tendências de comportamento dos índices de vegetação. Foi criado um arquivo de série temporal para cada grupo de imagens, NDVI, EVI, na qual cada série consiste em um par de arquivos: Um arquivo de varredura contendo as imagens da série de tempo, em formato .rgf e um arquivo de documentação que descreve as características temporais da série, em formato .tsf. Os resultados indicaram que o índice EVI do sensor MODIS apresentou maiores correlações significativas com as variáveis meteorológicas e grande potencial para análises de ocorrências de seca para regiões com alta densidade de biomassa como florestas nativas. Os anos de 2007, 2013 e 2015 ocorreram secas de ordem severa e extrema em maiores extensões em relação às demais anos do período analisado. O Índice ICV apresentou-se adequado para monitoramento de ocorrências de seca na área de estudo, com concordância temporal e espacial com variáveis ambientais e ocorrências de El Niño. Ao longo do período analisado, constatou-se que ocorreu diminuição da biomassa vegetal, observada em ambos os índices de vegetação, por meio das tendências negativas observadas nas séries temporais de imagens, sendo mais evidenciado no EVI. As áreas de floresta natural foram as que apresentaram

maior diminuição do vigor vegetativo observado nas imagens de significância. Os valores de média anual de EVI e NDVI e sua diminuição ao longo dos anos apresentaram concordância com o decréscimo da precipitação e aumento da deficiência hídrica. Os dados obtidos a partir do sensor MODIS, NDVI, EVI e TST, mostraram-se adequados para a análise espaço-temporal de ocorrências de seca e de tendências na vegetação da área de estudo.

Palavras-chave: imagens modis; secas; tendências; variáveis meteorológicas

GENERAL ABSTRACT

BRANCO, Elvis Ricardo Figueira. **Drought occurrences and vegetation trends in the Sooretama Biological Reserve and damping zone, in Espírito Santo state, Brazil.** 2016. Dissertation (Master in Forest Science) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Prof. D.r Alexandre Rosa dos Santos. Co-adviser: Prof. D.r José Eduardo Macedo Pezzopane.

The application of remote sensing techniques in time series have become a strong tool that have been highlighted in the scientific community by allow rapid and low-cost evaluation, within an accuracy margin. Thus, the frequent recording of images by satellite sensors covering large areas of the Earth surface allows the construction and analysis of time series of vegetation data of different physiognomy, assisting in the dynamic study of vegetation and the spatial arrangement of different intensities drought event. The current study aimed to analyze drought occurrences and time-spatial trends in vegetation and to link them to climate change from 2007 to 2015 in the Sooretama biological reserve and surroundings. For this, were used NDVI, EVI and LST images of MODIS sensor to time-spatial analysis of droughts, was used the Vegetation Condition Index (VCI). Was calculated the Pearson's correlation between the mean values of vegetation index and climate variables in order to determine the most appropriate index for the study area and subsequent employment in the drought index VCI, used for monitoring drought. The drought occurrence images and graphics in severe and extreme classes were compared with the rainfall accumulated and its anomaly and water deficit accumulated and the anomaly for each season. In addition, was obtained the average, maximum and minimum values of VCI and related to the average, maximum and minimum values of LST through graphical analysis and regression. Then, was calculated the LST anomaly and crossed with the seasons that had higher drought extensions of greater severity. The analysis of the inter-annual trends of the time series of vegetation indexes were made through Mann-Kendal monotonic trend and seasonal trends analysis methodologies. The images were imported in .img format of TerrSet software, in wich was used the Earth Trends modeler module (ETM) for the trends analysis and processing of the behavior of vegetation indexes. It was created a time series file for each group of images, NDVI, EVI, in which each series consists of a pair of files: A scan file containing the time series images, in .rgf format and a documentation file that describes the temporal characteristics of the series in .tsf format. The results indicates that the EVI index of MODIS sensor showed higher significant correlations with the meteorological variables and great potential for drought occurrences analysis to regions with high density of biomass as native forests. In the years 2007, 2013 and 2015 occurred extreme and severe order drought in larger extensions compared to the other years. The VCI Index its presented suitable for drought occurrences monitoring in the study area, with temporal and spatial concordance with environmental variables and occurrences of El Niño. Over the period analyzed, it was found that there where a decrease of biomass observed in both vegetation indexes through of the negative trends observed in images time series, being more evident in the EVI. The natural forest areas showed the greatest decrease in vegetative vigor observed in the significance images. The annual average values of EVI and NDVI

and its decrease over the years showed agreement with the rainfall decreasing and water stress increasing. The data obtained from the MODIS sensor, NDVI, EVI and LST, proved suitable to temporal-spatio analysis of drought occurrences and vegetation trends of the study area.

Keywords: modis images; drought; trends; meteorological variables

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Localização da Reserva Biológica de Sooretama e sua zona de amortecimento, ES.....	29
Figura 1.2 - Grade de referência das imagens do sensor MODIS com destaque para a cena utilizada no estudo.....	32
Figura 1.3 - Fluxograma com resumo das etapas metodológicas da pesquisa.....	39
Figura 1.4 - Variação temporal da média de temperatura, radiação solar (a), umidade relativa, acumulado de evapotranspiração potencial (b), precipitação pluvial, deficiência hídrica (c), NDVI e EVI (d) para períodos de 16 dias nos anos de 2007 a 2015.	40
Figura 1.5 - Índice de Condição da Vegetação por estação do ano com espacialização de ocorrências de seca, calculado com índice EVI do produto MOD13Q11 do sensor MODIS para o período de 2007 a 2015.....	45
Figura 1.6 - Dimensões em km ² das extensões de seca severa e extrema para as estações do ano verão (a), outono (b), inverno (c) e primavera (d) de 2007 a 2015 e acumulados de precipitação pluvial e deficiência hídrica por estação.	47
Figura 1.7 - Variação temporal e regressões lineares entre o Índice de Condição da Vegetação (ICV) máximo, médio e mínimo e a Temperatura da Superfície da Terra (TST) máxima, média e mínima.	51
Figura 1.8 - Relação espacial de ocorrências de seca nas estações do ano que apresentaram os maiores graus de severidade (severa e extrema) em maiores extensões com anomalias de Temperatura da Superfície da Terra.....	53
Figura 1.9 - Limiares do índice Niño Oceânico para os anos de 2007 a 2015 (análises trimestrais). Valores negativos e menores que -0,4 indicam eventos de La Niña e positivos acima de 0,4 indicam El Niño. Valores intermediários indicam neutralidade.....	56
Figura 2.1 - Localização da Reserva Biológica de Sooretama e sua zona de amortecimento, ES.....	71
Figura 2.2 - Fluxograma com resumo das etapas metodológicas da pesquisa.....	77
Figura 2.3 – Estimação do coeficiente tau de Mann-Kendall obtida a partir da tendência monotônica aplicada nas séries de EVI (a) e NDVI (b).....	78
Figura 2.4 - Significância de Mann-Kendall para as tendências dos índices de vegetação EVI (a) e NDVI (b).....	80
Figura 2.5 - Porcentagem das áreas que apresentaram tendências negativas, positivas, significativas e não significativas na Reserva Biológica de Sooretama e zona de amortecimento.....	81
Figura 2.6 - Uso da terra da área de estudo.....	81
Figura 2.7 - Perfis espectrais temporais dos valores máximos, médios e mínimos de EVI e NDVI para o período de 2007 a 2015.....	82

Figura 2.8 – Correlação espaço-temporal entre as séries de imagens EVI (a) e NDVI (b) com TST.	83
Figura 2.9 - Composições RGB nas amplitudes e fases resultantes da análise de tendência sazonal dos valores de EVI para o período de 2007 a 2015.	85
Figura 2.10 - Composições RGB nas amplitudes e fases resultantes da análise de tendência sazonal dos valores de NDVI para o período de 2007 a 2015.....	85
Figura 2.11 - Curvas sazonais de tendências derivadas das séries de EVI e NDVI para os anos de 2007 a 2008 (verde) e 2014 a 2015 (vermelho); média anual em cada ano da série temporal e a sua tendência (em vermelho), calculados para os índices de EVI e NDVI para a área de estudo.....	87
Figura 2.12 - Tendências temporais para as variáveis meteorológicas temperatura, precipitação pluvial e deficiência hídrica no período de 2007 a 2015.	88
Figura 2.13 - Correlação entre os índices NDVI e EVI com as variáveis meteorológicas temperatura, precipitação pluvial e deficiência hídrica.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resposta da vegetação à variação climática em diferentes níveis de defasagem.....	34
Tabela 2 - Estações do ano e dias julianos do início da composição das imagens EVI do sensor MODIS com as respectivas datas para o período de dezembro de 2006 a janeiro de 2015.....	36
Tabela 3 - Intervalos de classes dos valores do Índice de Condição da Vegetação (ICV) e sua correspondente cassificação.....	37
Tabela 4 - Correlação entre os valores médios de NDVI e as variáveis meteorológicas para o período de 2007 a 2015 com 16, 32, 48, 64 e 80 dias de defasagem por meio do coeficiente de correlação de Pearson (r).....	42
Tabela 5 - Correlação entre os valores médios de EVI e as variáveis climáticas para o período de 2007 a 2015 com 16, 32, 48, 64 e 80 dias de defasagem por meio do coeficiente de correlação de Pearson (r).....	42
Tabela 6 – Dimensões em km ² e porcentagem das classes de seca do Índice de Condição da Vegetação para cada estação do ano no período de 2007 a 2015.....	46
Tabela 7 – Anomalias de precipitação pluvial acumulada por estação do ano para o período de 2007 a 2015.	48
Tabela 8 – Anomalias de deficiência hídrica acumulada por estação do ano para o período de 2007 a 2015.	49
Tabela 9 – Períodos de ocorrência dos fenômenos climáticos El Niño e La Niña.....	55

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DH	Deficiência Hídrica
EOSDIS	Earth Observing System Data and Information System
ETM	Earth Trends Modeler
Eto	Evapotranspiração Potencial
EVI	Enhanced Vegetation Index
HDF	Hierarchical Data Format
ICV	Índice de Condição da Vegetação
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LPDAAC	Land Processes Distributed Archive Center
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MRT	MODIS Reprojection Tools
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
P	Precipitação Pluvial
RGB	Red Green Blue
RS	Radiação Solar
STA	Seasonal Trend Analysis
TIFF	Tagged Image File Format
TST	Temperatura da Superfície da Terra
Tmédia	Temperatura média
UR	Umidade Relativa
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS	World Geodetic System

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	17
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	20
CAPÍTULO I: ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE OCORRÊNCIAS DE SECA NA RESERVA BIOLÓGICA DE SOORETAMA E ZONA DE AMORTECIMENTO, ES..	23
RESUMO.....	24
ABSTRACT.....	25
1. INTRODUÇÃO	26
2. MATERIAL E MÉTODOS	29
2.1. Área de estudo	29
2.2. Obtenção das imagens do sensor <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i> (MODIS).....	30
2.3. Processamento das imagens	32
2.4. Obtenção e processamento dos dados meteorológicos.....	33
2.5. Correlação entre os dados meteorológicos e os índices NDVI e EVI.....	34
2.6. Relação entre o índice de condição da vegetação com a temperatura da superfície da terra.	35
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
3.1. Correlação entre os índices de vegetação e a variação climática.....	40
3.2. Espacialização e classificação de ocorrências de seca	44
3.3. Relação entre ocorrências de seca e a Temperatura da Superfície da Terra. ...	50
4. CONCLUSÕES	58
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
CAPÍTULO II: ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE TENDÊNCIAS DA VEGETAÇÃO NA RESERVA BIOLÓGICA DE SOORETAMA E ZONA DE AMORTECIMENTO, ES.....	66

RESUMO.....	67
ABSTRACT.....	68
1. INTRODUÇÃO	69
2. MATERIAL E MÉTODOS	71
2.1. Área de estudo	71
2.2. Obtenção das imagens do sensor <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i> (MODIS).....	72
2.3. Processamento das imagens	72
2.4. Processamento e análise das tendências nas séries temporais	74
2.4.1. Tendência monotônica de Mann-Kendal	74
2.4.2. Análise de Tendência Sazonal (STA).....	75
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
3.1. Tendência monotônica de Mann-Kendal	78
3.2. Análise de tendência sazonal.....	84
4. CONCLUSÕES	91
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
6. CONCLUSÕES GERAIS	97

1. INTRODUÇÃO GERAL

A vegetação das diferentes regiões da terra, além de outros fatores, é uma expressão do clima nela prevalente, razão pela qual a distribuição global dos tipos climáticos e a distribuição dos biomas apresentam elevada correlação (PELL et al., 2007). As fases de crescimento, a quantidade de biomassa e a composição florística dos ecossistemas são exemplos de parâmetros influenciados pelas variações meteorológicas interanuais (ROERINK et al., 2003).

Em decorrência da variação climática na superfície da terra, surge o fenômeno que afeta diversas regiões em todo mundo, a seca. Em linhas gerais, a seca é uma deficiência de precipitação durante um período prolongado de tempo que resulta em escassez de água para algumas atividades, grupo ou setor ambiental, queda acentuada das reservas hídricas de superfície e de subsuperfície e altas temperaturas (HEIM JÚNIOR, 2002; KEYANTASH; DRACUP, 2002; CASTRO et al., 2003; NDMC, 2006; LEIVAS et al., 2014).

Considerando os impactos causados ao meio ambiente, em especial à vegetação, a ocorrência de seca diminui a disponibilidade de água no solo, fechamento dos estômatos, redução da transpiração e assimilação de carbono, e conseqüentemente pela não interrupção dos níveis elevados de irradiância que conduz à fotoinibição, ocorre a morte da planta nos casos mais críticos e extremos (MCDOWELL et al., 2008; ALLEN et al., 2010).

Nesse sentido, a ocorrência de seca no nível mais extremo afeta substancialmente a produtividade agrícola de uma região e a diminuição do vigor em florestas naturais, uma vez que o fenecimento ou murchamento das folhas do dossel florestal e diminuição do índice de área foliar são comportamentos comuns da vegetação em resposta a diminuição da disponibilidade hídrica promovida por períodos de seca (XAVIER et al., 2002; ZANCHI et al., 2009).

Assim, nos períodos de secas extremas, as florestas tornam-se inflamáveis à ocorrência de incêndios florestais, aumentando seu grau de vulnerabilidade, uma vez que devido à redução acentuada da umidade do solo combinada com escassez de chuvas e aos processos fisiológicos do componente arbóreo, ocorre a abscisão de folha, aumento da penetração de radiação no dossel, causando elevação da temperatura próxima ao solo e da taxa de ressecamento do material vegetal, um dos melhores indicadores de inflamabilidade florestal (UHL; KAUFFMANN, 1990; HOFFMANN, 2003; NEPSTAD et al., 2007; PHILLIPS et al., 2009).

Nesse sentido, torna-se importante entender a dinâmica dos eventos de seca, desde seu início, sua intensificação, término e extensão. Desta forma, seria possível propor estratégias de planejamento que visam à mitigação dos impactos negativos da seca na produção agrícola e na conservação dos recursos florestais, uma vez que diferentes espécies possuem respostas distintas ao estresse hídrico (CHAVES et al., 2003; ALLEN et al., 2010).

A quantificação de impactos, mitigação e prevenção de desastres são tarefas mais difíceis para a seca do que para outros riscos naturais uma vez que os impactos podem afetar a economia de uma região e o meio ambiente por meses, anos e até décadas. Estas características de seca têm dificultado o desenvolvimento de estimativas precisas e confiáveis de gravidade e impactos e, finalmente, a formulação de planos de preparação e políticas relacionadas a seca (WILHITE et al., 2014).

Segundo Whilite et al. (2014), é difícil para os gestores públicos a atribuição de lidar com os impactos de secas, uma vez que esse evento muitas vezes têm grande cobertura espacial em comparação com inundações, tempestades tropicais, terremotos e outros desastres naturais e os impactos variam de acordo com a magnitude dentro da área afetada devido às diferentes vulnerabilidades do sistema econômico, social e ambiental.

Além de estudos relacionados à ocorrências de seca e seus impactos na produtividade da vegetação, a detecção e caracterização de tendências na condição da vegetação, e sua relação com o clima, ao longo do tempo têm recebido considerável atenção nos últimos anos (BAI et al., 2008; VERBESSELT et al., 2010; JONG et al., 2011; EASTMAN et al., 2013).

Dado o ciclo anual de entrada de energia solar, fenômenos ambientais comumente exibem ciclos sazonais, incluindo temperatura do ar, precipitação e fenologia da planta. Há interesse substancial no acompanhamento desses padrões sazonais como meio de detecção de respostas da vegetação para a mudança global (SPARKS; MENZEL, 2002; EASTMAN et al., 2009; EASTMAN et al., 2013). Por exemplo, as tendências de aumento do vigor da vegetação na estação primavera podem refletir a uma resposta ao aumento da temperatura e precipitação (BUNN, 2006).

Diante do exposto, a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto em séries temporais tem se tornado uma forte ferramenta que vem se destacando na comunidade científica por permitir uma avaliação rápida e de baixo custo, dentro de

uma margem de precisão (ZHU; LIU, 2015). Nesse sentido, o registro frequente de imagens por sensores orbitais cobrindo grandes áreas da superfície terrestre permite a construção e a análise de séries temporais de dados de vegetação de diferentes fisionomias, auxiliando no estudo da dinâmica da vegetação e na disposição espacial de eventos de seca de intensidades distintas (MARTINEZ; GILABERT, 2009; FREITAS et al., 2011; WU et al., 2013; AGHAKOUCHAK et al., 2015).

Os dados de sensoriamento remoto têm sido aplicados em diversos estudos ambientais como monitoramento de ecossistemas florestais. Dentre os inúmeros ecossistemas florestais existentes no Brasil, destacam-se as unidades de conservação de proteção integral. Dentre elas tem-se a Reserva Biológica de Sooretama criada em 1982, através do Decreto nº 87.588 (FERREIRA, 1981; IBAMA, 2007). Sua zona de amortecimento foi estabelecida apenas recentemente pela portaria de nº 32 de 27 de maio de 2015 do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio).

Com base no contexto, o presente estudo foi dividido em dois capítulos, sendo o primeiro com o objetivo de avaliar e monitorar a ocorrências de seca na Reserva Biológica de Sooretama e zona de amortecimento por meio do Índice de Condição da Vegetação (ICV) em um período de nove anos. No segundo capítulo foram analisadas tendências temporais nos padrões de mudanças da vegetação com os índices NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*), por meio dos métodos de tendência monotônica de Mann-Kendall e Análise de Tendência Sazonal, na Reserva Biológica de Sooretama e zona de amortecimento para o período de nove anos.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALLEN C. D; MACALADY, A. K.; CHENCHOUNI, H.; BACHELET, D.; MCDOWELL, N.; VENNETIER, M.; KITZBERGER, T.; RIGLING, A.; BRESHEARS, D. D.; HOGG, E. H.; GONZALEZ, P.; FENSHAM, R.; ZHANG, Z.; CASTRO, J.; DEMIDOVA, N.; LIM, J. H.; ALLARD, G.; RUNNING, S. W.; SEMERCI, A.; COBB, N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 660-684, 2010.

BAI, Z. G.; DENT, D. L.; OLSSON, L.; SCHAEPMAN, M. E. Proxyglobal assessment of land degradation. **Soil Use Management**, v. 24, p. 223–234, 2008.

BUNN, A. G.; GOETZ, S. J. Trends in satellite-observed circumpolar photosynthetic activity from 1982 to 2003: the influence of seasonality, cover type, and vegetation density. **Earth Interactions**, v. 10, p. 1-19, 2006.

CASTRO, A. L. C.; CALHEIROS, L. B.; CUNHA, M. I. R.; BRINGEL, M. L. N. C. Manual de desastres: desastres naturais. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2003. 174p. Disponível em:<<http://www.defesacivil.mg.gov.br/conteudo/arquivos/manuais/Manuais-de-Defesa-Civil/Manual-Desastres-Naturas-Vol-1.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2015.

CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought-from genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**, v. 30, p. 239-264, 2003.

EASTMAN, J. R.; SANGERMANO, F.; GHIMIRE, B.; ZHU, H.; CHEN, H.; NEETI, N.; CAO, Y.; CREMA, S. Seasonal Trend Analysis of Image Time Series. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 10, p. 2721-2726, 2009.

EASTMAN, J. R.; SANGERMANO, F.; MACHADO, E. A.; ROGAN, J.; ANYAMBA, A. Global trends in seasonality of normalized difference vegetation index (NDVI), 1982–2011. **Remote Sensing**, v. 5, p. 4799-4818, 2013.

FERREIRA, L. M.; BORGES, G. C.; ROCHA, S. B. Plano de manejo – Reserva Biológica de Sooretama. IBDF/FBCN, 1981, 115p.

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 EVI 2 data set over South America. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, v. 2, p. 57-68, 2011.

HEIM JÚNIOR, R. R. J. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, p. 1149-1165, 2002.

HOFFMANN, W. A.; SCHROEDER, W.; JACKSON, R. B. Regional feedbacks among fire, climate, and tropical deforestation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.108, p. 4721, 2003.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis. **Plano operativo de prevenção e combate aos incêndios florestais da Reserva Biológica de Sooretama**. Relatório técnico. 2007. Disponível em:<<http://www.ibama.gov.br/documentos/planos-operativos-em-ucs-federais> >. Acesso em: 10 de mai. 2016.

JONG, R.; BRUIN, S.; WIT, A.; SCHAEPMAN, M. E.; DENT, D. L. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 2, p. 692-702, 2011.

KEYANTASH, J.; DRACUP, J. A. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, p. 1167-1180, 2002.

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.

MARTINEZ, B.; GILABERT, M. A. Vegetation dynamics from time series using the wavelet transform. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 1829-1842, 2009.

MCDOWELL, N.; POCKMAN, W. T.; ALLEN, C. D.; BRESHEARS, D. D.; COBB, N.; KOLB, T.; PLAUT, J.; SPERRY, J.; WEST, A.; WILLIAN, D. G.; YEPEZ, E. A. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? **New Phytologist**, v. 178, p. 719-739, 2008.

NATIONAL DROUGHT MITIGATION CENTER - NDMC. **What is drought?**.University of Nebraska - Lincoln. Disponível em:<<http://drought.unl.edu>>. Acesso em: 05 mai. 2016.

NEPSTAD, D. C.; TOHVER, I. M.; RAY, D.; MOUTINHO, P.; CARDINOT, G. Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest. **Ecology**, v. 88, p. 2259-2269, 2007.

PELL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Update world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633-1644, 2007.

PHILLIPS, O. L.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LEWIS, S. L.; FISHER, J. B.; LLOYD, J.; GONZÁLEZ, G. L.; MALHI, Y.; MONTEAGUDO, A.; PEACOCK, J.; QUESADA, C. A.; VAN DER HEIJDEN, G. ALMEIDA, S.; AMARAL, I.; ARROYO, L.; AYMARD, G.; BAKER, T. R. ; BÁNKI, O.; BLANC, L.; BONAL, D.; BRANDO, P.; CHAVE, J.; OLIVEIRA, A. C.; CARDOZO, N. D.; CZIMCZIK, C. L.; FELDPAUSCH, T. R.; FREITAS, M. A.; GLOOR, E.; HIGUCHI, N.; JIMÉNEZ, E.; LLOYD, G.; MEIR, P.; MENDOZA, C.; MOREL, A.; NEILL, D. A.; NEPSTAD, D.; PATIÑO, S.; PEÑUELA, M.

C.; PRIETO, A.; RAMÍREZ, R. SCHWARZ, M.; SILVA, J. SILVEIRA, M.; THOMAS, A. S.; TER STEEGE, H.; STROPP, J.; VÁSQUEZ, R.; ZELAZOWSKI, P.; DÁVILA, E. A.; ANDELMAN, S.; ANDRADE, A.; CHAO, K. J.; ERWIN, T.; DI FIORE, A.; CORONADO, E. N. H.; KEELING, H.; KILLEEN, T. J.; LAURANCE, W, F.; CRUZ, A. P.; PITMAN, N. C.; VARGAS, P. N.; RAMÍREZ-ANGULO, H.; RUDAS, A.; SALAMÃO, R.; SILVA, N.; TERBORGH, J.; TORRES-LEZAMA, A. Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. **Science**, v. 323, p. 1344-1347, 2009.

ROERINK, G. J.; MENENTI, M.; SOEPBOER, W.; SU, Z. Assessment of climate impact on vegetation dynamics by using remote sensing. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 28, p. 103-109, 2003.

SPARKS, T. H.; MENZEL, A. Observed changes in seasons: an overview. **International Journal of Climatology**, v. 22, p. 1715–1725, 2002.

UHL, C.; KAUFFMAN, J. B. Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern Amazon. **Ecology**, v.71, p. 437-449, 1990.

VERBESSELT, J.; HYNDMAN, R.; NEWNHAM, G.; CULVENOR, D. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 106-115, 2010.

WHILITE, D. A.; SIVAKUMAR, M. V. K.; PULWARTY, R. Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, p. 4-13, 2014.

WU, J.; ZHOU, L.; LIU, M.; ZHANG, J.; LENG, S.; DIAO, C. Establishing and assessing the Integrated Surface Drought Index (ISDI) for agricultural drought monitoring in mid-eastern China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 23, p. 397-410, 2013.

XAVIER, A. C.; SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, v. 26, n. 4, p. 421-427, 2002.

ZANCHI, F. B.; WATERLOO, M. J.; ROCHA, H. R.; AGUIAR, L. J. G.; RANDOW, C. Von; KRUIJT, B.; CARDOSO, F. L.; MANZI, A. O. Estimativa do índice de área foliar (IAF) e biomassa em pastagem no estado de Rondônia, Brasil. **Acta Amazônica**, v. 39, n. 2, p. 335-348, 2009

ZHU, X.; LIU, D. L. Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 112, p. 222-231, 2015.

CAPÍTULO I

ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE OCORRÊNCIAS DE SECA NA RESERVA BIOLÓGICA DE SOORETAMA E ZONA DE AMORTECIMENTO, ES

ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE OCORRÊNCIAS DE SECA NA RESERVA BIOLÓGICA DE SOORETAMA E ZONA DE AMORTECIMENTO, ES

RESUMO

O sensoriamento remoto tem se tornado uma importante fonte de monitoramento de secas, a partir do uso de índices de seca baseado em imagens orbitais. O presente estudo teve como objetivo monitorar e avaliar as ocorrências de seca na reserva biológica de Sooretama e entorno por meio do índice de seca de condição da vegetação (ICV). Foram utilizadas imagens de NDVI e EVI do produto MOD13Q1 e imagens de temperatura da superfície da terra do produto MOD11A2 do sensor MODIS. As variáveis meteorológicas utilizadas foram: temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar global, precipitação pluvial e evapotranspiração potencial que foi calculada, a partir de outras variáveis climáticas obtidas, pelo método Penman-Monteith. De posse dos dados diários de precipitação pluvial, evapotranspiração potencial, deficiência hídrica diária para o mesmo período, foi calculada a correlação entre os valores médios dos índices de vegetação e as variáveis climáticas de modo a definir o índice mais adequado para a área de estudo. Para monitoramento de secas foi utilizado o índice de seca ICV. Para reforçar os resultados apresentados pelo ICV, foram gerados gráficos por estação do ano apresentando a área das classes de ocorrência de secas moderada a extrema, pois foram consideradas como os níveis mais críticos de seca, na qual a vegetação é fortemente afetada. Essas informações foram comparadas com o acumulado de precipitação pluvial e sua anomalia e de deficiência hídrica e sua anomalia para cada estação do ano. Além disso, foram obtidos os valores médios, máximos e mínimos de ICV e relacionados com os valores médios, máximos e mínimos de Temperatura da Superfície da Terra (TST) por meio da análise gráfica e de regressão. Posteriormente, foram calculados anomalia de TST e cruzados com as estações do ano que apresentaram maiores extensões de seca de maior severidade. O índice de vegetação EVI apresentou maiores correlações significativas com as variáveis meteorológicas e grande potencial para análises de ocorrências de seca para regiões com alta densidade de biomassa como florestas nativas. De acordo com as imagens de ICV, é possível observar que os anos de 2008, 2009, 2010, 2011 e 2012 ocorreram secas de intensidades severas ou extremas (estágios mais críticos de seca) em pequenas dimensões, indicando que grande parte da vegetação não sofreu com o estresse hídrico e térmico de grande intensidade, uma vez que a vegetação na maior parte desses anos apresenta-se com vigor vegetativo alto. Por outro lado, os anos de 2007, 2013 e 2015 apresentaram maiores extensões de seca severa e extrema. O ICV apresentou-se adequado para o monitoramento de ocorrências de seca na área de estudo, apresentando concordância temporal e espacial com variáveis climáticas e ocorrências de El Niño.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; seca; clima

SPACE-TIME ANALYSIS OF DROUGHT OCCURRENCE IN SOORETAMA BIOLOGICAL RESERVE AND DAMPING ZONE, ES

ABSTRACT

The remote sensing has become an important source of monitoring droughts, from the use of drought indices based on satellite images. This study aimed to monitor and evaluate the drought occurrences in biological reserve Sooretama and surroundings through the drought index of vegetation condition (ICV). Were used NDVI and EVI images of MOD13Q1 product and land surface temperature of the MOD11A2 product of MODIS sensor. The meteorological variables used were: air temperature, relative humidity, solar radiation, rainfall and potential evapotranspiration which was calculated by the Penman-Monteith method. From the daily data of rainfall, potential evapotranspiration, water deficiency, was calculated the correlation between the mean values of vegetation index and the climate variables in order to determine the most suitable index for the study area. To drought monitoring was used the ICV drought index. To reinforce the results presented by ICV, graphs were generated by each season showing the area of drought occurrence class moderate and extreme, because were considered as the most critical levels of drought, in which the vegetation is strongly affected. This information was compared with the accumulated rainfall and its anomaly and water deficit and its anomaly for each season. In addition, was obtained the average, maximum and minimum values of ICV and related to the average, maximum and minimum values of Land Surface Temperature (LST) through graphical analysis and regression. Posteriorly, was calculated the LST anomaly and confronted with the seasons that had higher drought extensions of greater severity. The EVI vegetation index showed higher significant correlations with the meteorological variables and great potential for drought occurrences analysis to regions with high density of biomass as native forests. According to the ICV images, its possible to see that the years 2008, 2009, 2010, 2011 and 2012 occurred drought of intensities severe or extreme (critical stages of drought) in small areas, indicating that much of the vegetation did not suffer with water and temperature stress of great intensity, once the vegetation in most of these years it presents with high vegetative vigor. On the other hand, in 2007, 2013 and 2015 presented higher extensions of severe and extreme drought. The ICV Index its presented suitable for monitoring drought occurrences in the study area, with good correlation with land surface temperature and concordance with climate variability and El Niño occurrences.

Keywords: remote sensing; drought; climate

1. INTRODUÇÃO

A vegetação representa um importante indicador das condições ambientais e contribui para manter a biodiversidade de uma região por proteger o solo, reduzir o transporte de sedimentos e o assoreamento dos cursos de água, além de servir de habitat para animais silvestres (CALEGARI et al., 2010). No entanto, mudanças climáticas podem afetar significativamente a distribuição e dinâmica da vegetação, devido ao controle que o clima exerce sobre a atividade da vegetação global e a distribuição das espécies (PEARSON; DAWSON, 2003; PASHO et al., 2011).

Em decorrência da variação climática na superfície da terra, surge o fenômeno que afeta diversas regiões em todo mundo, a seca. Esse fenômeno meteorológico está relacionado com a redução das precipitações pluviométricas, queda acentuada das reservas hídricas de superfície e de subsuperfície, altas temperaturas e com consequências diretamente sobre a produtividade agropecuária, recursos hídricos, abastecimento urbano e a biomassa florestal (HEIM JÚNIOR, 2002; KEYANTASH; DRACUP, 2002; LEIVAS et al., 2014). Frente a este cenário ambiental faz-se necessário o uso de ferramentas que facilite o monitoramento do meio ambiente para propor medidas de prevenção, controle e adaptação.

Como resultados dos grandes impactos que a ocorrência de seca pode causar nos habitats naturais, ecossistemas, sistemas agrícolas, entre outros, muitas técnicas para o monitoramento de condições de seca têm sido desenvolvidas. Esse complexo fenômeno pode ser simplificado em um índice de seca, que é um número único que incorpora uma grande quantidade de dados de oferta e demanda de água (JI; PETERS, 2003).

Uma variedade de índices de seca tem sido desenvolvida (HEIM JÚNIOR, 2002), sendo que na sua maior parte são derivados de medidas baseadas em estações meteorológicas como temperatura e precipitação pluvial, tal como índice de severidade de seca de Palmer (PDSI), índice de anomalia de umidade (índice-Z) (PALMER, 1965), e índice de precipitação padronizado (SPI) (McKEE et al., 1993).

Em geral, esses índices podem efetivamente avaliar as condições de seca. No entanto, a falta de cobertura espacial contínua limita a capacidade de caracterizar e monitorizar o padrão ou a variação espacial de forma detalhada de seca e as condições em escala regional, especialmente em áreas com poucas estações meteorológicas (BROWN et al., 2008; ZHANG; JIA, 2013).

Nesse sentido, o sensoriamento remoto tem se tornado uma importante fonte para monitoramento de secas (ASNER; ALENCAR, 2010; RHEE et al., 2010; WU et al., 2013; LEIVAS et al., 2014; AGHAKOUCHAK et al., 2015), a partir do uso de índices de seca baseados em imagens orbitais. O Índice de Condição da Vegetação (ICV) é um índice de seca baseado em sensoriamento remoto que tem sido amplamente empregado na avaliação geográfica de secas, isto é, na detecção, espacialização, duração e caracterização de secas, o qual é obtido por meio da entrada dos índices de vegetação NDVI ou EVI (QUIRING; GANESH, 2010; DHORDE; PATEL, 2016).

A principal vantagem do ICV é que ele não requer dados de estações meteorológicas, diferente dos outros índices de seca, e como é baseado em dados de satélites, ele pode fornecer dados de seca em tempo real ao longo do globo em resolução espacial relativamente alta (QUIRING; PAPAKRYIAKOU, 2003). Diante disso, muitos estudos têm sido desenvolvidos utilizando esse índice na avaliação e monitoramento de secas, na sua maioria com uso do índice NDVI uma vez que as áreas de estudos em geral apresentam grandes dimensões sem a presença de grandes extensões de vegetação de alta densidade de biomassa como florestas nativas.

Segundo Gitelson et al. (1998), ao examinarem a relação entre a ocorrência de secas por meio do ICV e o crescimento de culturas em seis sítios em Kazakhstan, constataram-se que o ICV explicou em média 76% da variação da densidade da cultura (número de plantas por metro quadrado), apresentando performance consistente em todos os sítios analisados.

Ao compararem índices de seca baseados em dados de estações meteorológicas e derivados de satélites nas regiões de deserto na Mongólia, Bayarjargal et al. (2006) encontraram pouca concordância entre as áreas identificadas usando os dois diferentes métodos. Os autores concluíram que é difícil identificar índices de seca baseado em estações meteorológicas, uma vez que as observações podem não fornecer informações suficientes para validação dos índices de secas derivados de dados de satélites.

Ao analisar os impactos da seca sobre a vegetação em uma região do semi-árido da península ibérica usando Índice de Condição da Vegetação (ICV), Serrano (2007) demonstrou que a influência de secas sobre a vegetação, e, portanto a resposta do ICV, varia dependendo do mês, tipo de cobertura da terra e clima das regiões afetadas pela seca.

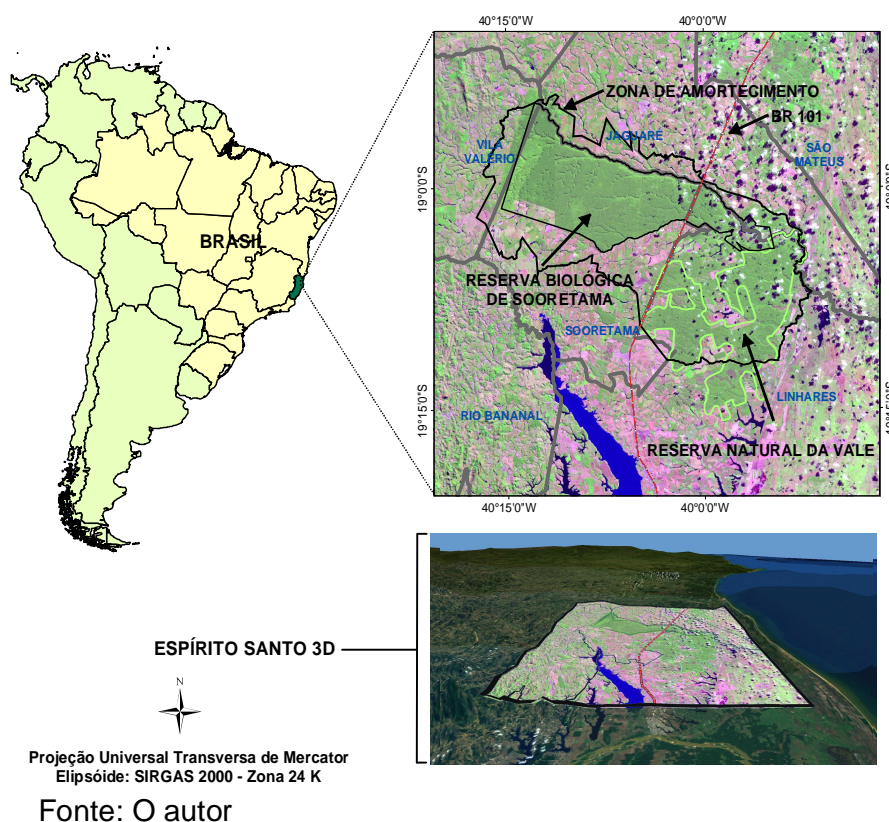
Diante do contexto, esse estudo teve como objetivo avaliar e monitorar a ocorrência de seca na Reserva Biológica de Sooretama e zona de amortecimento por meio do índice de seca ICSV, com auxílio do índice de vegetação mais adequado para análises de séries temporais de imagens para área de estudo (NDVI ou EVI), definido a partir da correlação com variáveis meteorológicas para o período de 2007 a 2015.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A pesquisa foi realizada na Reserva Biológica de Sooretama e sua zona de amortecimento localizada entre os paralelos $18^{\circ}53'53''$ e $19^{\circ}30'00''$ S e os meridianos $39^{\circ}50'00''$ e $40^{\circ}15'50''$ W, compreendendo os municípios de Sooretama, Jaguaré e Vila Valério ao norte do estado do Espírito Santo (Figura 1.1).

Figura 1.1 - Localização da Reserva Biológica de Sooretama e sua zona de amortecimento, ES.



De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Aw, isto é, tropical quente e úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno, com precipitação pluviométrica média anual de 1.390 mm, distribuída no período chuvoso de outubro a março, com médias de totais mensais variando entre 130 mm a pouco mais de 200 mm e com temperatura média anual de $24,88^{\circ}\text{C}$ (GARAY et al., 2003; ALMEIDA et al., 2008).

A Reserva Biológica de Sooretama é o resultado da união da Reserva Florestal Estadual de Barra Seca, criada em 1941, com o Parque de Refúgio de Animais Silvestres Sooretama. O objetivo de criação é o de preservar espécies da fauna local e remanescente de mata atlântica e, atualmente, possui um plano de manejo que foi elaborado em 1982 e atualizado em 1994, que norteia as ações para essa unidade de conservação.

2.2. Obtenção das imagens do sensor *moderate resolution imaging spectroradiometer* (MODIS)

Dentro dos diversos produtos disponíveis do sensor MODIS, foram utilizados os produtos MOD13Q1, NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*) com resolução temporal de 16 dias e espacial de 250m, e o MOD11A2 que contém imagens de temperatura da superfície da terra (TST) com resolução temporal de 8 dias e espacial de 1 km. Como os dados originais do produto MOD11A2 são fornecidos em Kelvin, foi necessário utilizar um fator de conversão para que os dados das imagens fossem reescalados para graus Celsius. Esses conjunto de dados MODIS são obtidos na versão V005 (HUETE et al., 2002), no formato HDF (*Hierarchy Data Format*), no qual cada imagem cobre uma área de 10 x 10 graus (1200 x 1200 km).

Segundo Huete et al. (2002), o NDVI é sensível a clorofila e fornece informações sobre a detecção de mudanças vegetais e parâmetros biofísicos do dossel. Esse índice foi proposto por Rouse et al. (1974) e consiste numa relação entre as medidas espectrais da banda do infra-vermelho próximo (800 - 1100 nm) e vermelho (600 - 700 nm), conforme a equação a seguir (Equação 1), variando de -1 a +1, sendo que quanto mais próximo de +1 maior a quantidade de biomassa e o vigor da vegetação.

$$NDVI = \frac{R_{IVP} + R_V}{R_{IVP} - R_V} \quad (\text{Eq.1})$$

Em que:

R_{IVP} – Reflectância na faixa do Infravermelho Próximo;

R_V – Reflectância na faixa do vermelho.

O EVI é outro índice amplamente empregado no estudo da vegetação. Este índice foi desenvolvido para melhorar a detecção do sinal da vegetação em regiões com maior densidade de biomassa, reduzindo problemas de saturação e a influência da interferência do solo e da atmosfera sobre a resposta do dossel (JUSTICE et al., 2002; PONZONI et al., 2012). Nesse sentido, o EVI é calculado por meio da equação a seguir (Equação 2) (JUSTICE et al., 1998).

$$EVI = \frac{G(R_{IVP} - R_V)}{(L + R_{IVP} + C1 \cdot R_V - C2 \cdot R_A)} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

R_{IVP} – reflectância na faixa espectral do Infravermelho Próximo;

R_V – reflectância na faixa espectral do vermelho;

R_A – reflectância na faixa espectral do azul;

L - fator de ajuste para o solo;

G - fator de ganho;

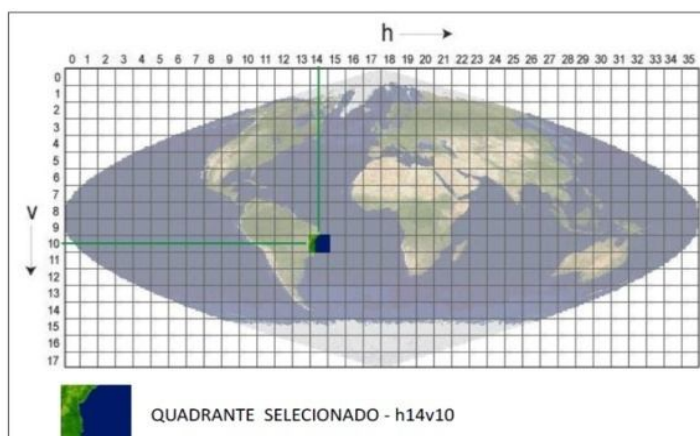
C1 e C2 - Coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera.

Os valores dos coeficientes adotados pelo algoritmo do EVI são L=1, C1=6, C2=7,5 e G=2,5 (HUETE et al., 1997; JUSTICE et al., 1998).

Mediante o exposto, os diferentes índices de vegetação possuem vantagens e desvantagens e é mais e menos adequado para determinados trabalhos. Nesse sentido, o emprego de mais de um índice permite comparar os resultados e inferir sobre o qual forneceu resultados mais consistentes para o objetivo do trabalho.

As imagens foram obtidas do banco de dados da EOSDIS (*NASA's Earth Observing System Data and Information System*), sendo identificadas em uma grade horizontal e vertical, formando células chamadas de *tiles*. Essas imagens são denominadas *ready-to-use* (prontas para serem utilizadas), pois são obtidas georreferenciadas e com correção atmosférica (LPDAAC, 2014), e foram adquiridas do período de 19 de dezembro de 2006 a 03 de janeiro de 2016 correspondentes ao *tile* h14v10, no qual se localiza a área de estudo (Figura 1.2). A série temporal de imagens NDVI e EVI totalizou 414 imagens de índices de vegetação (207 de NDVI e 207 de EVI) e 414 imagens TST.

Figura 1.2 - Grade de referência das imagens do sensor MODIS com destaque para a cena utilizada no estudo.



Fonte: Adaptada do site LPDAAC (2015).

2.3. Processamento das imagens

Todos os produtos do sensor MODIS são originalmente disponibilizados na projeção *senoidal* e formato *Hierarchical Data Format* (HDF), e estes foram convertidos para o sistema de projeção UTM (Universal transversa de Mercator), *datum* horizontal WGS 84 e gravadas em formato TIFF (*Tagged Image File Format*) por meio do programa *MODIS Reprojection Tool* (MRT).

Após a etapa de processamento no software MRT, as imagens de NDVI e EVI, originalmente com valores digitais no intervalo de -10.000 a 10.000, foram reescaladas para o intervalo -1 a +1 através da divisão pelo seu fator de escala (10.000).

As imagens TST foram multiplicadas pelo seu fator de escala (0,02) e, posteriormente obtidos os valores de temperatura em graus Celsius para cada imagem (Equação 3). Após essa etapa, foi efetuado o recorte correspondente à área de estudo em todas as imagens EVI, NDVI e TST da série temporal, utilizando o dado vetorial da zona de amortecimento da Reserva Biológica de Sooretama. Esses processamentos foram realizados no software ArcGIS 10.2.2.

$$P (^{\circ}\text{C}) = (B1 * 0,02) - 273,15 \quad (\text{Eq.3})$$

Em que:

P ($^{\circ}\text{C}$) - valor do pixel em graus Celsius e;

B1 - valor original do pixel em graus Kelvin.

Como as imagens TST corresponde a um período de 8 dias (46 imagens por ano), isto é, a média de temperatura de 8 dias, cada imagem foi agregada a imagem posterior e obtida a média correspondente a 16 dias. Esse procedimento foi feito considerando os “dias julianos” de cada imagem de índice de vegetação, obtendo assim um conjunto de 23 imagens de TST para cada ano. De posse desses dados, foram obtidos os valores médios de EVI e NDVI para cada imagem e os valores máximos, médios e mínimos das imagens TST.

2.4. Obtenção e processamento dos dados meteorológicos

Foram utilizados dados meteorológicos da estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), código A614, localizada no município de Linhares-ES à 26 km da área de estudo, nas coordenadas geográficas -19°21'24.92" de latitude sul e -40°4'7.25" de longitude oeste.

A estação meteorológica A614 começou a registrar os dados em outubro de 2006 e integra os valores observados, minuto a minuto, disponibilizando-os automaticamente a cada hora. Esses dados foram disponibilizados pelo INMET para o período de 19/12/2006 a 03/01/2016, correspondendo a um total de 3.303 registros diários para cada variável.

As variáveis meteorológicas utilizadas foram: temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, precipitação pluvial. Além dessas variáveis, foi calculado a evapotranspiração potencial pelo método Penman-Monteith descrita no boletim 56 da Food and Agriculture Organization (FAO) (ALLEN et al., 1998). A partir dos dados diários de precipitação pluvial e evapotranspiração potencial, foi calculado balanço hídrico sequencial de Thornthwaite e Mather (1995) diário e obtida a deficiência hídrica diária utilizando 125 mm de Capacidade de Água Disponível (CAD) de acordo com Pereira et al. (2002).

De posse dos dados diários e considerando a resolução temporal das imagens de índices de vegetação do sensor MODIS (16 dias), foram calculados os valores médios das variáveis meteorológicas temperatura do ar, umidade relativa e radiação solar a cada intervalo de 16 dias. Para a precipitação pluvial, evapotranspiração potencial e deficiência hídrica foram obtidos os seus acumulados no mesmo intervalo de tempo, totalizando para cada variável 23 dados por ano.

Com intuito de avaliar qual período de tempo a vegetação responde aos efeitos da variação climática, aplicou-se uma defasagem temporal nos dados

meteorológicos. Assim, os dados climáticos foram tabulados considerando-se cinco níveis de defasagem (16, 32, 48, 64 e 80 dias) observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resposta da vegetação à variação climática em diferentes níveis de defasagem.

Dias de defasagem	Resposta da vegetação
16	Valor de NDVI e EVI em resposta ao valor da variável climática de 16 dias atrás
32	Valor de NDVI e EVI em resposta ao valor da variável climática de 32 dias atrás
48	Valor de NDVI e EVI em resposta ao valor da variável climática de 48 dias atrás
64	Valor de NDVI e EVI em resposta ao valor da variável climática de 64 dias atrás
80	Valor de NDVI e EVI em resposta ao valor da variável climática de 80 dias atrás

2.5. Correlação entre os dados meteorológicos e os índices NDVI e EVI

Foi realizada a análise de correlação de Pearson (Equação 4) entre os valores médios de NDVI e EVI de cada imagem da série temporal com todas as variáveis meteorológicas utilizadas neste estudo, com o intuito de estimar a intensidade da associação da variação da vegetação a partir da variação climática. Essa análise foi realizada para toda a série de 2007 a 2015 e para os diferentes níveis de defasagem.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{Eq.4})$$

Em que:

r = coeficiente de correlação de Pearson;

\bar{x} - média amostral de x ;

\bar{y} - média amostral de y .

A significância de r é dependente do tamanho da amostra, o que restringe a aplicação dessa técnica em muitos casos. Nesta análise, onde a correlação de Pearson foi utilizada extensivamente, atentou-se para esta restrição.

De posse dos coeficientes de correlação de Pearson, os resultados foram validados em uma tabela de valores críticos de correlação de Pearson para o nível de significância de 1% e 5% de probabilidade. Após a análise de correlação foi obtido o coeficiente de determinação para os dados que apresentaram correlação significativa.

O índice de vegetação que apresentou melhor relação com as variáveis climáticas, com base na análise de correlação, foi considerado o mais adequado para análises de séries temporais na área de estudo, sendo assim, empregado como entrada no cálculo do índice de seca para análise espaço-temporal de ocorrências de seca.

2.6. Relação entre o índice de condição da vegetação com a temperatura da superfície da terra.

A caracterização e espacialização de ocorrências de seca foram realizadas por meio do Índice de Condição da Vegetação (ICV) proposto por Kogan (1995). Nesta etapa, foram utilizadas do banco de dados do sensor MODIS as imagens do índice de vegetação EVI (definido a partir da correlação com os dados meteorológicos) para o cálculo das imagens do índice de seca ICV utilizado neste trabalho. Para o cálculo do ICV foram consideradas as quatro estações do ano:

- Verão: 19 de dezembro a 21 de março;
- Outono: 22 de março a 21 de junho;
- Inverno: 22 de junho a 22 de setembro;
- Primavera: 23 de setembro a 18 de dezembro.

As imagens EVI foram organizadas por estação do ano (Tabela 2) para posterior cálculo do ICV. Essas imagens são identificadas pelo “dia juliano” inicial da composição de 16 dias.

Tabela 2 - Estações do ano e dias julianos do início da composição das imagens EVI do sensor MODIS com as respectivas datas para o período de dezembro de 2006 a janeiro de 2015.

Verão	Outono	Inverno	Primavera
353 - 19/dez.	081 - 22/mar.	177 - 26/jun.	257 - 14/set.
001 - 01/jan.	097 - 07/abr.	193 - 12/jul.	273 - 30/set.
017 - 17/jan.	113 - 23/abr.	209 - 28/jul.	289 - 16/out.
033 - 02/fev.	129 - 09/mai.	225 - 13/ago.	305 - 01/nov.
049 - 18/fev.	145 - 25/mai.	241 - 29/ago.	321 - 17/nov.
065 - 06/mar.	161 - 10/jun.	257 - 14/set.	337 - 03/dez.

De acordo com as estações do ano, o período de análise correspondeu à data de 19/12/2006 a 03/01/2015, com uma imagem de índice de seca para cada estação. Assim, por ano totalizou quatro imagens de ICV por ano e trinta e seis imagens em nove anos.

Para cálculo do ICV, as imagens EVI foram agrupadas por estação do ano, como mostrado na Tabela 2 e, posteriormente, calculadas as médias (Equação 5) desses índices para cada estação do ano em todo o período analisado.

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{Eq.5})$$

Em que:

\bar{X} = média de um conjunto N de dados numéricos X1, X2,..., XN.

X_i = valores de EVI.

Após obter as médias para cada estação do ano, foram agrupadas todas as imagens correspondentes a cada estação para todo o período analisado (nove anos) e obtidas as imagens de máximo e mínimo valor de EVI (média de todos os pixels que apresentaram valores máximos e mínimos) representativa de cada estação do ano, considerando todo o período analisado (exemplo: média do máximo e mínimo valor das imagens EVI de todos os verões, outonos, invernos e primaveras nos nove anos). Em outras palavras, as imagens de máximo e mínimo valor correspondem à média de máxima e mínima variação da vegetação em toda série temporal para dada estação.

A caracterização e espacialização de secas pixel a pixel foram realizadas por meio do cálculo do ICV, conforme a Equação 6 para as quatro estações do ano,

considerando todo o período a ser analisado, com o objetivo que obter uma visão da distribuição espacial de ocorrências de seca em toda a área de estudo, bem como a caracterização da intensidade desse evento.

$$ICV = \frac{\bar{X}_{\text{valor}} - \bar{X}_{\text{mín.referência}}}{\bar{X}_{\text{máx.referência}} - \bar{X}_{\text{mín.referência}}} * 100 \quad (\text{Eq.6})$$

Em que:

ICV = Índice de Condição da Vegetação (%);

\bar{X}_{valor} = média por estação do EVI para um determinado ano;

$\bar{X}_{\text{mín.referência}}$ = média geral dos valores mínimos de EVI para determinada estação, ou seja, a média de valores mínimos da estação para a série total de nove anos;

$\bar{X}_{\text{máx.referência}}$ = média geral dos valores máximos de EVI para determinada estação, ou seja, a média de valores máximos da estação para a série total de nove anos.

Após processamento dos ICVs, foi realizada a reclassificação pixel a pixel de cada índice gerado de acordo com as diferentes classes de seca conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Intervalos de classes dos valores do Índice de Condição da Vegetação (ICV) e sua correspondente classificação.

Valores de ICV (%)	Classificação
$X < 10$	Seca extrema
$10 \leq X < 20$	Seca severa
$20 \leq X < 30$	Seca moderada
$30 \leq X < 40$	Seca suave
$X \geq 40$	Sem ocorrência de seca

Fonte: adaptada de Bhuiyan & Kogan (2010).

O Índice de Condição da Vegetação (ICV) desenvolvido por Kogan (1995) representa a percentagem do índice de vegetação EVI em relação a sua máxima amplitude em cada estação e é calculado a partir da diferença entre os máximos e mínimos valores de EVI registrados desde 2007 a 2015. Os valores mais baixos e

mais altos de ICV indicam condições piores ou melhores do vigor da vegetação, respectivamente.

De acordo com Du et al. (2013), as mudanças da vegetação influenciadas por mudanças climáticas não podem ser facilmente detectadas pelo emprego direto dos índices de vegetação EVI ou NDVI. Nesse sentido foi desenvolvido o ICV, com o intuito de controlar as diferenças locais na produtividade do ecossistema. O emprego do ICV para o monitoramento de seca está que o vigor vegetativo é afetado pela variação climática. Dessa forma, em determinada região e estação climática extremamente seca, o crescimento da vegetação irá diminuir, levando a um menor índice de vegetação em observações de vários anos. Por outro lado, um índice de vegetação maior irá representar uma condição climática ótima.

Para os resultados apresentados pelo ICV foram gerados gráficos por estação do ano apresentando a área das classes de ocorrência de secas nas condições mais adversas (severa e extrema), nas quais a vegetação é fortemente afetada pelo estresse hídrico. Essas informações foram comparadas com o acumulado de precipitação pluvial e deficiência hídrica e suas anomalias para cada estação do ano. Além disso, foram obtidos os valores máximos, médios e mínimos de ICV e relacionados com os valores máximos, médios e mínimos de TST por meio da análise gráfica e de regressão. Posteriormente, foram calculadas anomalias de TST (Equação 7) e cruzadas com as imagens de ICV das estações do ano que apresentaram maiores extensões de seca de maior severidade para análises de correspondência espacial.

$$\text{AnomTST} = \text{TST}_{\text{valor}} - \text{TST}_{\text{referência}} \quad (\text{Eq.7})$$

Em que:

AnomTST = anomalia de Temperatura da Superfície da Terra;

$\text{TST}_{\text{valor}}$ = média de TST da estação analisada em um determinado ano;

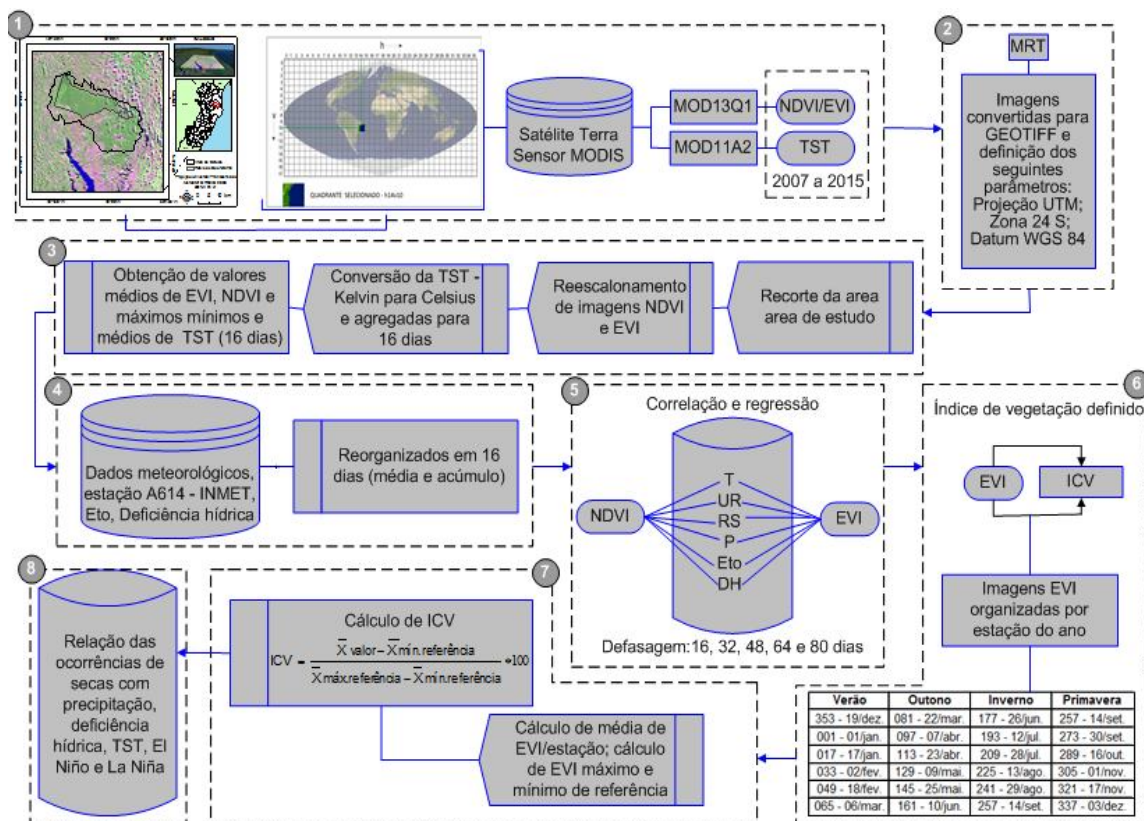
$\text{TST}_{\text{referência}}$ = média de referência para a estação, ou seja, a média da referida estação para o período de nove anos.

Após essa etapa, foram obtidos dados de aquecimento e resfriamento da superfície do oceano, indicativos de ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña, fornecidos pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/INPE, para todos os anos da

série temporal. Diante disso, a ocorrência de secas foi relacionada com a ocorrência desses fenômenos.

A Figura 1.3 simplifica as etapas metodológicas necessárias para desenvolvimento desta pesquisa conforme descritas acima.

Figura 1.3 - Fluxograma com resumo das etapas metodológicas da pesquisa.



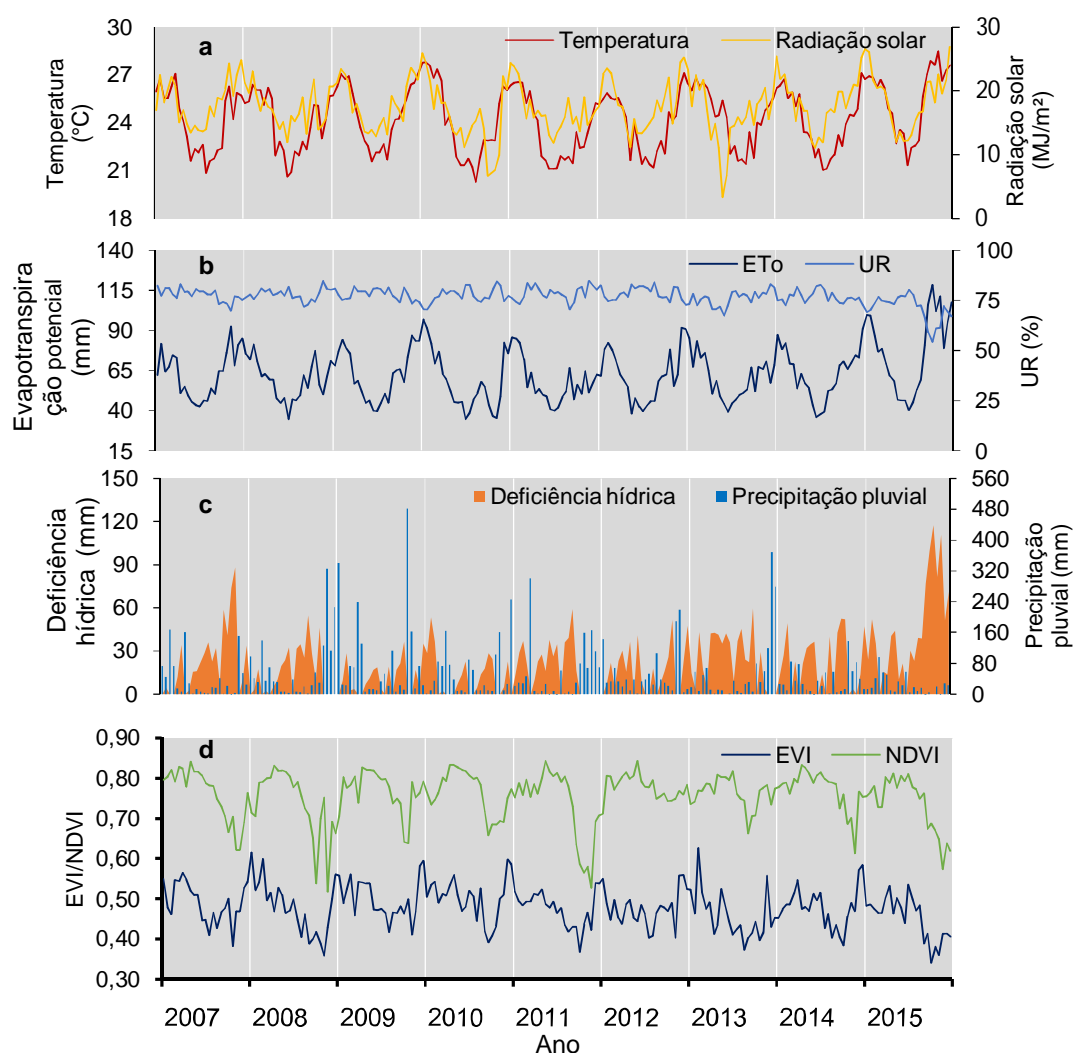
Fonte: O autor

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Correlação entre os índices de vegetação e a variação climática

A variabilidade anual das médias de temperatura do ar, radiação solar e umidade relativa do ar, assim como dos totais de precipitação pluvial, evapotranspiração potencial (ETo) e deficiência hídrica é apresentada na Figura 1.4.

Figura 1.4 - Variação temporal da média de temperatura, radiação solar (a), umidade relativa, acumulado de evapotranspiração potencial (b), precipitação pluvial, deficiência hídrica (c), NDVI e EVI (d) para períodos de 16 dias nos anos de 2007 a 2015.



Fonte: O autor

De modo geral, considerando o conjunto total de dados, as variáveis mostraram um padrão médio climático característico da região. Diante disso, observa-se que, especificamente a umidade relativa (Figura 1.4b) não apresentou um padrão sazonal bem definido em relação às demais variáveis climáticas. Para a variável precipitação pluvial foram observadas maiores diferenças no seu regime, sendo o inverno mais seco e a primavera mais chuvosa (Figura 1.4c).

As médias de temperatura e radiação solar (Figura 1.4a), assim como acumulado de evapotranspiração potencial (Figura 1.4b) apresentaram sazonalidade de primaveras e verões quentes, na qual os maiores valores para essas variáveis foram observados na primavera de 2015, refletindo maior demanda evapotranspirativa da atmosfera. Além disso, a deficiência hídrica, em combinação com as demais variáveis meteorológicas, apresentou maiores valores na primavera de 2007 e 2015 em concordância com baixos valores de precipitação pluvial e umidade relativa, e elevados valores de temperatura, radiação solar e evapotranspiração potencial.

De acordo com a variação dos valores médios de NDVI e EVI ao longo dos anos (Figura 1.4d), observou-se uma relação direta com a temperatura, radiação solar, precipitação pluvial, evapotranspiração potencial e umidade relativa, porém, essa última não foi muito expressiva, apresentando em alguns casos comportamento inverso de sua curva em relação às curvas dos índices de vegetação. No entanto, observou-se que essa resposta dos índices de vegetação não ocorre de imediato, pois a vegetação apresenta uma defasagem de respostas à variação climática.

Bertolli et al. (2010) observaram que o estágio de maior crescimento da vegetação natural ocorre no verão e na primavera, e o inverno apresenta um valor mínimo de crescimento devido a diminuição da temperatura média do ar. De acordo com esses autores, foi identificada também maior sensibilidade do crescimento da vegetação natural com a disponibilidade hídrica no outono, porém nessa mesma estação observaram diminuição da taxa de crescimento da vegetação devido a diminuição da temperatura média do ar, diferente do que acontece na primavera.

Apesar de apresentar comportamentos similares ao longo dos anos, as curvas de NDVI e EVI apresentam em alguns casos diferentes respostas à variação climática. Diante disso, com o objetivo de definir o índice que represente de forma mais adequada a variação de biomassa na área de estudo, e posterior utilização no estudo de ocorrências de seca, assim como a defasagem de resposta da vegetação

à variação climática, foi calculada as correlações e suas significâncias entre os índices de vegetação e as variáveis meteorológicas, apresentadas nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Correlação entre os valores médios de NDVI e as variáveis meteorológicas para o período de 2007 a 2015 com 16, 32, 48, 64 e 80 dias de defasagem por meio do coeficiente de correlação de Pearson (r).

Defasagens		NDVI - Temp.	NDVI - UR	NDVI - RS	NDVI - Prec	NDVI - Eto	NDVI - Def
16 dias	r	0,04 ns	0,33**	-0,08 ns	0,01 ns	-0,22*	-0,31**
	r ²	----	0,11	----	----	0,05	0,10
32 dias	r	0,19 ns	0,32**	-0,03 ns	0,05 ns	-0,13 ns	-0,35**
	r ²	----	0,10	----	----	----	0,12
48 dias	r	0,32**	0,34**	0,08 ns	0,14 ns	-0,01 ns	-0,37**
	r ²	0,10	0,12	----	----	----	0,14
64 dias	r	0,46**	0,27**	0,22*	0,19 ns	0,16 ns	-0,31**
	r ²	0,21	0,07	0,05	----	----	0,10
80 dias	r	0,53**	0,18 ns	0,30**	0,21*	0,29**	-0,32**
	r ²	0,28	----	0,09	0,04	0,08	0,10

n= 207. Valores significativos a 5% (*) e a 1% (**) de probabilidade, ns – não significativo).

Tabela 5 - Correlação entre os valores médios de EVI e as variáveis climáticas para o período de 2007 a 2015 com 16, 32, 48, 64 e 80 dias de defasagem por meio do coeficiente de correlação de Pearson (r).

Defasagens		EVI x Temp.	EVI x UR	EVI x RS	EVI x Prec	EVI x Eto	EVI x Def
16 dias	r	0,35**	0,28**	0,23*	0,18 ns	0,14 ns	-0,38**
	r ²	0,12	0,08	0,05	----	----	0,14
32 dias	r	0,38**	0,26**	0,25*	0,27**	0,29**	-0,42**
	r ²	0,14	0,07	0,06	0,07	0,08	0,18
48 dias	r	0,37**	0,22*	0,36**	0,42**	0,35**	-0,39**
	r ²	0,14	0,05	0,13	0,18	0,12	0,15
64 dias	r	0,41**	0,04 ns	0,25*	0,24*	0,26*	-0,13 ns
	r ²	0,17	----	0,06	0,06	0,07	----
80 dias	r	0,33**	-0,02 ns	0,41**	0,17 ns	0,40**	-0,06 ns
	r ²	0,11	----	0,17	----	0,16	----

(n= 207. Valores significativos a 5% (*) e a 1% (**) de probabilidade, ns – não significativo).

De modo geral, a relação entre as variáveis climáticas e os índices de vegetação não apresentaram altos valores de correlação, no entanto, em especial para EVI foram significativos em sua maioria a 1% e 5% de probabilidade quando comparados com NDVI que apresentou correlação não significativa para grande

parte das variáveis climáticas, sendo que apenas na relação com a deficiência hídrica obtiveram-se valores de correlação de Pearson significativos para todos os níveis de defasagem.

Esses resultados podem ser explicados pelo fato da área de estudo apresentar maior extensão de floresta natural. Segundo Huete et al. (2002), o EVI é superior na sensibilidade em relação ao NDVI, isto é, em áreas de maior densidade de vegetação, o NDVI apresenta rápida saturação ao aumento de biomassa, não apresentando melhor resposta em áreas de florestas quando comparado com o EVI.

Foi constatado que o NDVI não apresentou um período de defasagem em que as correlações fossem todas significativas e superiores em relação aos demais valores de correlações. Por outro lado, para o EVI foi possível identificar que os níveis de defasagem de 32 e 48 dias foram os períodos em que se obtiveram maiores valores de correlações e significância em sua totalidade em relação às correlações dos demais níveis de defasagem, indicando assim que a resposta da vegetação à variação dos elementos meteorológicos ocorre entre 32 e 48 dias. Diante disso, para a área de estudo, o EVI apresentou-se mais indicado para estudos com séries temporais, sendo assim particularmente abordado nessa discussão.

Esses resultados com relação à defasagem da vegetação em resposta à variação climática, em especial com estresse hídrico, corroboram com os resultados obtidos por Arato et al. (2003), os quais afirmam que pode haver atraso de aproximadamente dois meses para a resposta da vegetação ao estresse hídrico combinado com altas temperaturas mediada por níveis elevados de radiação solar culminando inclusive a depender do período, em fotoinibição da fotossíntese. Confirmando o proposto por esses autores, nos fragmentos estudados foi constatado que a temperatura e a precipitação não influenciaram imediatamente na deposição de folhas e galhos no solo, mas apresentaram seus efeitos mais significativos entre um e dois meses. Essa afirmação baseia-se na ausência de correlações significativas entre a queda de folhas e a precipitação ou a temperatura no mesmo mês.

Os valores positivos e significativos de correlação do EVI com as variáveis climáticas principalmente a temperatura e radiação solar (a exemplo da qualidade espectral, por meio da luz azul que tem relação com a abertura estomática) podem ser explicados pelo fato dessas variáveis apresentarem relação direta na fisiologia da planta, em especial no processo de fotossíntese, indicando aumento da biomassa

refletido no EVI com incremento desses elementos (RAY et al., 2002). A fotossíntese é o processo primário para acúmulo de biomassa e com o seu incremento ocorre aumento na sua produção (GUISELINI et al., 2010).

A radiação marca o início do processo fotoquímico e também estimula a abertura dos estômatos e a atividade da rubisco, para fixar CO₂ (PORTIS, 2003; BECKMANN et al., 2006; GUISELINI et al., 2010). Baixas taxas de radiação provocam limitações na fotossíntese e baixos ganhos de carbono, diminuindo a produtividade das plantas, e assim, a diminuição do índice de área foliar e biomassa (LAMBERS et al., 2008; CARON et al., 2014). Os seus baixos valores de correlação podem ser explicados devido ao fato de que nem toda radiação ativa, medida nas estações meteorológicas automáticas, é absorvida pela vegetação (CARON et al., 2014).

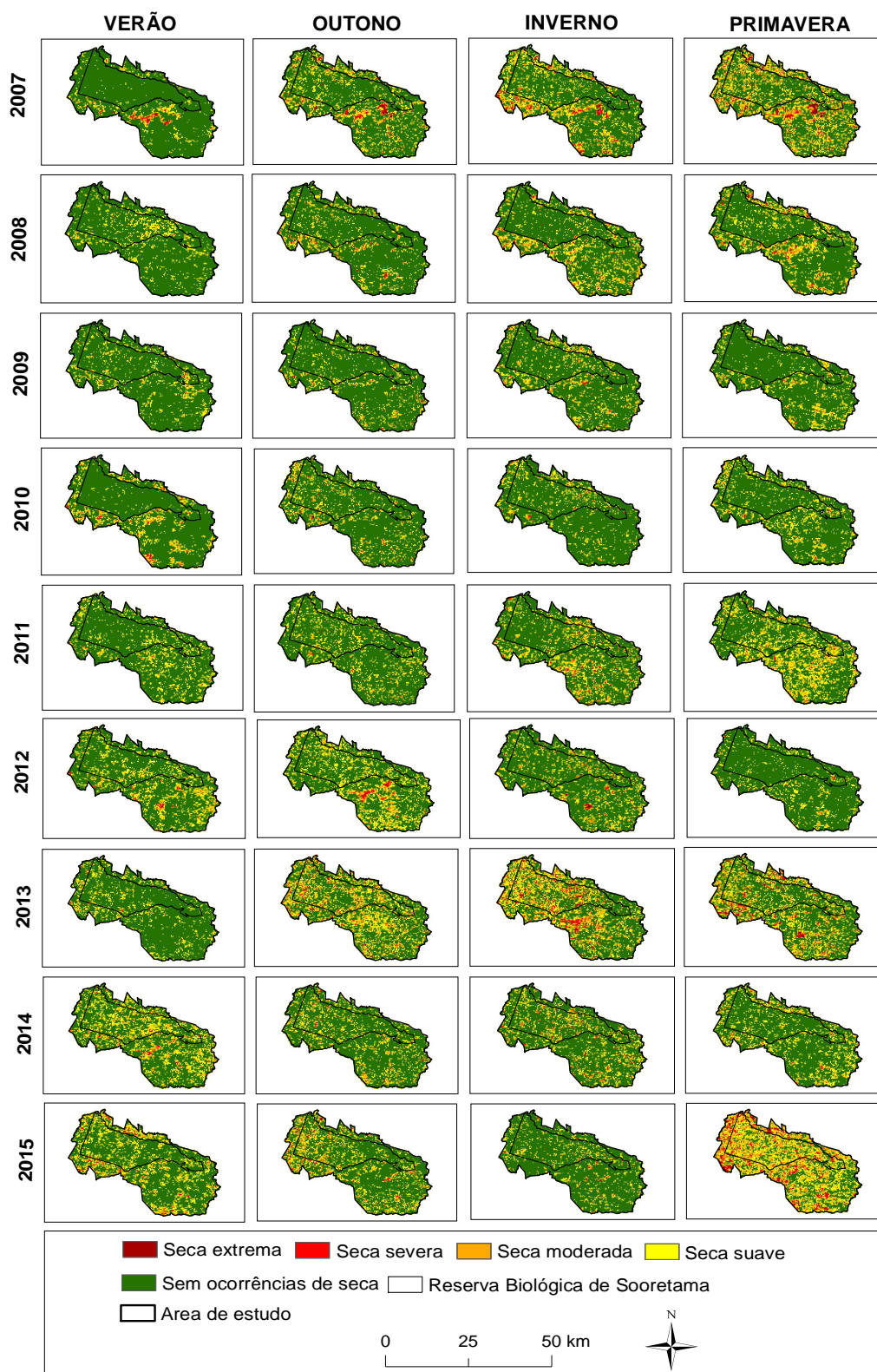
Além das variáveis meteorológicas abordadas, um dos mais importantes fatores associados à diminuição do vigor da vegetação é a deficiência hídrica. Nesse sentido, observou-se que a relação entre deficiência hídrica e valores de EVI apresentou resultados esperados, pois os valores de correlação foram negativos, significativos e superiores em relação aos demais valores obtidos para as outras variáveis.

Em situação de déficit hídrico no solo as plantas fecham seus estômatos, através do acúmulo do ácido abscísico, na tentativa de conservar a água e realocá-la para as funções básicas, visando garantir sua sobrevivência e para uso em períodos posteriores (SANTOS; CARLESSO, 1998; SHINOZAKI; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, 2007). Como consequência, as plantas reduzem suas trocas gasosas (transpiração e assimilação de CO₂ para a realização da fotossíntese). Esses fatores aliados são os responsáveis pela redução da produtividade e da qualidade da produção (SHAO et al., 2009; WELCKER et al., 2011).

3.2. Espacialização e classificação de ocorrências de seca

Com o intuito de identificar, quantificar e monitorar a ocorrência de seca, o índice de vegetação EVI, por apresentar maiores correlações com as variáveis meteorológicas, foi utilizado para o cálculo do Índice de Condição da Vegetação (ICV). A Figura 1.5 e a Tabela 6 apresentam a espacialização das diferentes classes de seca e as suas extensões em quilômetros quadrados (km²) e porcentagem (%), respectivamente, ao longo do período 2007 a 2015.

Figura 1.5 - Índice de Condição da Vegetação por estação do ano com espacialização de ocorrências de seca, calculado com índice EVI do produto MOD13Q11 do sensor MODIS para o período de 2007 a 2015.



Fonte: O autor

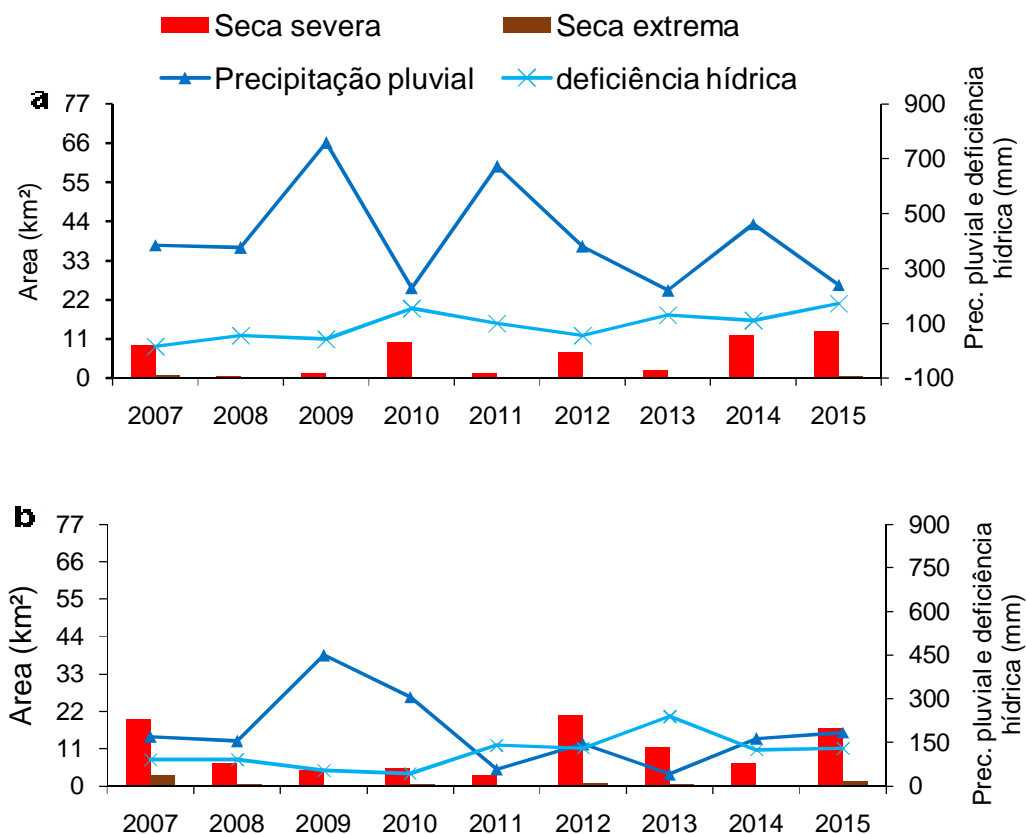
Tabela 6 – Dimensões em km² e porcentagem das classes de seca do Índice de Condição da Vegetação para cada estação do ano no período de 2007 a 2015.

	Estação verão									
	Sem ocorrência		Seca suave		Seca moderada		Seca severa		Seca extrema	
Ano	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
2007	735,74	90,42	47,51	5,84	20,38	2,5	9,34	1,15	0,69	0,08
2008	721,05	88,63	77,85	9,57	14,19	1,74	0,5	0,06	-	-
2009	722,22	88,76	71,91	8,84	18,01	2,21	1,44	0,18	0,06	0,01
2010	689,43	84,74	74,84	9,20	38,87	4,78	10,19	1,25	0,25	0,03
2011	700,71	86,1	93,95	11,54	17,69	2,17	1,45	0,18	-	-
2012	640,24	78,72	123,95	15,24	41,62	5,12	7,27	0,89	0,19	0,02
2013	710,26	87,31	81,87	10,06	18,98	2,33	2,34	0,29	-	-
2014	563,65	69,27	173,53	21,32	64,34	7,91	12,14	1,49	0,06	0,01
2015	584,28	71,8	151,16	18,57	64,88	7,97	13,06	1,6	0,39	0,05
Estação outono										
2007	628,42	77,24	107,25	13,18	55,2	6,78	19,57	2,4	3,12	0,38
2008	701,02	86,17	71,79	8,82	33,55	4,12	6,66	0,82	0,54	0,07
2009	715,28	87,91	69,11	8,49	24,63	3,03	4,59	0,56	0,06	0,01
2010	691,71	85,01	81,69	10,04	34,35	4,22	5,36	0,66	0,62	0,08
2011	693,71	85,24	90,57	11,13	26,24	3,22	3,27	0,4	-	-
2012	527,82	64,92	157,03	19,9	94,06	12,54	21,08	2,4	0,9	0,24
2013	511,51	62,88	179,02	22,01	98,3	12,08	24,13	2,96	0,54	0,07
2014	664,97	81,76	98,75	12,14	42,76	5,26	6,84	0,84	0,04	0,01
2015	602,56	74,1	126,14	15,51	66,05	8,12	17,03	2,09	1,37	0,17
Estação Inverno										
2007	581,96	71,54	128,1	15,75	75,76	9,31	25,68	3,16	2	0,25
2008	638,52	78,47	109,26	13,43	52,91	6,5	12,14	1,49	0,85	0,1
2009	679,13	83,5	86,81	10,67	39,46	4,85	7,51	0,92	0,44	0,05
2010	719,51	88,46	64,56	7,94	25,15	3,09	4	0,49	0,1	0,01
2011	638,46	78,48	109,78	13,49	52,08	6,4	12,89	1,58	0,31	0,04
2012	675,24	83,05	89,09	10,96	38,13	4,69	9,28	1,14	1,34	0,16
2013	468,61	57,6	180,24	22,15	114,62	14,09	46,55	5,72	3,54	0,43
2014	643,08	79,04	104,48	12,84	52,89	6,5	12,88	1,58	0,25	0,03
2015	720,44	88,58	63,08	7,76	25,3	3,11	4,38	0,54	0,12	0,02
Estação Primavera										
2007	502,05	61,71	138,63	17,04	137,5	16,90	28,45	3,5	6,91	0,85
2008	632,5	77,74	114,37	14,06	52,68	6,47	13,59	1,67	0,48	0,06
2009	700,74	86,13	83,24	10,23	26,62	3,27	2,93	0,36	-	-
2010	687,47	84,53	93,75	11,53	28,32	3,48	3,54	0,43	0,19	0,02
2011	567,9	69,82	173,04	21,27	65,4	8,04	7,04	0,86	-	-
2012	736,28	90,48	59,79	7,35	16,33	2,01	1,32	0,16	-	-
2013	585,83	72,01	160,41	19,72	55,46	6,82	11,6	1,42	0,27	0,03
2014	647,79	79,62	120,27	14,78	40,02	4,92	5,5	0,68	0,06	0,01
2015	277,38	34,09	262,19	32,22	196,27	24,12	69,29	8,51	8,63	1,06

É possível observar que nos anos de 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 e 2014, ao longo de suas estações, ocorreram secas de intensidades severas ou extremas (estágios mais críticos de seca) em pequenas dimensões indicando que grande parte da vegetação da área de estudo não sofreu com o estresse hídrico e térmico de grande intensidade, sendo que a vegetação na maior parte desses anos apresenta-se com vigor vegetativo alto. Por outro lado, os anos de 2007, 2013 e 2015 apresentaram estações com maiores extensões de seca severa e extrema.

Por se tratar do nível mais adverso de seca, no qual a vegetação passa por estresse hídrico e térmico intenso, foi dada ênfase nos períodos em que ocorreram secas severas (SS) e extremas (SE) com maiores intensidades na área de estudo. Diante disso, foi feito o cruzamento, por estação do ano, entre o registro de ocorrências de seca nessas classes com o acumulado de precipitação pluvial e deficiência hídrica (Figura 1.6) e suas anomalias para cada estação do ano conforme as Tabelas 7 e 8.

Figura 1.6 - Dimensões em km² das extensões de seca severa e extrema para as estações do ano verão (a), outono (b), inverno (c) e primavera (d) de 2007 a 2015 e acumulados de precipitação pluvial e deficiência hídrica por estação.





Fonte: O autor

Tabela 7 – Anomalias de precipitação pluvial acumulada por estação do ano para o período de 2007 a 2015.

Anomalias de precipitação pluvial (mm)				
Ano	Verão	Outono	Inverno	Primavera
2007	-28,04	-16,82	-66,61	-233,24
2008	-37,64	-36,13	-54,21	210,16
2009	346,29	259,07	102,59	305,56
2010	-182,44	115,07	60,19	-143,04
2011	259,96	-133,13	-50,61	153,36
2012	-32,44	-46,53	141,39	13,36
2013	-192,24	-151,53	-39,81	201,36
2014	48,56	-28,33	1,59	-118,64
2015	-173,04	-6,73	-94,61	-388,84

Tabela 8 – Anomalias de deficiência hídrica acumulada por estação do ano para o período de 2007 a 2015.

Anomalias de deficiência hídrica (mm)				
Ano	Verão	Outono	Inverno	Primavera
2007	-77,55	-25,14	38,6	124,79
2008	-37,63	-25,14	28,34	-90,4
2009	-49,91	-62,5	-85,37	-66,89
2010	61,38	-71,88	-81,55	-65,7
2011	5,7	24,08	39,18	-130,07
2012	-36,51	15,08	-103,9	-28,61
2013	37,16	123,95	50,45	-53,9
2014	17,92	8,77	2,74	-24,33
2015	79,5	13,73	111,51	335,11

De modo geral, observa-se recorrência de seca de ordem severa e extrema ao longo dos anos em todas as estações, no entanto, para a estação verão ocorreram menores extensões desse fenômeno na maioria dos anos. As estações com maiores áreas de abrangência de seca foram inverno e primavera de 2007, inverno e primavera de 2013 e primavera de 2015, sendo essa última superior em relação às demais estações.

É possível notar que, ao longo de todo o ano de 2007 a vegetação sofreu com a ocorrência de seca severa e extrema nas quatro estações do ano, com aumento da extensão desse evento do início ao final do ano (verão: SS - 9,34 km² e SE - 0,69 km²; outono: SS - 19,57 km² e SE - 3,12 km²; inverno: SS - 25,68 km² e SE - 2 km²; primavera: SS - 28,45 km² e SE - 6,91 km²). Esse comportamento pode ser explicado pelo decréscimo de precipitação pluvial acumulada em cada estação em relação à sua média em nove anos, ou seja, anomalias negativas (verão: -28,04; outono; -16,82; inverno: -66,61 e primavera: -233,24).

Ainda no ano de 2007, apesar de ter ocorrido anomalias negativas de precipitação pluvial em todas as estações, apenas o inverno e a primavera apresentaram aumento da deficiência hídrica com anomalias positivas de deficiência de 38,6 mm e 124,79 mm, respectivamente, indicando aumento da deficiência hídrica em relação a sua média, sendo que essas estações apresentaram maiores extensões de ocorrências de seca.

No ano de 2013, ocorreu aumento das áreas mais atingidas pelo evento de seca do verão ao inverno, sendo que a maior extensão de ocorrência de seca foi no inverno (SS: 46,55 km²; SE: 3,54 km²), na qual começou a diminuir com o período chuvoso na primavera, que por sua vez apresentou alto valor de anomalia positiva de chuva (201,36 mm) e anomalia negativa de deficiência hídrica (-53,90), indicando diminuição do estresse hídrico.

No ano de 2015, observou-se uma variação pouco expressiva de ocorrência de secas severa e extrema no verão (SS: 13,06 km²; SE: 0,39 km²), outono (SS: 17,03 km²; SE: 1,37 km²) até o fim da estação inverno (SS: 4,38 km²; SE: 0,12 km²), sendo que a estação posterior, primavera, apresentou de forma mais evidenciada e em maior extensão a ocorrência de seca nas suas classes mais críticas (SS: 69,29 km²; SE: 8,63 km²) quando comparada com as estações de todos os anos anteriores, abrangendo espacialmente extensas áreas de florestas naturais.

A primavera nesta região é uma estação do ano chuvosa e com temperaturas elevadas, no entanto, no ano de 2015 essa estação apresentou valores de precipitação pluvial e deficiência hídrica total muito abaixo e acima da média, respectivamente, com anomalias negativas para precipitação de - 388,84 mm e positivas para deficiência hídrica de 335,11 mm o que explica maiores áreas de ocorrências desse evento climático no seu maior grau de severidade.

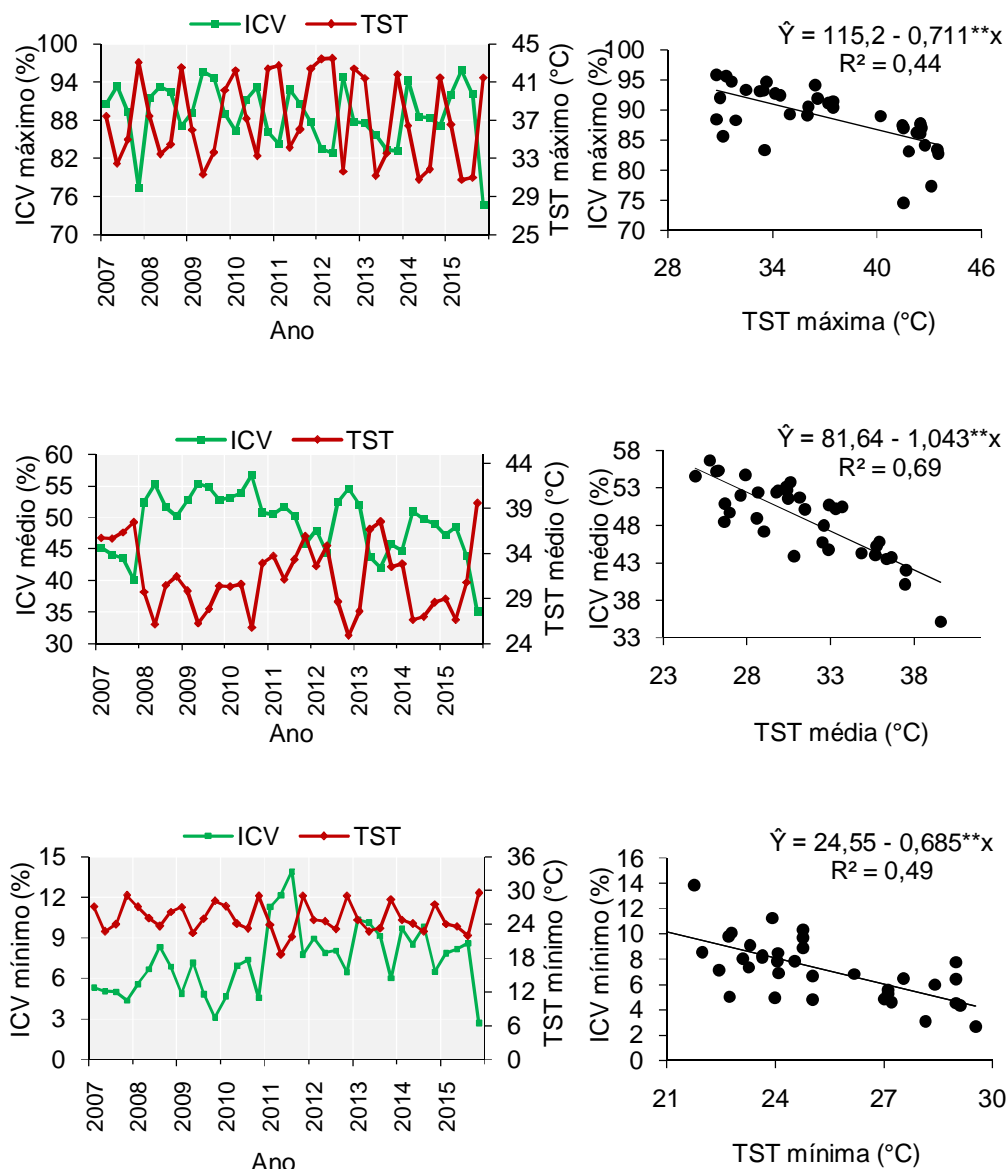
A deficiência hídrica associada com baixas precipitações, altas temperaturas, avançada idade das folhas, diminuição de entrada de nutrientes entre outros fatores ambientais representam grande contribuição para queda das folhas (BORCHERT et al., 2002; LAMBERS et al., 2008), diminuição do índice de área foliar e do vigor vegetativo das florestas e da vegetação rasteira, indicativos de ocorrência de secas nos maiores graus de severidade. Essa resposta fisiológica da vegetação, em síntese, ocorre por meio do fechamento estomático e a aceleração da senescência e abscisão foliar (BOTA et al., 2004; FONSECA, 2009; ALLEN et al., 2010). Outras consequências a nível morfológico são a redução da altura e do diâmetro, que são variáveis biofísicas importantes (SHAO et al., 2008; SHAO et al., 2009; PEREIRA et al., 2010).

3.3. Relação entre ocorrências de seca e a Temperatura da Superfície da Terra.

Para uma compreensão mais eficaz da ocorrência do fenômeno de seca, a Figura 1.7 apresenta o gráfico da relação entre variação temporal por estação do

ano dos valores máximos, médios e mínimos de Índice de Condição da Vegetação (ICV) e Temperatura da Superfície da Terra (TST), assim como gráficos das regressões lineares resultantes dessa relação, para o período de 2007 a 2015.

Figura 1.7 - Variação temporal e regressões lineares entre o Índice de Condição da Vegetação (ICV) máximo, médio e mínimo e a Temperatura da Superfície da Terra (TST) máxima, média e mínima.



Fonte: O autor

É possível observar que, de modo geral, ocorre correspondência entre TST e ICV, indicando relação inversa, isto é, com aumento da temperatura do solo há diminuição do ICV máximo, médio e mínimo, sendo forte indicativo de correlações de

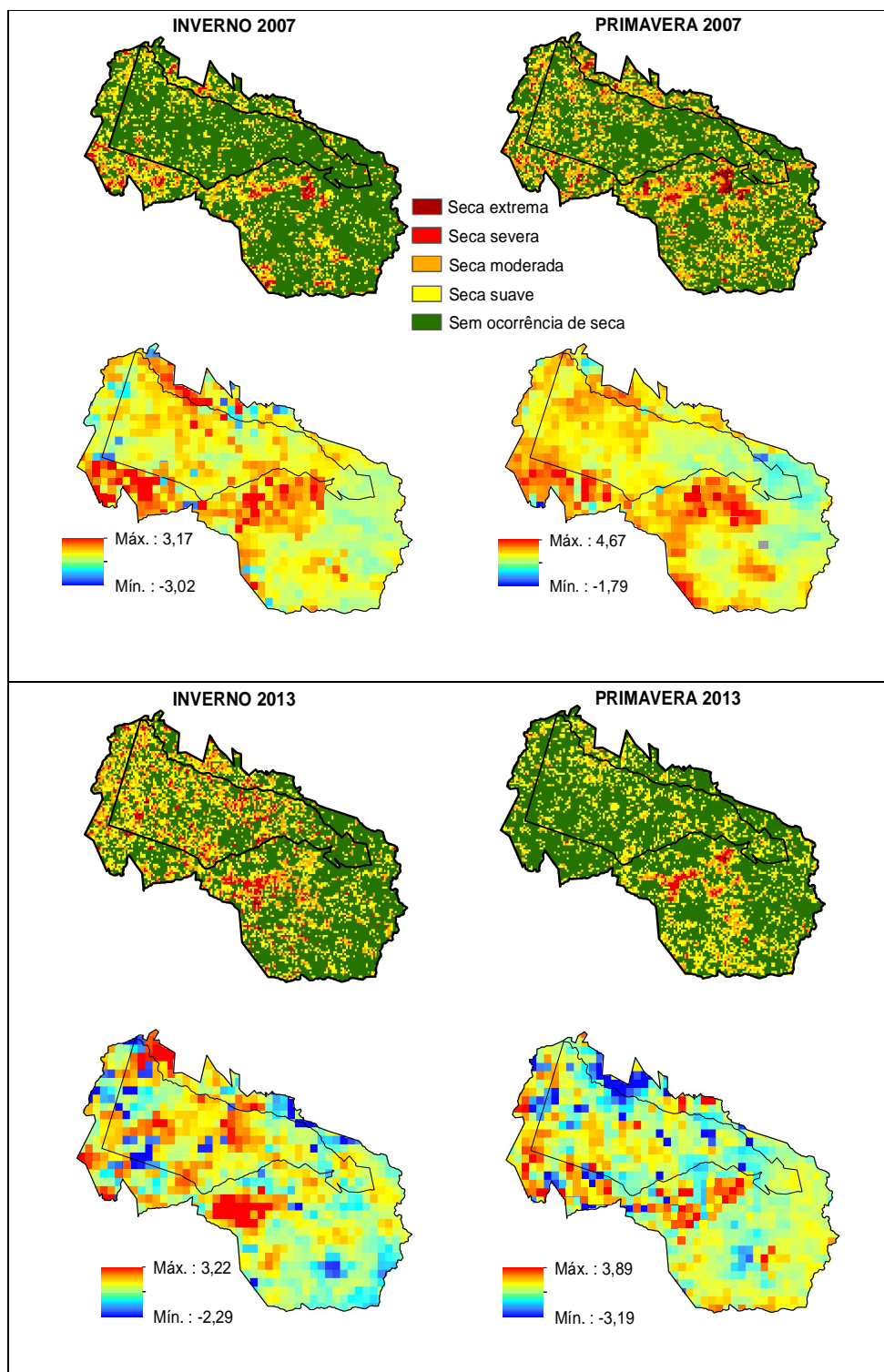
seca. Além disso, os valores de r^2 obtidos por meio da análise de regressão não foram altos, porém significativos a 1% e a 5% de probabilidade para a relação do ICV máximo, médio e mínimo com a TST máxima, média e mínima (0,44, 0,69 e 0,49, respectivamente), uma vez que outras variáveis em conjunto influenciam para ocorrências de seca.

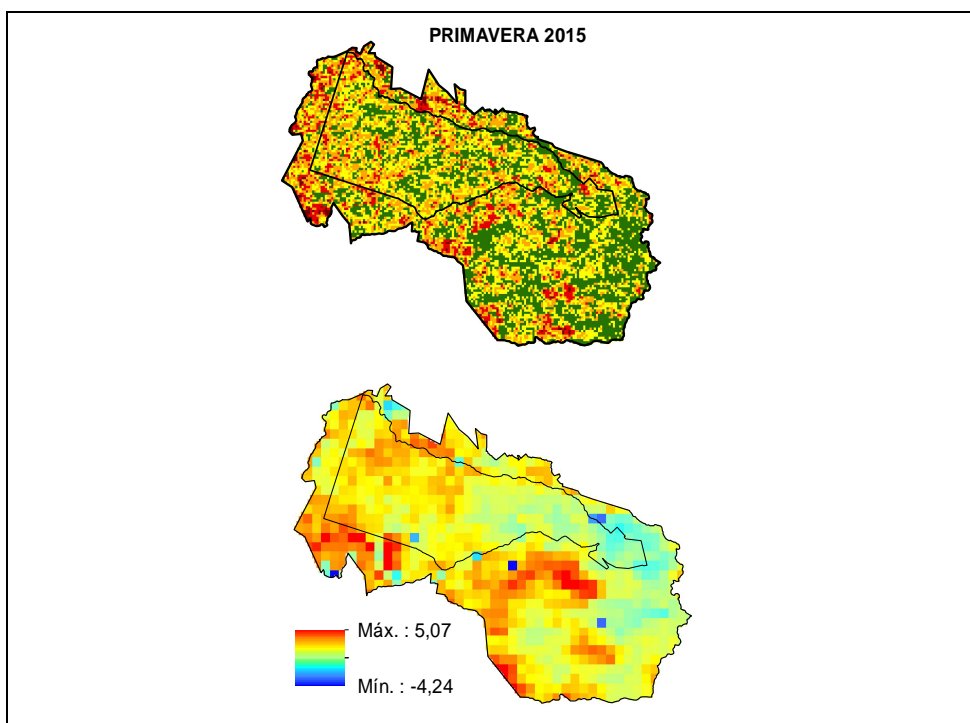
A temperatura de superfície da terra derivada do infravermelho termal pode auxiliar na detecção de seca na vegetação. Nesse sentido, serve como fator auxiliar em estimativas de evapotranspiração, umidade do solo, estresse hídrico em vegetação e inércia termal (MORAN et al., 1994; NARASIMHAN et al., 2003; JANG et al., 2006; ANDERSON et al., 2007). Os dados de TST têm sido comumente usados em estudos relacionados ao monitoramento de secas nos diferentes graus de severidade, apontando forte relação com índices de seca baseados em sensoriamento remoto (WAN et al., 2004; RHEE et al., 2010; DU et al., 2013).

Durante as condições de secas, na qual há menor disponibilidade de umidade do solo, o aumento da temperatura das folhas é um bom indicador do estresse hídrico das plantas, sendo que essa resposta térmica pode ocorrer mesmo quando as plantas estão verdes com estômatos fechados para minimizar a perda de água por transpiração resultando em diminuição do fluxo de calor latente. Consequentemente, para manter o balanço de energia, haverá aumento do fluxo de calor sensível resultando em aumento de temperatura de superfície da folha (GHOBADI et al., 2013; THANG; LI, 2014).

A fim de reforçar a relação existente entre seca e temperatura da superfície da terra, foram calculadas as anomalias para as imagens de TST e confrontadas (especificamente anomalias positivas) com as imagens de ICV das estações que apresentaram maiores extensões de ocorrência de seca (inverno e primavera de 2007 e 2013 e primavera de 2015) no seu maior grau de severidade, seca severa e extrema, e analisando suas relações espaciais, conforme a Figura 1.8. As anomalias positivas de TST espacializadas na área de estudo indicam áreas com temperatura acima da média.

Figura 1.8 - Relação espacial de ocorrências de seca nas estações do ano que apresentaram os maiores graus de severidade (severa e extrema) em maiores extensões com anomalias de Temperatura da Superfície da Terra.





Fonte: O autor

De acordo com os resultados da comparação entre a espacialização de anomalias de temperatura com a ocorrência de secas, podemos observar que de forma geral, existe uma correspondência espacial, em particular, de seca do tipo severa e extrema com anomalias positivas de TST, isto é, em áreas que apresentaram temperaturas do solo acima do normal (anomalias positivas) ocorreram secas nos níveis mais críticos de severidade, indicando que a vegetação nessas áreas foi afetada mais intensamente pelo estresse hídrico.

Em termos de solo, maiores TST no período diurno podem servir de indicativo de menor umidade do solo, pois a água e a vegetação são atenuantes nas trocas de calor entre solo e atmosfera, ou seja, em ambientes secos a troca é mais brusca. Por essa razão, regiões áridas apresentam grande amplitude térmica. Em síntese, a vegetação e a TST apresentam relação inversa e baseada em princípios físicos distintos (WENG et al., 2004; YUE et al, 2007; JULIEN; SOBRINO, 2009).

Observando de forma detalhada, podemos notar que especificamente no inverno de 2013 e primavera de 2015, ocorreram maiores extensões de seca no seu estágio mais adverso de severidade nas áreas de florestas como a Reserva Biológica de Sooretama.

Esse resultado pode ser explicado pelo fato de diferentes espécies florestais possuírem respostas distintas a eventos extremos de seca (CHAVES et al., 2003;

ALLEN et al., 2010), podendo o ICV ser também um indicativo de distribuição de espécies florestais. De acordo com Serrano (2007) e Pasho et al. (2011), os impactos de secas sobre o crescimento da vegetação variam entre diferentes espécies e conduzem a respostas distintas para diferentes escalas temporais consideradas.

Em florestas naturais, considerando as diferentes espécies florestais, a ocorrência de secas promove a sua inflamabilidade a incêndios (NEPSTAD et al., 2007; PHILLIPS et al., 2009), uma vez que devido à redução acentuada da umidade do solo combinada com escassez de chuvas e devido aos processos fisiológicos do componente arbóreo, ocorre o fenecimento ou murchamento e a abscisão de folhas (XAVIER et al., 2002; ZANCHI et al., 2009), aumento da penetração de radiação no dossel, causando elevação da temperatura próxima ao solo e da taxa de ressecamento do material vegetal, um dos melhores indicadores de inflamabilidade florestal (UHL; KAUFFMANN, 1990; HOFFMANN, 2003).

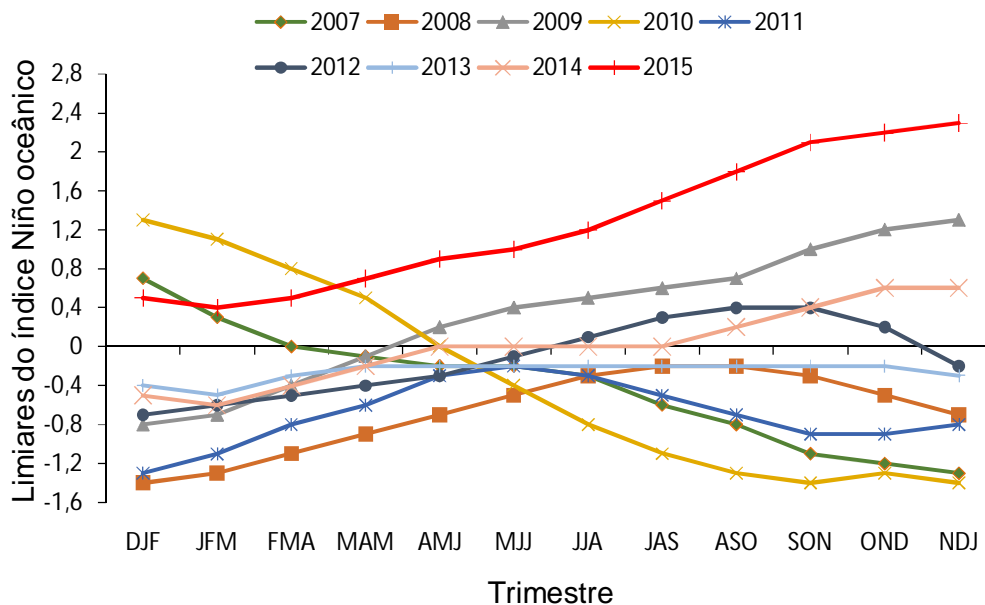
Uma possível explicação para ocorrência e ausência de seca analisadas ao longo de 2007 a 2015, é a ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña, Tabela 9 e Figura 1.9. Os fenômenos La Niña e El Niño provocam o resfriamento e aquecimento anormal, respectivamente, nas águas superficiais do oceano pacífico equatorial, mudando os padrões de vento e afetando os regimes das chuvas (INPE, 2016).

Tabela 9 – Períodos de ocorrência dos fenômenos climáticos El Niño e La Niña.

Período de ocorrências	Fenômeno climático	Intensidade
2007 - 2008	La Niña	Moderado
2009 - 2010	El Niño	Moderado
2011 - 2012	La Niña	Fraca
2013 - 2014	Neutro	-
2015	El Niño	Forte

Fonte: CPTEC/INPE, 2016, adaptado pelo autor.

Figura 1.9 - Limiares do índice Niño Oceânico para os anos de 2007 a 2015 (análises trimestrais). Valores negativos e menores que -0,4 indicam eventos de La Niña e positivos acima de 0,4 indicam El Niño. Valores intermediários indicam neutralidade.



Fonte: NOAA, adaptado pelo autor.

Para a região sudeste, algumas pesquisas indicam que a ocorrência de La Niña provoca aumento da média de precipitação anual e em períodos de El Niño ocorre diminuição, com ocorrências de seca nos casos de intensidade forte. Como exemplos, Grimm e Tedeschi (2004) mostram que, em episódios La Niña, o número de eventos extremos de precipitação tende a aumentar no centro-sudeste do Brasil, especialmente em setembro e outubro do ano de início do fenômeno, ocorrendo diminuição expressiva em janeiro. Para períodos de ocorrência de El Niño, há redução da média de chuvas anual, em especial, na estação primavera.

É possível perceber que os anos 2008, 2011, 2012, e 2014 não ocorreram secas severas e extremas em grandes áreas observadas nas imagens de ICV em concordância a ocorrência de La Niña e neutralidade nesses anos. No ano de 2009 ocorreu El Niño ao longo de toda a estação primavera com término na estação outono 2010, nas quais ocorreram secas de ordem suave a severa em pequenas extensões nessas estações.

Os anos de 2007 e 2013, os quais foram identificados estações com ocorrência de seca de ordem severa e extrema em maiores extensões,

prevaleceram também a ocorrência de La Niña e neutralidade, respectivamente. A ocorrência do fenômeno La Niña no ano de 2007 a partir de setembro não teve influência no aumento de chuvas para essa região, uma vez que foi constatada anomalia negativa de precipitação pluvial da ordem de -233,24 mm nessa estação do ano, a partir dos dados medidos em estação meteorológica, o que explica a ocorrência de secas nesse período.

Este comportamento pode ser explicado como um dos efeitos das mudanças climáticas. Gutiérrez et al. (2014), apontam que seria consequência das mudanças climáticas globais o aumento da intensidade e/ou frequência de eventos extremos, denotando um cenário preocupante vista as atuais discussões globais sobre as mudanças climáticas. Outros grupos de pesquisadores também sugerem que exista relação entre a seca do Sudeste com o desmatamento da Amazônia, com a oferta de vapor formador de chuvas para regiões centro-sul do Brasil (NOBRE, 2014)

Por outro lado, a ocorrência de seca severa e extrema em maiores extensões na estação primavera do ano de 2015 pode ter sofrido influência com a ocorrência de intensidade forte do fenômeno El Niño neste ano. Este fenômeno predominou ao longo de todos os meses do ano e atingiu maior intensidade na primavera, e seus efeitos podem ter influenciado fortemente a diminuição da biomassa da área de estudo, que apresentou grandes extensões com seca no mais alto grau de severidade.

4. CONCLUSÕES

- O índice EVI do sensor MODIS apresentou maiores correlações significativas com as variáveis meteorológicas e grande potencial para análises de ocorrências de seca para regiões com alta densidade de biomassa como florestas nativas.

- Nos anos de 2007, 2013 e 2015 ocorreram secas de ordem severa e extrema em maiores extensões em relação às demais estações do ano.

- O Índice de Condição da Vegetação apresentou-se adequado para monitoramento de ocorrências de seca na área de estudo, apresentando boa correlação com a temperatura da superfície da terra e concordância com a variabilidade climática e em maior parte dos anos com as ocorrências dos fenômenos El Niño e La Niña.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, p. 452-480, 2015.

ALLEN, R.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: **FAO** (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 56), 1998. 300p

ALLEN C. D; MACALADY, A. K.; CHENCHOUNI, H.; BACHELET, D.; MCDOWELL, N.; VENNETIER, M.; KITZBERGER, T.; RIGLING, A.; BRESHEARS, D. D.; HOGG, E. H.; GONZALEZ, P.; FENSHAM, R.; ZHANG, Z.; CASTRO, J.; DEMIDOVA, N.; LIM, J. H.; ALLARD, G.; RUNNING, S. W.; SEMERCI, A.; COBB, N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 660-684, 2010.

ALMEIDA, A. Q.; SILVA G. F.; PEZZOPANE, J. E. M.; RIBEIRO C. A. D. Enhanced vegetation index (EVI) na análise da dinâmica da vegetação da Reserva Biológica de Sooretama, ES. **Revista Árvore**, v. 32, n. 6, p. 1099-1107, 2008.

ANDERSON, M. C.; NORMAN, J. M.; MECIKALSKI, J. R.; OTKIN, J. A.; KUSTAS, W. P. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 1. Model formulation. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, p. 1-17, 2007.

ARATO, H. D.; MARTINS, S. V.; FERRARI, S. H. S. Produção e decomposição de serapilheira em um sistema agroflorestal implantado para recuperação de área degradada em Viçosa, MG. **Revista Árvore**, v. 27, n. 5, p. 715-721, 2003.

ASNER, G. P.; ALENCAR, A. Drought impacts on the Amazon forest: The remote sensing perspective. **New Phytologist**, v. 187, p. 569-578, 2010.

BAYARJARGAL, Y.; KARNIELI, A.; BAYASGALAN, M.; KHUDULMUR, S.; GANDUSH, C.; TUCKER, C. J. A comparative study of NOAA–AVHRR derived drought indices using change vector analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 105, p. 9-22, 2006.

BECKMANN, M. Z.; DUARTE, G.; BURCK, R.; PAULA, V. A. Radiação solar em ambiente protegido cultivado com tomateiro nas estações verão-outono do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 36, n. 1, p. 86-92, 2006.

BETTOLLI, M. L.; CARMEN, M. A. A. D.; BRASESCO, G. C.; RUDORFF, F.; ORTIZ, A. M.; ARROYO, J.; ARMOA, J. Pastura natural de salto (Uruguay): relación con la variabilidad climática y análisis de contextos futuros de cambio climático. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 248-259, 2010.

BHUIYAN, C.; KOGAN, F.N. Monsoon dynamics and vegetative drought patterns in the Luni basin under rain-shadow zone. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 12, p. 3223-3242, 2010.

BORCHERT, R.; RIVERA, G.; HAGNAUER, W. Modification of vegetative phenology in a tropical semi-deciduous forest by abnormal drought and rain. **Biotropica**, São Paulo, v. 34, p. 27-39, 2002.

BOTA, J.; MEDRANO, H.; FLEXAS, J. Is photosynthesis limited by decreased Rubisco activity and RuBP content under progressive water stress? **New Phytologist**, v. 162, p. 671-681, 2004.

BROWN, J. F., WARDLOW, B. D., TADESSE, T., HAYES, M. J., REED, B. C. The Vegetation Drought Response Index (VegDRI): a new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation. **GIScience & Remote Sensing**, v.45, p. 16-46, 2008.

CALEGARI, L.; MARTINS, S. V.; GLERIANI, J. M.; SILVA, E.; BUSATO, L. C. Análise da dinâmica de fragmentos florestais no município de Carandaí, MG, para fins de restauração florestal. **Revista Árvore**, v. 34, n. 5, p. 871-880, 2010.

CARON, B.O.; SCHMIDT, D.; MANFRON, P.A.; BEHLING, A.; ELOY, E.; BUSANELLO, C. Eficiência do uso da radiação solar por plantas *Ilex paraguariensis* cultivadas sob sombreamento e a pleno sol. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 2, p. 257-265, 2014.

CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought - From genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**, v. 30, p. 239-264, 2003.

DHORDE, A. G.; PATEL, N. R. Spatio-temporal variation in terminal drought over western India using dryness index derived from long-term MODIS data. **Ecological Informatics**, v. 32, p. 28-38, 2016.

DIAS, H. C. T.; OLIVEIRA FILHO, A. T. Variação temporal e espacial da produção de serapilheira em uma área de floresta estacional semidecídua Montana em Lavras-MG. **Revista Árvore**, v. 21, n. 1, p. 11-26, 1997.

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.

FONSECA, L. P. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. **Agronomía Colombiana**, v. 27, n. 2, p.179-191, 2009.

GARAY, I.; RIZZINI, C. M.; KINDEL, A. AGAREZ, F. V.; LOUZADA, M. A. P.; SANTOS, R. D.; VICENS, R. S. **Floresta atlântica de tabuleiros: diversidade funcional da cobertura arbórea**. Petrópolis - RJ, Editora vozes, 2003. 56p.

GHOBADI, Y.; PRADHAN, B.; SHAFRI, H. Z. M.; KABIRI, K. Assessment of spatial relationship between land surface temperature and landuse/cover retrieval from multi-temporal remote sensing data in South Karkheh Sub-basin, Iran. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, p. 1-13, 2013.

GITELSON, A. A.; KOGAN, F.N.; ZAKARIN, E.; SPIVAK, L.; LEBED, L. Using AVHRR data for quantitative estimation of vegetation conditions: calibration and validation. **Advances in Space Research**, v. 22, p. 673-676, 1998.

GRIMM, A. M.; TEDESCHI, R. G. Influência de eventos El Niño e La Niña sobre a frequência de eventos extremos de precipitação no Brasil. In: Congresso brasileiro de meteorologia, 13. Fortaleza, 2004. **Anais...** Fortaleza: SBMET, 2004. CD-ROM.

GUISELINI, C.; SENTELHAS, P. C.; PANDORFI, H.; HOLCMAN, E. Manejo da cobertura de ambientes protegidos: Radiação solar e seus efeitos na produção da gérbera. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 6, p. 645-652, 2010.

GUTIÉRREZ, A. P. A.; ENGLE, N.L.; NYS, E.de.; MOLEJÓN, C.; MARTINS, E. S. Drought preparedness in Brazil. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, p. 95-106, 2014.

HEIM JÚNIOR, R. R. J. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, p. 1149-1165, 2002.

HOFFMANN, W. A.; SCHROEDER, W.; JACKSON, R.B. Regional feedbacks among fire, climate, and tropical deforestation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 108, p. 4721, 2003.

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

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

INPE- Instituto Nacional de Análise Espacial. Fenômenos ENOS (El Niño-Oscilação Sul). INPE, 2016. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 10 mai. 2016.

JANG, J. D.; VIAU, A. A.; ANCTIL, F. Thermal-water stress index from satellite images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, p. 1619-1639, 2006.

JI, L.; PETERS, A. J. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 85-98, 2003.

JULIEN, Y.; SOBRINO, J. A. The Yearly Land Cover Dynamics (YLCD) method: An analysis of global vegetation from NDVI and LST parameters. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 2, p. 329-334, 2009.

JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, D. P.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V. V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R. B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; WAN, Z.; HUETE, A. R.; LEEUWEN, W. V.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J.

P.; LEWIS, P.; BARNESLEY, M. J. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change research. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228-1249, 1998.

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. 02, p. 03-15, 2002.

KEYANTASH, J.; DRACUP, J. A. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, p. 1167-1180, 2002.

KOGAN, F. N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. **Advances in Space Research**, v. 15, n. 11, p. 91-100, 1995.

LAMBERS, H.; CHAPIN, F. S.; PONS, T. L. Plant physiological ecology. New York: Springer, 2008. 604 p.

LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; VICTORIA, D. C.; TORRESAN, F. E.; VICENTE, L. E.; TEIXEIRA, A. H. C.; BOLFE, E. L.; BARROS, T. R. Avaliação do índice de vegetação padronizado no monitoramento indicativo de estiagens em períodos críticos da soja no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 5, n. 66, p. 1145-1155, 2014.

LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER - LPDAAC. **MODIS**. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/modis_overview>. Acesso em: 22 mar. 2016.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim - CA, USA,; American Meteorological Society: Boston, MA, USA; p. 179-183, January 1993.

MORAN, M. S.; CLARKE, T. R.; INOUE, Y.; VIDAL, A. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, p. 246-263, 1994.

NARASIMHAN, B.; SRINIVASAN, R.; WHITTAKER, A. D. Estimation of potential evapotranspiration from NOAA-AVHRR satellite. **Applied Engineering Agriculture**, v. 19, p. 309-318, 2003.

NEPSTAD, D. C.; TOHVER, I. M.; RAY, D.; MOUTINHO, P.; CARDINOT, G. Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest. **Ecology**, v. 88, p. 2259-2269, 2007.

NOBRE, A. D. O futuro climático da Amazônia. INPE, 2014. Disponível em: <<http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/pt/noticias/428-o-futuro-climatico-da-amazonia>>. Acesso em: 19 jun. 2016.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Disponível em: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml>. Acesso em: 19 mar. 2016.

PALMER, W. C. Meteorological Drought. US Department of Commerce, Weather Bureau: Washington, DC, USA, 1965. p. 58.

PASHO, E.; CAMARERO, J. J.; LUIS. M. de; SERRANO S. M. V. Impacts of drought at different time scales on forest growth across a wide climatic gradient in north-eastern Spain. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, p. 1800-1811, 2011.

PEARSON, R. G.; DAWSON, T. P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? **Global Ecology and Biogeography**, v. 12, p. 361-371, 2003.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações prática**. Guaíba: Livraria e editora agropecuária, 2002. 478 p.

PEREIRA, M. R. R.; SOUZA, G. S. F.; RODRIGUES, A. C. P.; MELHORANÇA FILHO, A. L.; KLAR, A. E. Análise de crescimento em clones de eucalipto submetidos a estresse hídrico. **Irriga**, v.15, n.1, p. 98-110, 2010.

PHILLIPS, O. L.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LEWIS, S. L.; FISHER, J. B.; LLOYD, J.; GONZÁLEZ, G. L.; MALHI, Y.; MONTEAGUDO, A.; PEACOCK, J.; QUESADA, C. A.; VAN DER HEIJDEN, G. ALMEIDA, S.; AMARAL, I.; ARROYO, L.; AYMARD, G.; BAKER, T. R. ; BÁNKI, O.; BLANC, L.; BONAL, D.; BRANDO, P.; CHAVE, J.; OLIVEIRA, A. C.; CARDOZO, N. D.; CZIMCZIK, C. L.; FELDPAUSCH, T. R.; FREITAS, M. A.; GLOOR, E.; HIGUCHI, N.; JIMÉNEZ, E.; LLOYD, G.; MEIR, P.; MENDOZA, C.; MOREL, A.; NEILL, D. A.; NEPSTAD, D.; PATIÑO, S.; PEÑUELA, M. C.; PRIETO, A.; RAMÍREZ, R. SCHWARZ, M.; SILVA, J. SILVEIRA, M.; THOMAS, A. S.; TER STEEGE, H.; STROPP, J.; VÁSQUEZ, R.; ZELAZOWSKI, P.; DÁVILA, E. A.; ANDELMAN, S.; ANDRADE, A.; CHAO, K. J.; ERWIN, T.; DI FIORE, A.; CORONADO, E. N. H.; KEELING, H.; KILLEEN, T. J.; LAURANCE, W, F.; CRUZ, A. P.; PITMAN, N. C.; VARGAS, P. N.; RAMÍREZ-ANGULO, H.; RUDAS, A.; SALAMÃO, R.; SILVA, N.; TERBORGH, J.; TORRES-LEZAMA, A. Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. **Science**, v. 323, p. 1344-1347, 2009.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2º Ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012. 160p.

POTIS, A. R. Rubisco activase-Rubisco's catalytic chaperone. **Photosynthesis Research**, v. 75, p. 11-27, 2003.

QUIRING, S. M.; PAPAKRYIAKOU, T. N. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 118, p. 49-62, 2003.

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, p. 330-339, 2010.

RAY, J. D.; GESCH, R. W.; SINCLAIR, T. R.; ALLEN, L. H. The effect of vapor pressure deficit on maize transpiration response to a drying soil. **Plant and Soil**, v. 239, n. 1, p. 113-121, 2002.

RHEE, J.; IM, J.; CARBONE, G. J. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 2875-2887, 2010.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. In Progress Report RSC 1978-1; Remote Sensing Center, Texas A e M University: College Station, TX, USA, 1974.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SCHUMACHER, M. V.; TRÜBY, P.; MARAFIGA, J. M.; VIERA, M.; SZYMCZAK, D. A. Espécies predominantes na deposição de serapilheira em fragmento de Floresta Estacional Decidual no Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 479-486, 2011.

SERRANO, S. M. V. Evaluating the impact of drought using remote sensing in a Mediterranean, semi-arid region. **Natural Hazards**, v. 40, p. 1730-208, 2007.

SHAO, H. CHU, L. Y.; JALEEL, C. A.; ZHAO, C. X. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. **Comptes Rendus Biologies**, v. 331, n. 3, p. 215-225, 2008.

SHAO, H.; CHU, L.; JALEEL, C.A.; MANIVANNAN, P.; PENNEERSELVAM, R.; SHAO, M.A. Understanding water deficit stress-induced changes in the basic metabolism of higher plants—biotechnologically and sustainably improving agriculture and the ecoenvironment in arid regions of the globe. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 29, n. 2, p. 131-151, 2009.

SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Gene networks involved in drought stress response and tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, p. 221-227, 2007.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848p.

TANG, H.; LI, Z. L. **Quantitative remote sensing in thermal infrared**. Berlin: Springer, 2014. 298 p. (Springer Remote Sensing/Photogrammetry). ISBN 978-3-642-42027-6. Acesso Em: 28 abr. 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-42027-6>>.

UHL, C.; KAUFFMAN, J. B. Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern Amazon. **Ecology**, v. 71, p. 437-449, 1990.

VENDRAMI, J. P.; JURINITZ, C. F.; CASTANHO, C. T. Litterfall and leaf decomposition in forest fragments under different successional phases on the Atlantic Plateau of the state of São Paulo, Brazil. **Biota Neotropica**, v. 12, n. 3, p. 136-143, 2012.

WAN, Z.; WANG, P.; LI, X. Using MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index products for monitoring drought in the southern Great Plains. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 1, p. 61-72, 2004.

WELCKER, C.; SADOK, W.; DIGNAT, G.; RENAULT, M.; SALVI, S.; CHARCOSSET, A.; TARDIEU, F. A common genetic determinism for sensitivities to soil water deficit and evaporative demand: Meta-analysis of quantitative trait loci and introgression lines of maize. **Plant Physiology**, v. 157, p. 718-729, 2011.

WENG, Q. LU, D.; SCHUBRING, L.; Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **International Journal of Remote Sensing of Environment**, v. 89, p. 467-483, 2004.

WU, J.; ZHOU, L.; LIU, M.; ZHANG, J.; LENG, S.; DIAO, C. Establishing and assessing the Integrated Surface Drought Index (ISDI) for agricultural drought monitoring in mid-eastern China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 23, p. 397-410, 2013.

XAVIER, A. C.; SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, v. 26, n. 4, p. 421-427, 2002.

YUE, W.; XU, J.; TAN, W.; XU, L. The relationship between land surface temperature and NDVI with remote sensing: application to Shanghai landsat & ETM+ data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, p. 3205-3226, 2007.

ZANCHI, F. B.; WATERLOO, M. J.; AGUIAR, L. J. G.; VON RANDOW, C.; KRUIJT, B.; CARDOSO, F. L.; MANZI, A. O. Estimativa do índice de área foliar (IAF) e biomassa em pastagem no estado de Rondônia, Brasil. **Acta Amazônica**, v. 39, n. 2, p. 335-348, 2009.

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.

CAPÍTULO II

ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE TENDÊNCIAS DA VEGETAÇÃO NA RESERVA BIOLÓGICA DE SOORETAMA E ZONA DE AMORTECIMENTO, ES

ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE TENDÊNCIAS DA VEGETAÇÃO NA RESERVA BIOLÓGICA DE SOORETAMA E ZONA DE AMORTECIMENTO, ES

RESUMO

O desenvolvimento da vegetação é considerado um indicador chave para o entendimento sobre o estado de um ecossistema, responsável por regular o balanço de energia, ciclo da água e carbono e o ciclo biogeoquímico na superfície terrestre. Foram utilizados os índices EVI e NDVI do produto MOD13Q1, com resolução temporal de 16 dias e espacial de 250m. Esses índices foram utilizados com o propósito de representar a dinâmica da biomassa da área de estudo ao longo do seu ciclo anual e a ocorrência de tendências nos parâmetros sazonais dos ciclos anuais e inter-anuais. O processamento e análise das tendências de comportamento dos índices de vegetação, foi realizado com auxílio do módulo *Earth Trends Modeler* (ETM), no *software* TerrSet. Esse módulo foi elaborado especialmente para análise de tendências e características dinâmicas dos fenômenos ambientais, com base em séries temporais. As tendências temporais no conjunto de dados foram examinadas, pixel por pixel, aplicando-se a técnica de monotônica de Mann-Kendall, tratando cada pixel no espaço como uma série temporal unidimensional de ciclos de 16 dias. Para a análise de tendência sazonal foi utilizada a técnica de STA (*Seasonal Trend Analysis*) implementada no módulo ETM. Com isso, considerou-se a utilização de dois harmônicos, a fim de reduzir e evitar a influência de ruídos, normalmente associados a harmônicos de ordem superior. Constatou-se que grande parte da área estudada apresenta valores negativos de tau de Mann-Kendall para os dois índices de vegetação, no entanto, observa-se que existe maior tendência negativa para o EVI, indicando tendência de maior decréscimo de biomassa para este índice ao longo da série avaliada. Para o índice NDVI, nota-se uma parcela significativa de valores próximos de zero, porém negativos em sua maioria, relacionados à leve diminuição do vigor da vegetação quando comparados com os valores de NDVI ou ausência de tendência. Tendências estatisticamente significativas, segundo o teste de significância de Mann-Kendall, são mais evidenciadas na série temporal do índice EVI, ocupando grande extensão da área de estudo (65,19% dos pixels) em relação ao índice NDVI (53,01% dos pixels), no qual, esse por sua vez, apresentou padrão mais heterogêneo na disposição dos pixels significativos e não significativos. Após análise STA, observou-se que o padrão encontrado indicou correspondência típica para verões chuvosos e invernos secos, uma vez que, o máximo de desenvolvimento vegetativo anual para o EVI destacou-se no verão, e o mínimo foi mais pronunciado no final do inverno. Por outro lado, o NDVI não apresentou o mesmo padrão sazonal do EVI, indicando picos do vigor vegetativo máximo no inverno e mínimo na primavera, não apresentando correspondência com a sazonalidade climática da região. Os valores de média anual de EVI e NDVI e sua diminuição ao longo dos anos apresentaram concordância com o decréscimo da precipitação e aumento da temperatura e deficiência hídrica.

Palavras-chave: índice de vegetação; dinâmica; clima

SPACE-TEMPORAL ANALYSIS OF VEGETATION TRENDS IN SOORETAMA BIOLOGICAL RESERVE AND DAMPING ZONE, ES

ABSTRACT

The development of vegetation is considered a key indicator for understanding of the state of an ecosystem, responsible for regulating the energy balance, water and carbon cycle and biogeochemical cycle in the Earth's surface. Was used the EVI and NDVI indexes of the MOD13Q1 product, TST of the MOD11A2 product, with temporal resolution of 16 days and spatial of 250m. These indexes were used in order to represent the dynamics of the biomass of the study area throughout its annual cycle and the occurrence of seasonal trends in the parameters of annual and inter-annual cycles. The processing and analysis of the behavior trends of vegetation indexes, was done with the Earth Trends Modeler module (ETM), in TerrSet software. This module was developed especially for trend analysis and dynamic characteristics of environmental phenomena, based on time series. The Temporal trends in the data set was examined, pixel by pixel, by applying of the Mann-Kendall monotonic technique, treating each pixel in space as a one-dimensional temporal serie of 16-day cycles. To the seasonal trend analysis was used to STA technique (Seasonal Trend Analysis) implemented in ETM module. Thus, it considered the use of two harmonics in order to reduce and prevent the influence of noise, normally associated with higher order harmonics. It was found that much of the area studied has negative values of tau Mann-Kendall for the two vegetation index, however, it is observed that there is a greater negative trend for the EVI, indicating a trend of greater biomass decrease for this index over of the evaluated serie. For the NDVI index, there is a significant portion of values close to zero, but negative mostly, related to a slight decrease of vegetation force when compared to NDVI values or absence of trend. Statistically significant trends, according to Mann-Kendal significance test are more evidenced in the time series EVI index, occupying a large extent of the study area (65.19% of pixels) relative to NDVI index (53.01% of pixels), in which, this in turn, presented a more heterogeneous pattern in the arrangement of significant and insignificant pixels. After STA analysis, its noted that the found pattern indicated typical correspond to rainy summers and dry winters, since the maximum annual vegetative development for EVI its highlighted in the summer, and the minimum is more pronounced in late winter. Moreover, the NDVI did not show the same seasonal pattern of EVI, indicating peaks of the maximum vegetative force in the winter and minimum in the spring, no presenting correspondence with the seasonality of the region. The annual average values of EVI and NDVI and its decrease over the years showed agreement with the decreasing of rainfall and increasing of temperature and water deficiency.

Keywords: vegetation index; dynamics; climate

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, um considerável interesse tem sido focado sobre tendências na fenologia da vegetação. Parte desse interesse deriva da possibilidade do uso da resposta fenológica da vegetação como indicador das mudanças climáticas devido à sensibilidade da dinâmica da vegetação às variáveis climáticas (MENZEL; FABIAN, 1999; WHITE et al., 2009).

O desenvolvimento da vegetação é indicador chave para o entendimento sobre o estado de um ecossistema, responsável por regular o balanço de energia, ciclo da água e carbono e o ciclo biogeoquímico na superfície terrestre por meio da relação entre a fotossíntese, respiração, transpiração, albedo da superfície e rugosidade auxiliando na compreensão das mudanças climáticas (JACKSON et al., 2008; SOBRINO; JULIEN, 2011; WANG et al., 2011).

De acordo com Jong e Bruin et al. (2012), a variabilidade da dinâmica da vegetação compreende as mudanças sazonais, de tendência gradual e alterações bruscas. As tendências graduais são mudanças que ocorrem de forma lenta no ambiente, podendo parar ou reverter em algum intervalo de tempo (JONG et al., 2012). Para Chen et al. (2014), este tipo de estudo pode ser realizado para um curto período de tempo, abrangendo séries de dados temporais inferiores a 30 anos.

Diante do exposto, torna-se cada vez mais importante o estudo da variabilidade espaço-temporal da vegetação que permita observar se as alterações no clima da região ou de alguns elementos climáticos são acompanhadas por mudanças na amplitude e dimensão temporal dos padrões da vegetação predominante na região. Para esse tipo de análises, os dados provenientes de sensores remotos orbitais são de grande utilidade, pois oferecem retratos espaço-temporais abrangentes da dinâmica da vegetação (NEETI et al., 2012; FORKEL et al., 2013; JONG et al., 2013; CHEN et al., 2014).

Em análises de médio prazo (anos a décadas), os dados de resolução temporais moderadas do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) são especialmente adequados (HUETE et al., 2002; ZHANG et al., 2006). Estudos conduzidos em diversas regiões do globo têm demonstrado que as séries temporais de índice de vegetação do sensor MODIS, em especial EVI (HUETE et al., 1997) e NDVI (ROUSE et al., 1973), representam de forma adequada fenômenos na superfície da Terra em estudos de variabilidade temporal da vegetação (BEURS; HENEGBRY, 2010).

Estudos têm analisado as tendências dos índices de vegetação EVI e NDVI para inúmeros fins, desde mudanças de uso e cobertura do solo a mudanças fenológicas (LEEUWEN et al., 2006). Uma abordagem frequente é estabelecer tendências por meio do teste de tendência monotônica de Mann-Kendall e Análise de Tendência Sazonal, calculado em períodos anuais ou sazonais (EASTMAN et al., 2009; JONG; BRUIN, 2012; WAGNER et al., 2013; MISHRA; CHAUDHURI, 2015).

O teste de tendência Mann-Kendall é calculado classificando os dados de acordo com a data, computando todas as diferenças entre as medidas de um determinado ano e os do ano anterior, e, em seguida, contar o número de valores positivos e negativos. A soma destes valores indica a força e a direção de uma tendência (XU et al., 2007; BEURS et al., 2009).

A análise de tendências sazonais (STA) é um método que oferece avanços nas técnicas de análises temporais de imagens, o qual pode potencialmente identificar mudanças na vegetação enquanto caracterizam interações em diferentes escalas temporais através da decomposição em harmônicos associados às características de sazonalidades dos dados (EASTMAN et al., 2009).

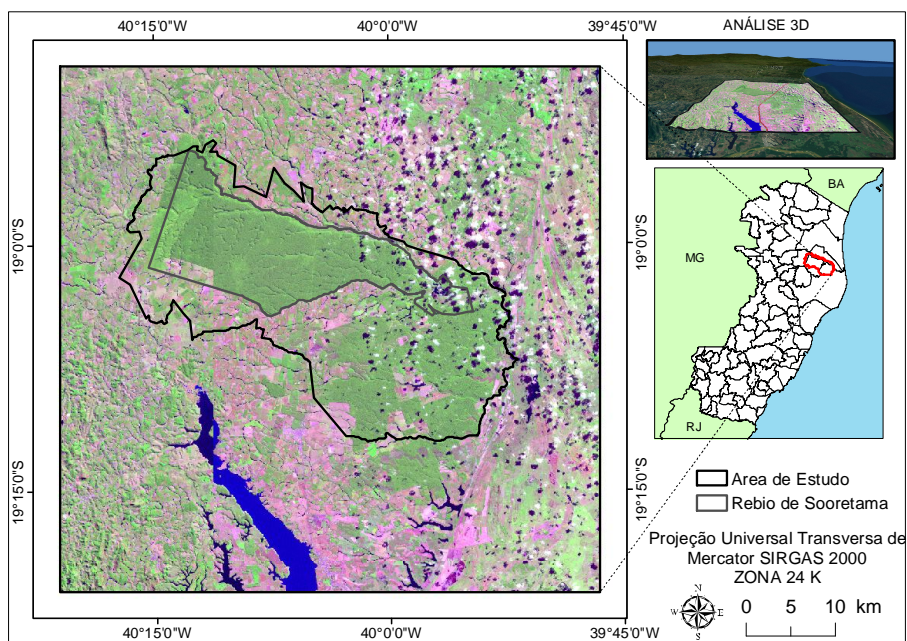
Diante do exposto, o objetivo dessa pesquisa foi analisar tendências temporais nos padrões de mudanças da vegetação nos índices EVI e NDVI, com uso dos métodos de tendência monotônica de Mann-Kendall e Análise de Tendência Sazonal, na Reserva Biológica de Sooretama e zona de amortecimento para o período de 2007 a 2015.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A pesquisa foi realizada na Reserva Biológica de Sooretama e sua zona de amortecimento localizada entre os paralelos 18°53'53"S e 19°30'00"S e os meridianos 39°50'00"W e 40°15'50"W, compreendendo os municípios de Sooretama, Jaguaré e Vila Valério ao norte do estado do Espírito Santo (Figura 2.1).

Figura 2.1 - Localização da Reserva Biológica de Sooretama e sua zona de amortecimento, ES.



Fonte: o autor

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Aw, isto é, tropical quente e úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno, com precipitação pluviométrica média anual de 1.390,81 mm, distribuída no período chuvoso de outubro a março, com médias de totais mensais variando entre 130 mm a pouco mais de 200 mm. No período mais seco, de abril a setembro, as precipitações não excedem 25% do total anual e temperatura média de 24,88 °C (GARAY et al., 2003; ALMEIDA et al., 2008).

2.2. Obtenção das imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS)

A série temporal de imagens foi obtida do banco de dados da EOSDIS (*NASA's Earth Observing System Data and Information System*), sendo identificadas em grade horizontal e vertical, formando células chamadas de *tiles*. Essas imagens são denominadas *ready-to-use* (prontos para serem utilizados), pois são obtidas com georreferenciamento e com correção atmosférica (LPDAAC, 2014), e foram adquiridas do período de 01 de janeiro de 2007 a 31 de dezembro de 2015 correspondentes ao *tile* h14v10, no qual se localiza a área de estudo.

Dentro dos diversos produtos disponíveis do sensor MODIS, foi utilizado os produtos MOD13Q1, que contém os índices NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*) com resolução temporal de 16 dias e espacial de 250m, e o MOD11A2 que contém imagens de Temperatura da Superfície da Terra (TST) com resolução temporal de 8 dias e espacial de 1 km. Como os dados originais do produto MOD11A2 são fornecidos em Kelvin, foi necessário utilizar um fator de conversão para que os dados das imagens fossem transformados para graus Celsius. Esses conjunto de dados MODIS são obtidos na versão V005 (HUETE et al., 2002), no formato HDF (*Hierarchy Data Format*), no qual cada imagem cobre uma área de 10 x 10 graus (1200 x 1200 km).

2.3. Processamento das imagens

Todos os produtos do sensor MODIS são originalmente disponibilizados na projeção *senoidal* e formato *Hierarchical Data Format* (HDF), e estes foram convertidos para o sistema de projeção UTM (Universal Transversa de Mercator), *datum* horizontal WGS 84 e gravadas em formato TIFF (*Tagged Image File Format*) por meio do programa *MODIS Reprojection Tool* (MRT).

Após a etapa de processamento no software MRT, as imagens NDVI e EVI, originalmente com valores digitais no intervalo de -10,000 a 10,000 foram reescaladas para o intervalo -1 a +1 através da divisão pelo seu fator de escala (10,000). Esses processamentos foram realizados no software ArcGIS 10.2.2.

Em relação às imagens TST, que vem originalmente com valores variando de 7500 a 65535 °K, essas foram multiplicadas pelo seu fator de escala (0,02) e, posteriormente obtidas os valores de temperatura em graus Celsius para cada

imagem (Equação 1). Após essa etapa, foi efetuado o recorte correspondente à área de estudo em todas as imagens EVI, NDVI e TST das séries temporais, utilizando como máscara o dado vetorial da zona de amortecimento da Reserva Riológica de Sooretama. Esses processamentos foram realizados no software ArcGIS 10.2.2.

$$P (^{\circ}\text{C}) = (B1 * 0,02) - 273,15 \quad (\text{Eq.1})$$

Em que:

P ($^{\circ}\text{C}$) - é o valor do pixel em graus Celsius e;

B1 - é o valor original do pixel em graus Kelvin

Como as imagens TST corresponde a um período de 8 dias (46 imagens por ano), isto é, a média de temperatura de 8 dias, cada imagem foi agregada com a imagem posterior e obtida a média correspondente a 16 dias. Esse procedimento foi feito considerando os dias julianos de cada imagem de índice de vegetação, obtendo assim um conjunto de 23 imagens de TST para cada ano.

Após essa etapa, as imagens foram importadas, em formato .img para o software TerrSet e criado um arquivo de série temporal para cada grupo de imagens, NDVI, EVI e TST no qual cada série consiste em um par de arquivos: Um arquivo de varredura contendo as imagens da série de tempo, em formato .rgf e um arquivo de documentação que descreve as características temporais da série, em formato .tsf.

Com o intuito de preencher os dados faltantes nas imagens representativas das séries temporais (Valores NoData, referentes aos pixels espúrios), foram utilizadas etapas sucessivas de interpolação. Primeiramente, procedeu-se com a interpolação espacial, na qual os valores dos pixels são preenchidos de acordo com os valores médios dos pixels vizinhos, em janelas 3 x 3. Esse método só preenche o valor do pixel caso a maioria dos seus vizinhos possua um valor válido.

Posteriormente, aplicou-se o método de interpolação linear, no qual o preenchimento do valor do pixel baseia-se nos valores médios do mesmo pixel em imagens anteriores e posteriores à data a ser preenchida. O preenchimento é realizado de forma linear, porém só são preenchidos dados até uma lacuna máxima permitida. Por fim, foi utilizado o método de interpolação por média temporal ou climatologia. Por meio desse método, os valores ainda ausentes são preenchidos de acordo com uma mediana em longo prazo dos valores das imagens da série temporal.

Chen et al. (2014), ao utilizarem dados de NDVI do satélite NOAA, produto GIMMS, para estudar tendências de comportamento da vegetação, procederam de forma análoga, ao eliminarem os pixels sinalizados como neve ou nuvens nas imagens e posteriormente utilizarem técnicas de interpolação para preenchimento das lacunas.

2.4. Processamento e análise das tendências nas séries temporais

O processamento e análise das tendências de comportamento dos índices de vegetação foi realizado com auxílio do módulo *Earth Trends Modeler* (ETM), no software TerrSet. Esse módulo foi elaborado especialmente para análise de tendências e características dinâmicas dos fenômenos ambientais, com base em séries temporais.

2.4.1. Tendência monotônica de Mann-Kendal

As tendências temporais no conjunto de dados foram examinadas, pixel a pixel, aplicando-se a técnica monotônica de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975), tratando cada pixel no espaço como uma série temporal unidimensional de ciclos de 16 dias.

Para este modelo de tendência, foi estimado o coeficiente tau (τ) por meio da Equação 2 (MANN, 1945; KENDALL, 1975):

$$\tau = 2s / [n(n - 1)] \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que,

τ = tau de Mann-Kendal;

s = sinal;

n = número de elementos da série temporal.

$$\text{sinal}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1, & \text{se}(x_i - x_j) < 0, \\ 0, & \text{se}(x_i - x_j) = 0, \\ -1, & \text{se}(x_i - x_j) > 0 \end{cases}$$

x_i e x_j = dados estimados da sequência de valores;

Os valores de τ variam de -1 a 1 e medem o grau com que uma tendência está aumentando ou diminuindo consistentemente. Valores positivos indicam tendência de aumento e valores negativos indicam tendência de decréscimo. O teste de tendência Mann-Kendall é calculado classificando os dados de acordo com a data, computando todas as diferenças entre as medidas de um determinado ano e os do ano anterior, e, em seguida, contar o número de valores positivos e negativos. A soma destes valores indica a força e a direção de uma tendência (XU et al., 2007; BEURS et al., 2009).

O teste de significância de Mann-Kendall foi considerado como avaliador da significância sendo que os valores positivos e negativos de tau de Mann-Kendall com significância $\alpha < 0,05$ representam aumento e diminuição significativos e $\alpha > 0,05$ representam tendência não significativa.

Posteriormente, as imagens de tendências e significância foram cruzadas com a imagem de uso da terra e perfis temporais de EVI e NDVI de modo a obter a relação existente entre eles. Além disso, foi obtida a correlação entre os índices de vegetação com as imagens de temperatura da superfície da terra, sendo os resultados mostrados na forma de mapas, expressando a correlação do momento produto de Pearson. A série correspondente a cada índice de vegetação foi considerada como a série dependente e a série temporal correspondente à TST foi considerada como série independente.

2.4.2. Análise de Tendência Sazonal (STA)

A análise de tendência sazonal foi obtida dos valores de NDVI e EVI para a área de estudo, a fim de compreender quando as mudanças nos valores desses índices estão ocorrendo nos anos (verão, inverno ou flutuante no ano) e obter a disposição espacial dos ciclos da vegetação.

Para essa etapa, foi utilizada a técnica de STA (*Seasonal Trend Analysis*) implementada no módulo ETM. Com isso, considerou-se a utilização de dois harmônicos, a fim de reduzir e evitar a influência de ruídos, normalmente associados a harmônicos de ordem superior (EASTMAN et al., 2009), e um número de 2 (dois) anos durante as primeiras e últimas imagens. Além disso, não foram aplicadas metodologias de remoção de ruídos, normalmente associados a contaminantes como a presença de nuvens, uma vez que foram utilizadas imagens da versão V005

do produto de índices de vegetação MODIS, na qual já foram aplicados algoritmos para esse fim em sua composição (DIDAN; HUETE, 2006).

A STA usa dois estágios no tempo e uma etapa final de visualização. No primeiro estágio, foi aplicada uma regressão harmônica em cada pixel no tempo e em cada ano nas séries temporais, de forma a extrair a média anual (Amplitude 0), o ciclo anual (Amplitude 1 e Fase 1) e o ciclo semi-anual (Amplitude 2 e Fase 2), conforme a equação 3.

$$y = \alpha_0 + \sum_{n=1}^{n=2} \alpha_n \sin \left(\frac{2 \pi t}{T} \right) + \varphi_n \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que:

y - é a variável resultante da soma dos harmônicos;

α_0 - é o termo constante de amplitude;

α_n - são amplitudes;

φ_n - são ângulos de fase variando de 0 a 359°;

n - é um harmônico (um multiplicador inteiro);

t - é o tempo; e

T - é o comprimento temporal das séries.

No segundo estágio, tendências nos cinco parâmetros foram analisadas através de procedimentos não-paramétricos, usando o operador de declividade da mediana de Theil-Sen. A mediana de todas as declividades foi usada para caracterizar a tendência, resultando finalmente, em cinco mapas de tendência, em cada um dos parâmetros A0, A1, A2, F1 e F2 que são agregados em composições coloridas.

Para uma interpretação interativa entre fases e amplitudes, composições coloridas foram geradas, de forma que cada canal RGB conteve uma das cinco tendências, associadas aos parâmetros da regressão harmônica. A primeira composição consistiu em uma combinação de bandas RGB, com tendências da Amplitude 0 em vermelho, tendências da Amplitude 1 em verde, e da Amplitude 2 em azul. A segunda composição combinou as tendências da Amplitude 0 em vermelho, tendências da Fase 1 em verde e da Fase 2 em azul. A cor predominante, portanto, estava associada ao(s) parâmetro(s) com maior intensidade positiva do

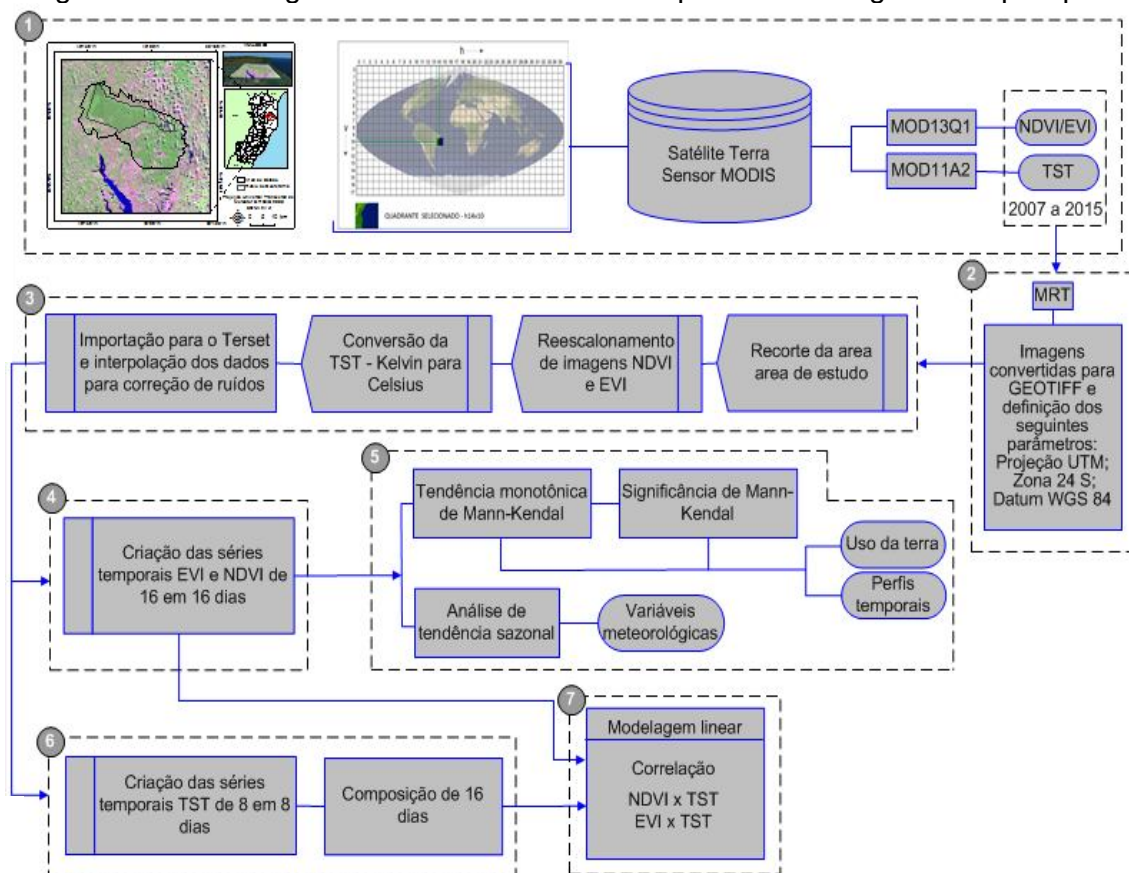
seu coeficiente de declividade da tendência mediana, e as cores permitiram encontrar áreas com tendências similares na sazonalidade. Colorações intermediárias ficaram associadas às misturas entre as intensidades de cada cor ou canal.

Utilizando a máscara da área de estudo foram extraídas, também, curvas sazonais derivadas das tendências, bem como, valores anuais correspondente à Amplitude 0. As curvas sazonais de tendências são curvas idealizadas que representam o começo e o fim de cada série de índice de vegetação.

Após essa etapa, a variação da média anual dos valores de EVI e NDVI foram comparados e relacionados com as tendências das variáveis meteorológicas temperatura, precipitação pluvial e deficiência hídrica (obtidas do INMET para a área de estudo e período considerado) de 2007 a 2015.

A Figura 2.2 simplifica as etapas metodológicas descritas acima necessárias para desenvolvimento do trabalho.

Figura 2.2 - Fluxograma com resumo das etapas metodológicas da pesquisa.



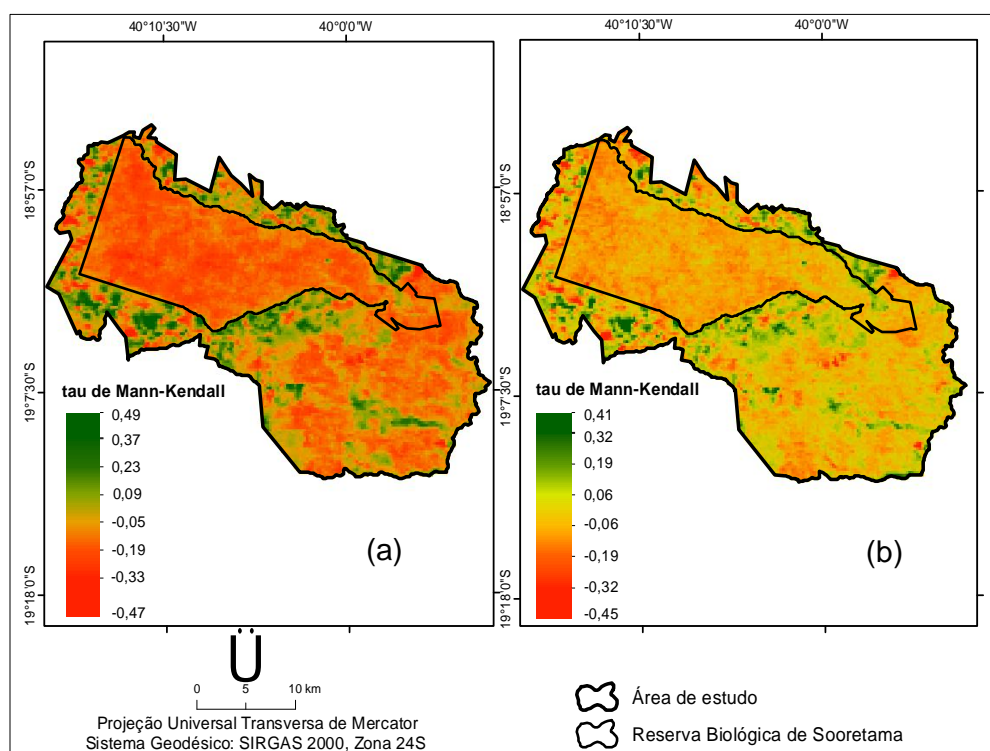
Fonte: o autor

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Tendência monotônica de Mann-Kendal

A Figura 2.3 mostra o coeficiente tau de Mann-Kendall pixel a pixel ao longo da série temporal (janeiro de 2007 a dezembro de 2015) para as imagens de EVI e NDVI. O teste de tendência monotônica de Mann-Kendall fornece um indicador de tendência (tau) que mede o grau com que uma tendência está aumentando ou diminuindo consistentemente, variando em um intervalo de -1 a 1, no qual os valores positivos indicam tendência de aumento e valores negativos indicam tendência de decréscimo.

Figura 2.3 – Estimação do coeficiente tau de Mann-Kendall obtida a partir da tendência monotônica aplicada nas séries de EVI (a) e NDVI (b).



Fonte: o autor

Na prática, a estatística Mann-Kendall mede a diferença entre a frequência relativa dos aumentos e das diminuições. Analisando-se a Figura 2.3, constatou-se que grande parte da área estudada apresenta valores negativos de tau de Mann-Kendall (τ) para os dois índices de vegetação, no entanto, observa-se que existem

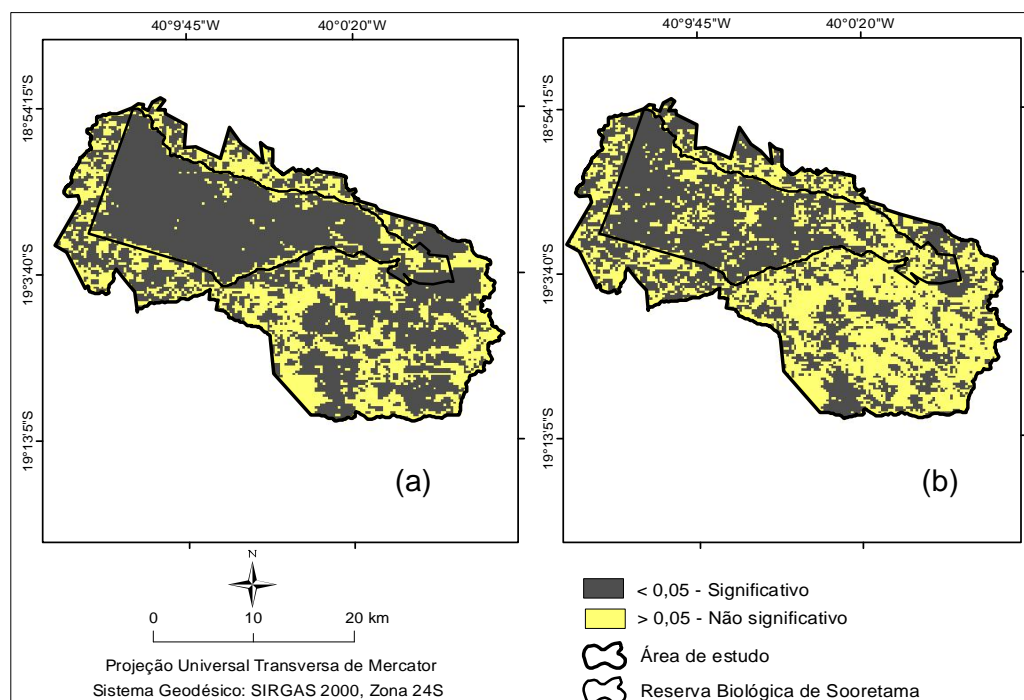
maiores valores de tau para o EVI, indicando tendência de maior decréscimo de biomassa para este índice ao longo da série avaliada. Para o índice NDVI, nota-se uma parcela significativa de valores próximos de zero, porém negativos em sua maioria, relacionados à uma leve diminuição do vigor da vegetação quando comparados com os valores de EVI.

Os valores positivos (tons verdes) indicam locais com tendência de aumento do vigor da vegetação, e estão relacionados principalmente às áreas de pastagem e agricultura da região. Por outro lado, foi constatado que os valores negativos de tendência de Mann-Kendall para ambos os índices foram evidenciados para as áreas que apresenta floresta natural, principalmente dentro da Reserva Biológica de Sooretama (Rebio de Sooretama) e reserva natural da Vale do Rio Doce. Os sinais negativos de τ corroboram com os resultados encontrados por Jong et al. (2011) ao calcularem tendências monotônicas negativas globais, em que utilizaram dados de índices de vegetação derivados do *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) do produto *Global Inventory Modeling and Mapping Studies* (GIMMS), no período de 1981-2006.

Wagner et al. (2013) ao avaliarem tendências temporais dos índices EVI e NDVI no campo dos Pampas do Brasil e Uruguai, por meio da tendência monotônica de Mann-Kendall, constataram que houve tendência decrescente para ambos os índices, relacionando esse resultado à combinação da ocorrência de déficit hídrico em solos rasos com sobrepastoreio, indicando alterações no padrão de cobertura vegetal do Pampa, com redução do vigor vegetativo.

As considerações com respeito a tendências precisam levar em conta se estas são estatisticamente significativas. Nesse sentido, a Figura 2.4 apresenta a localização das regiões com tendências estatisticamente significativas, segundo o teste de significância de Mann-Kendall em duas classes de p (menores do que 0,05 e maiores que 0,05).

Figura 2.4 - Significância de Mann-Kendall para as tendências dos índices de vegetação EVI (a) e NDVI (b).

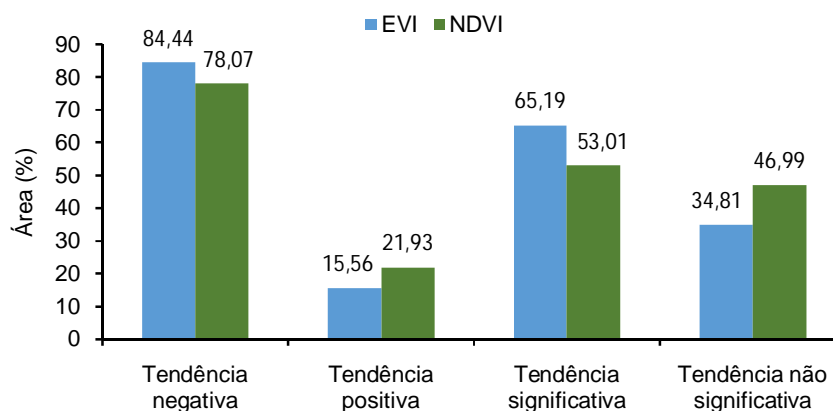


Fonte: o autor

Os resultados mostram que as regiões com tendências estatisticamente significativas, de acordo com as imagens de significância de Mann-Kendal, são mais evidenciadas na série temporal do índice EVI, ocupando grande extensão da área de estudo (65,19% dos pixels) em relação ao índice NDVI (53,01% dos pixels), no qual esse, por sua vez, apresentou padrão mais heterogêneo na disposição dos pixels significativos e não significativos, porém, com maior concentração na Reserva Biológica de Sooretama.

A Figura 2.5 apresenta o quantitativo em porcentagem das áreas com tendências positivas, negativas, significativas e não significativas.

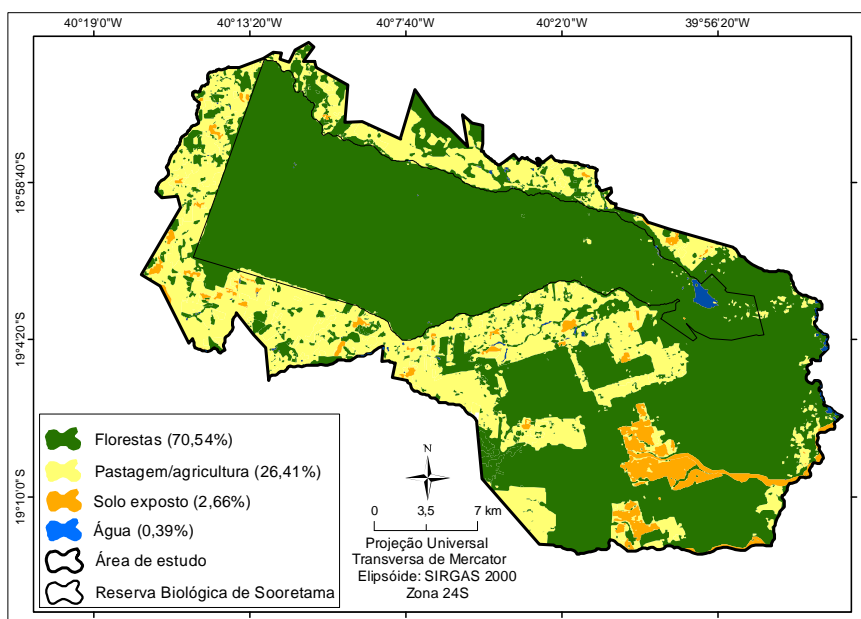
Figura 2.5 - Porcentagem das áreas que apresentaram tendências negativas, positivas, significativas e não significativas na Reserva Biológica de Sooretama e zona de amortecimento.



Fonte: o autor

Após cruzamento do mapa de uso da terra (Figura 2.6) com o índice que apresentou maior tendência significativa (EVI), constatou-se após análise da distribuição espacial que essas tendências compreendem principalmente as áreas de florestas presente na área de estudo e as não significativas às áreas de pastagem e agricultura, evidenciando a diminuição da biomassa nas áreas de florestas naturais.

Figura 2.6 - Uso da terra da área de estudo.



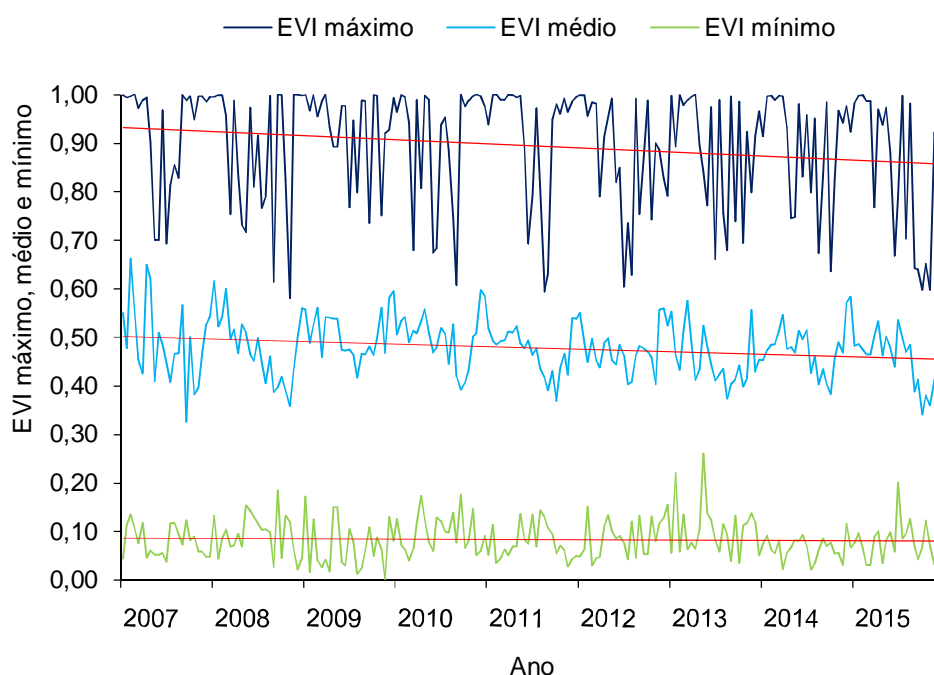
Fonte: o autor

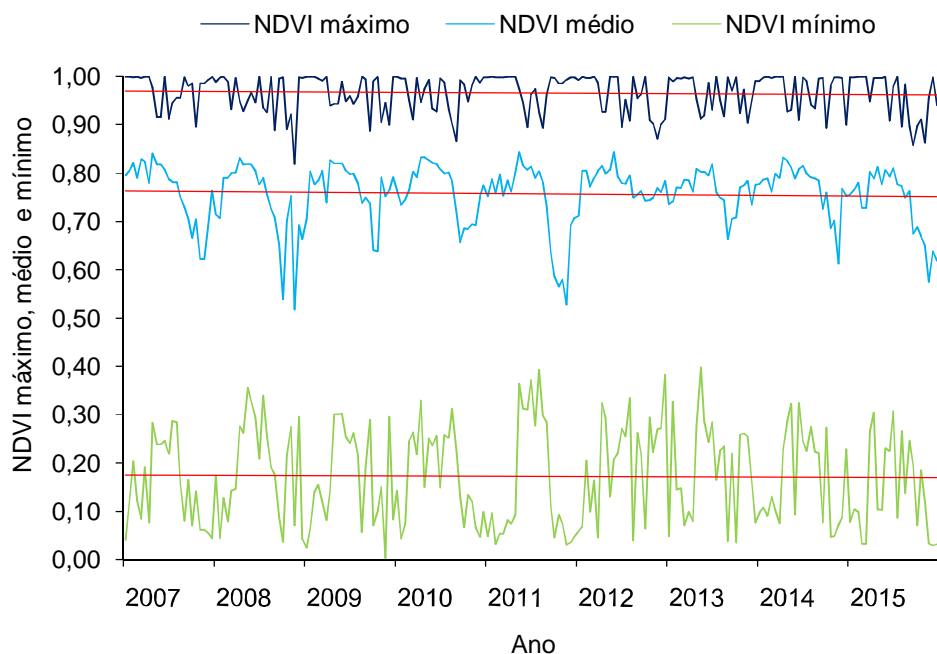
As tendências não significativas concentradas nas áreas de pastagem, agricultura e, em menor extensão, em solo exposto podem ser explicadas pelo ciclo anual das culturas agrícolas e pelo crescimento e perda da biomassa de pastagem. Possivelmente, em função disso essas classes não apresentaram padrão definido de tendência ao longo do período analisado, ou seja, devido as alternâncias de perda e ganho de biomassa nessas áreas ao longo do período estudado.

De modo geral, observa-se uma predominância de tendência negativa do vigor da vegetação, isto é, diminuição da biomassa ao longo do período de estudo. Estes resultados apresentam correspondência quando comparados com os perfis espectrais dos índices de vegetação (Figura 2.7), em especial o EVI que apresentou maiores áreas de significância na sua tendência.

Ao longo da série temporal, é notável a diminuição dos valores médios e máximos de EVI e uma suave tendência de diminuição para os valores mínimos. Para o índice NDVI, nota-se leve diminuição para os valores médios ao longo da série, por outro lado, não ocorre tendência expressiva para os valores mínimos e máximos, corroborando com os resultados da tendência monotônica de Mann-Kendal.

Figura 2.7 - Perfis espectrais temporais dos valores máximos, médios e mínimos de EVI e NDVI para o período de 2007 a 2015.

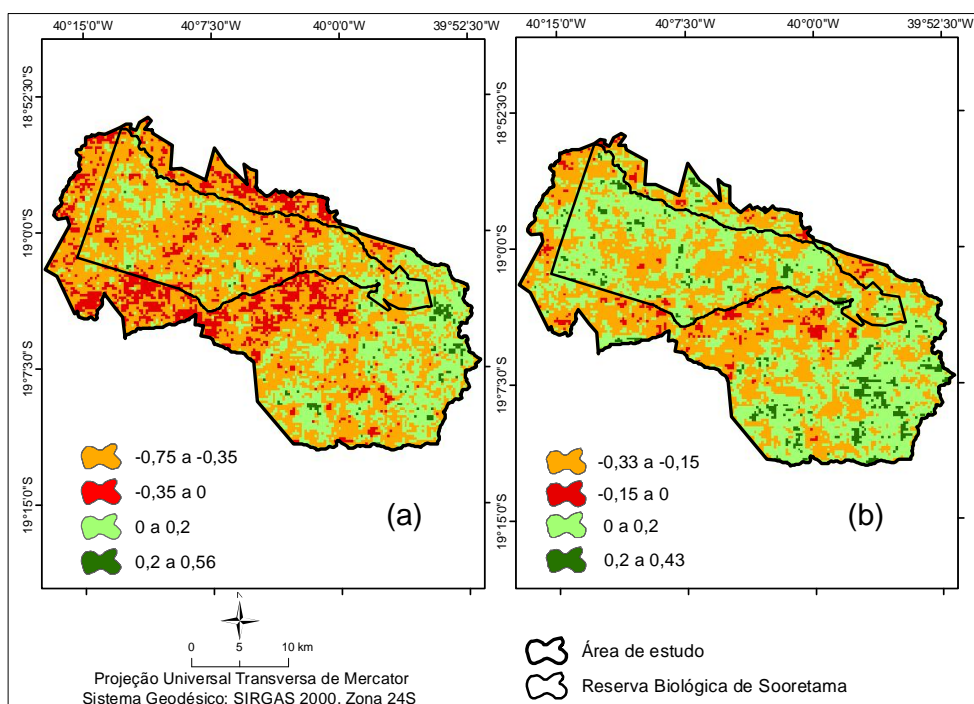




Fonte: O autor

Para reforçar os resultados obtidos, a Figura 2.8 apresenta a correlação entre as imagens EVI e NDVI com a Temperatura da Superfície da Terra (TST).

Figura 2.8 – Correlação espaço-temporal entre as séries de imagens EVI (a) e NDVI (b) com TST.



Fonte: O autor

Observa-se que, para a relação do EVI com TST, houve correlações negativas de até -0,75, compreendendo grande parte da área de estudo, especialmente a Reserva Biológica de Sooretama, indicando relação inversa, isto é, com o aumento da TST ocorre redução da produção de biomassa, do índice de área foliar e do vigor da vegetação refletida nas imagens de EVI associado ao déficit hídrico. Ocorreram valores de correlação positiva para esta relação, porém, as áreas de ocorrências apresentam similaridades com as áreas de tendências não significativas.

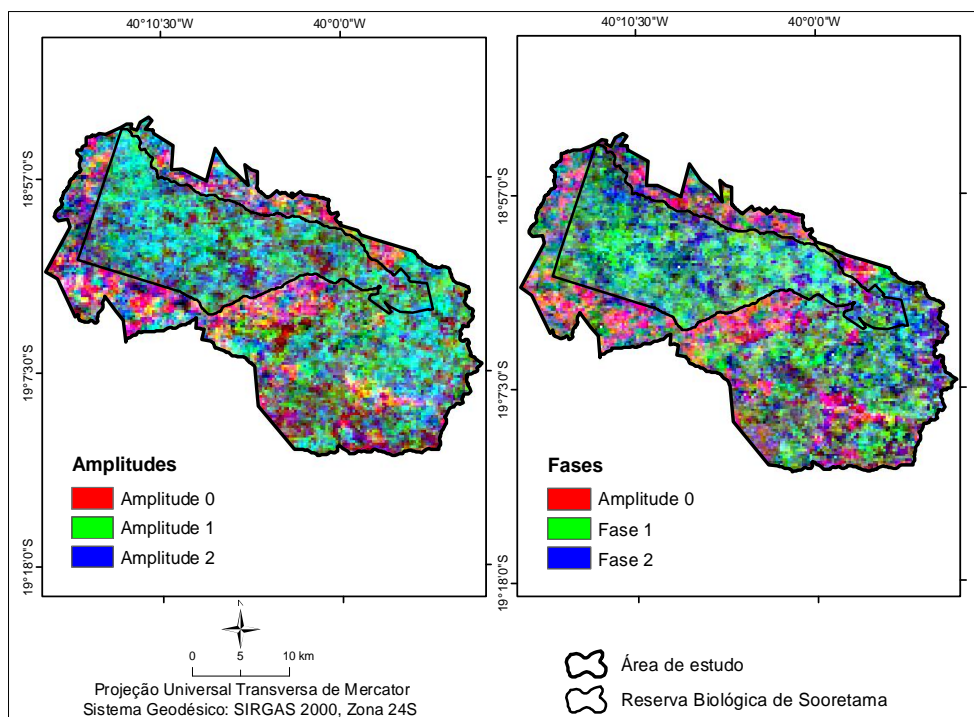
Para a relação entre o NDVI com TST observam-se baixos valores de correlação negativa em relação ao EVI, com valor de correlação máxima de -0,33. Além disso, a espacialização dos valores positivos de correlação ocorreu especialmente nas áreas de vegetação densa, indicando relação direta entre a vegetação e TST. Nesse sentido, essas áreas de correlações positivas se contrastam com a relação inversa entre a vegetação e a temperatura da superfície da terra, pois altas TST podem indicar estresse hídrico, com consequente diminuição do vigor vegetativo e da biomassa em resposta a essa alteração.

Em termos de solo, maiores TST de dia podem servir de indicativo de menor umidade do solo, pois a água e a vegetação são atenuantes nas trocas de calor entre solo e atmosfera, ou seja, em ambientes secos a troca é mais brusca. Por essa razão, regiões áridas apresentam grande amplitude térmica. Em síntese, a vegetação e a TST apresentam relação inversa e baseada em princípios físicos distintos (WENG et al., 2004; YUE et al, 2007; JULIEN; SOBRINO, 2009).

3.2. Análise de tendência sazonal

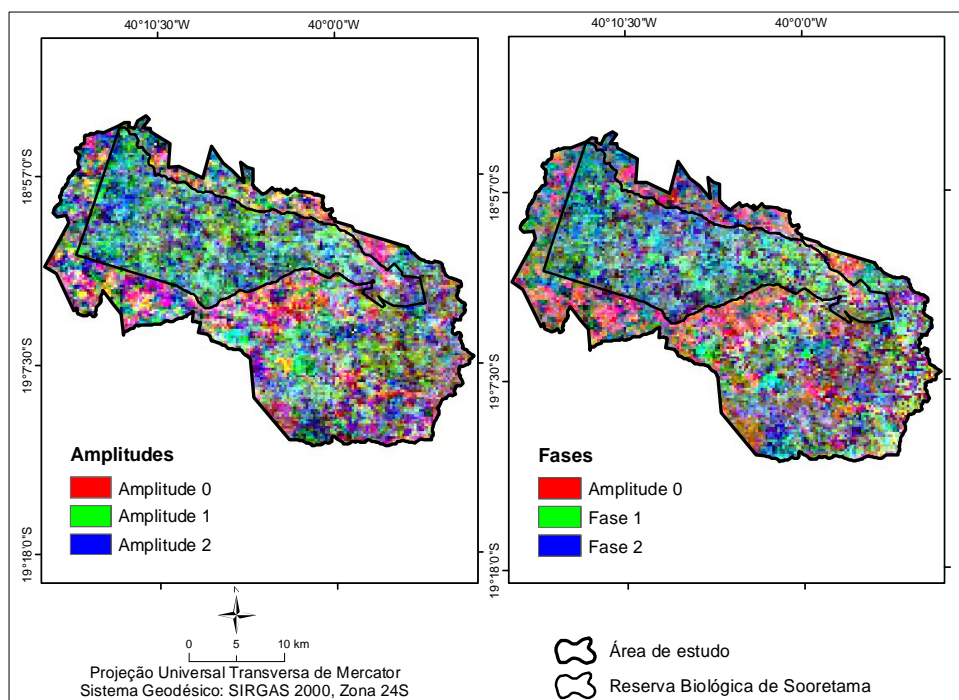
Após as análises inter-anuais da tendência monotônica de Mann-Kendall dos valores do EVI e NDVI, foi obtida a tendência sazonal para a área de estudo. Na Figura 2.9, observam-se as tendências dos parâmetros da análise harmônica nas Amplitudes e fases do EVI e, na Figura 2.10, Amplitudes e fases do NDVI. As composições coloridas RGB revelam que as áreas que passam por tendências sazonais similares apresentam a mesma resposta na composição colorida. Decifrar, entretanto, os mapas de cores em termos das tendências, é tarefa difícil, e necessita de interpretações interativas com o conjunto de parâmetros (EASTMAN et al., 2009).

Figura 2.9 - Composições RGB nas amplitudes e fases resultantes da análise de tendência sazonal dos valores de EVI para o período de 2007 a 2015.



Fonte: o autor

Figura 2.10 - Composições RGB nas amplitudes e fases resultantes da análise de tendência sazonal dos valores de NDVI para o período de 2007 a 2015.



Fonte: o autor

Observa-se que os padrões de cores tiveram, na sua maioria, distribuição espacial semelhante para o índice EVI para as amplitudes e fases quando comparado com amplitudes e fases do NDVI que, por sua vez, apresentou maior mistura de cores, não caracterizando um padrão de sazonalidade mais homogêneo.

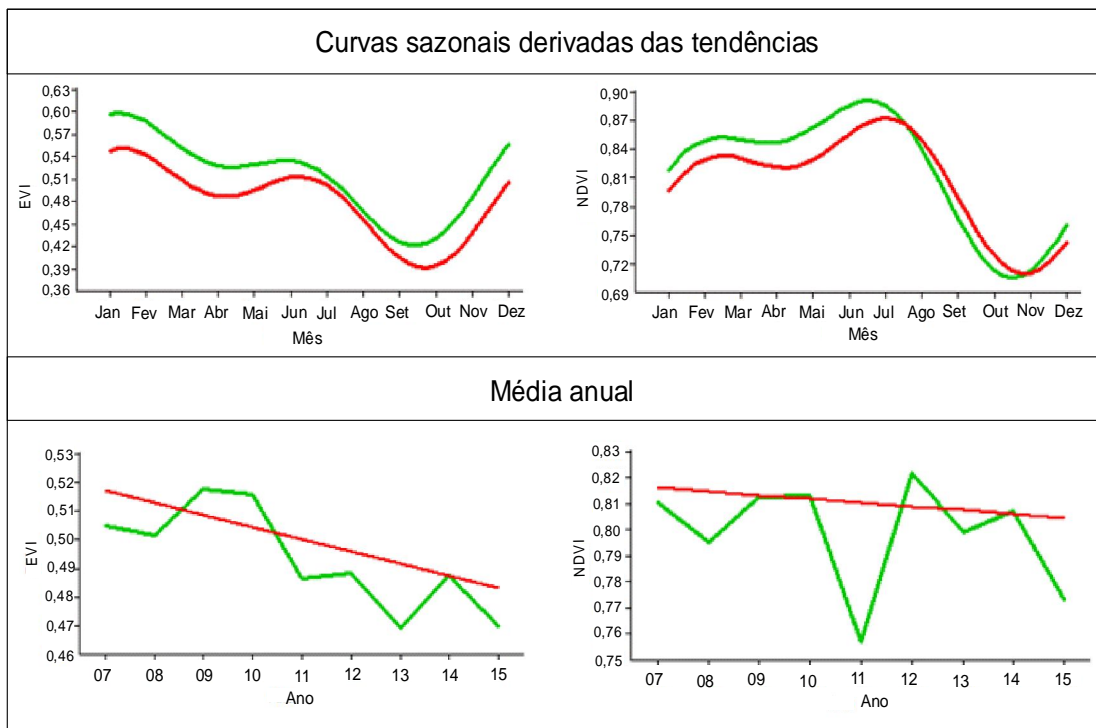
Percebe-se predominância da amplitude 1 e fase 1 (representadas pela cor verde) na série temporal de EVI, indicando de um modo geral que as áreas de vegetação, em especial a Reserva Biológica de Sooretama, apresentam ciclo e pico de vigor vegetativo (crescimento máximo) anual.

Por outro lado, as áreas com predominância da amplitude 0, principalmente ao redor da Reserva Biológica de Sooretama, indicam que a vegetação não apresenta um ciclo vegetativo definido. Nessas mesmas áreas o uso da terra predominante são pastagens, mas também ocorre em menor dimensão cultivos agrícolas. Percebe-se ainda uma pequena porção de distribuição espacial de amplitude 1 e fase 1 e amplitude 2 e fase 2 nessas áreas, podendo estarem relacionadas com fragmentos florestais distribuídos.

Para as imagens obtidas a partir da série temporal do NDVI, especificamente na Reserva Biológica de Sooretama, nota-se mistura de cores, sobretudo, da amplitude 1 com a amplitude 2 e da fase 1 com a fase 2, indicando que a vegetação densa não apresenta um padrão de ciclo, ocorrendo uma mistura de ciclo e pico anual e semi-anual. As áreas com predominância de amplitude 0 do NDVI foram semelhantes espacialmente às áreas de ocorrência de amplitude 0 no EVI, ou seja, apresentando tendências médias anuais, sendo essa tendência um indicativo da ausência de ocorrência de um ciclo.

As curvas sazonais, derivadas das tendências, com respeito aos dois primeiros e últimos anos da série (2007-2008 e 2014-2015), bem como, valores da média anual são apresentadas na Figura 2.11.

Figura 2.11 - Curvas sazonais de tendências derivadas das séries de EVI e NDVI para os anos de 2007 a 2008 (verde) e 2014 a 2015 (vermelho); média anual em cada ano da série temporal e a sua tendência (em vermelho), calculados para os índices de EVI e NDVI para a área de estudo.



Fonte: O autor

É possível perceber que a máxima diferença entre as curvas ocorreu no outono, nos meses de março a junho, tanto para EVI como o NDVI. A mínima diferença entre as curvas foi observada no inverno, nos meses de julho para o EVI, e inverno e primavera, nos meses de julho e novembro para o NDVI.

O padrão encontrado nas curvas sazonais do EVI indicou correspondência típica para verões chuvosos e invernos secos, uma vez que, o máximo de desenvolvimento vegetativo anual para o EVI destacou-se no verão, e o mínimo foi mais pronunciado no final do inverno. Por outro lado, o NDVI não apresentou o mesmo padrão sazonal do EVI, indicando picos do vigor vegetativo máximo no inverno e mínimo na primavera, não apresentando correspondência com a sazonalidade climática da região.

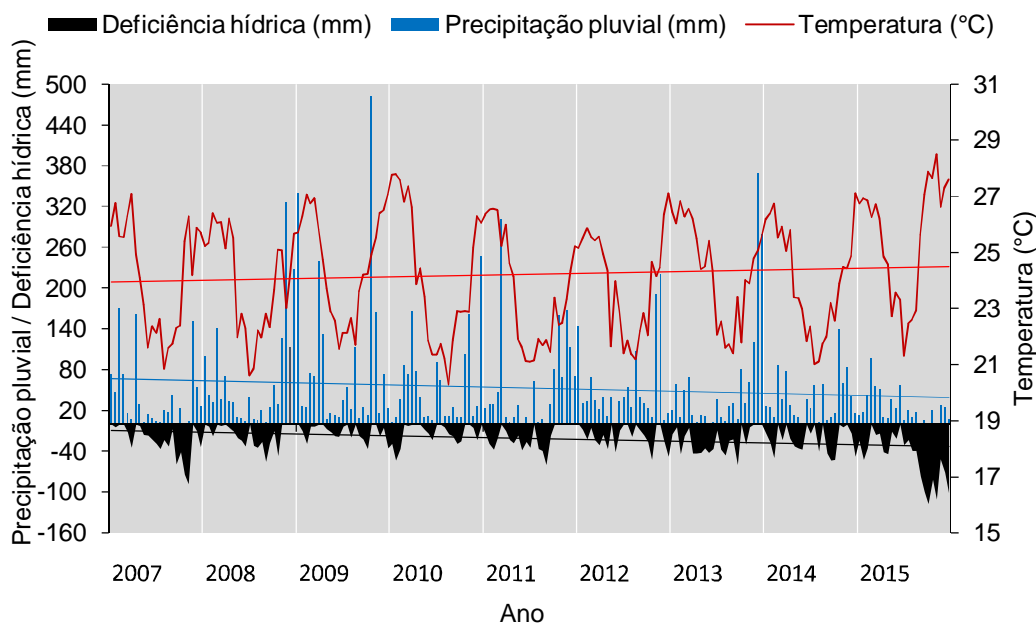
Esses resultados podem ser explicados pelo fato da área de estudo apresentar maior extensão de floresta natural (70,54%) e o NDVI apresenta rápida saturação ao aumento de biomassa, e conseqüentemente não apresenta melhor

resposta em regiões de maior densidade de biomassa como florestas quando comparado com o EVI (HUETE et al., 2002).

Além disso, é importante notar que para o EVI existe amplitude decrescente dos seus valores correspondentes aos dois primeiros anos (2007-2008) e dois últimos anos (2014-2015) da série, apresentando assim, concordância com a tendência monotônica de Mann-Kendal obtida para a série que indicou diminuição do vigor vegetativo com maior extensão significativa. Por outro lado, as curvas de NDVI não apresentaram padrão de diminuição de biomassa para todos os meses, em contradição com os resultados obtidos de tendência monotônica de Mann-Kendal, porém, em maior extensão não significativa o que pode explicar esse comportamento diferenciado das curvas.

Em relação à média anual, percebe-se tendência de diminuição maior para o EVI em relação ao NDVI, uma vez que esse apresentou leve tendência de redução da média anual. Esses resultados podem ser explicados pela tendência de diminuição da precipitação e aumento da deficiência hídrica e da temperatura (Figura 2.12) ao longo do período estudado, implicando na diminuição da produção de biomassa refletida nos valores de EVI.

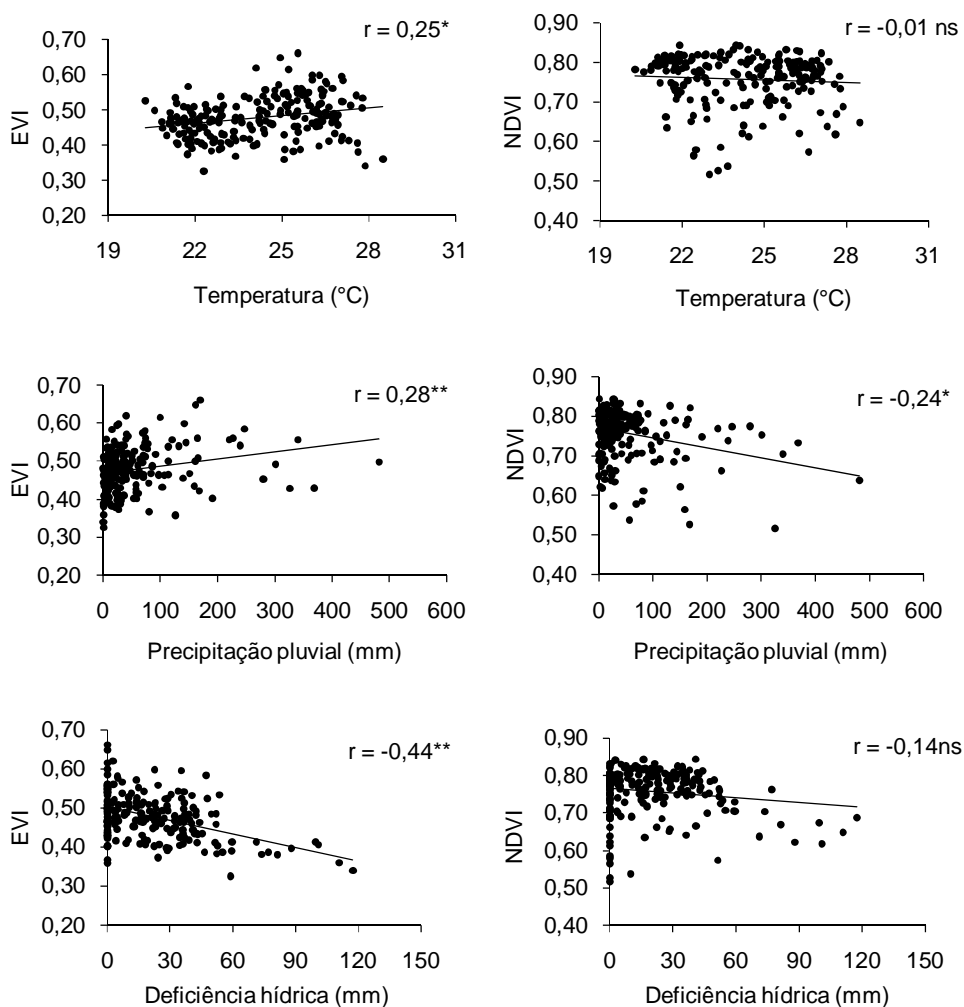
Figura 2.12 - Tendências temporais para as variáveis meteorológicas temperatura, precipitação pluvial e deficiência hídrica no período de 2007 a 2015.



Fonte: o autor

Essas relações são comprovadas na Figura 2.13 que apresenta a direção de respostas da vegetação à variação climática, por meio da correlação de Pearson entre as variáveis meteorológicas com os valores médios de EVI e NDVI para o período de 2007 a 2015.

Figura 2.13 - Correlação entre os índices NDVI e EVI com as variáveis meteorológicas temperatura, precipitação pluvial e deficiência hídrica.



(n= 207. Valores significativos a 5% (*) e a 1% (**) de probabilidade, ns – não significativo).

Fonte: O autor

Diante disso, é possível perceber ausência de correlação significativa para o NDVI com temperatura e com deficiência hídrica e relação inversa com precipitação pluvial, o que não corresponde a real resposta da vegetação ao aumento de chuvas, uma vez que ocorrência de chuvas promove aumento da produtividade da vegetação refletindo em aumento de biomassa apresentando relação direta. Por outro lado, o EVI apresentou relação direta com a temperatura e precipitação pluvial

e inversa com a deficiência hídrica com correlação significativa a 1% e a 5% de probabilidade.

O déficit hídrico, relacionado com temperaturas elevadas e déficit de chuva, é o fator primário que limita a produtividade dos ecossistemas na maioria dos biomas (NEMANI et al., 2003). A resposta fisiológica das árvores à ao estresse hídrico estão diretamente relacionadas com a diminuição do crescimento da vegetação (PASHO et al., 2011), redução da produtividade dos ecossistemas (CIAIS et al., 2005; ZHAO; RUNNING, 2010), frequências de incêndios (NEPSTAD et al., 2007; PHILLIPS et al., 2009) e mortalidade de árvores (ADAMS et al., 2009; ANDEREGG et al., 2013).

Estudos já apontaram a resposta da vegetação aos efeitos cumulativos da ocorrência destas variáveis meteorológicas (JONG et al., 2011). Enquanto análises de longo prazo das tendências climáticas buscam avaliar as mudanças no clima, o presente trabalho evidenciou a necessidade de se executar análises de curto prazo, dada a dinâmica da resposta da vegetação à variabilidade climática.

4. CONCLUSÕES

- Ao longo do período analisado ocorreu diminuição da biomassa vegetal em ambos os índices de vegetação, por meio das tendências negativas observadas nas séries temporais de imagens, sendo mais evidenciada no EVI.

- As áreas de florestas apresentaram maior diminuição do vigor vegetativo observado nas imagens da tendência monotônica de Mann-Kendal e de significância.

- As curvas sazonais do EVI indicaram correspondência típica de verões chuvosos e invernos secos e as tendências dos seus valores de média anual apresentaram concordância com as tendências de decréscimo da precipitação pluvial e aumento da deficiência hídrica e da temperatura. Por outro lado, as imagens de NDVI não apresentaram respostas esperadas para essas relações.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, H. D.; CLARAMONTE, GUARDIOLA-CLARAMONTE, M.; BARRON-GAFFORD, G. A.; VILLEGAS, J. C.; BRESHEARS, D. D.; ZOU, C. B.; TROCH, P. A.; HUXMAN, T. E. Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, p. 7063-7066, 2009.

ALLEN C. D; MACALADY, A. K.; CHENCHOUNI, H.; BACHELET, D.; MCDOWELL, N.; VENNETIER, M.; KITZBERGER, T.; RIGLING, A.; BRESHEARS, D. D.; HOGG, E. H.; GONZALEZ, P.; FENSHAM, R.; ZHANG, Z.; CASTRO, J.; DEMIDOVA, N.; LIM, J. H.; ALLARD, G.; RUNNING, S. W.; SEMERCI, A.; COBB, N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 660-684, 2010.

ANDEREGG, W. R. L.; KANE, J. M.; ANDEREGG, L. D. L. Consequences of widespread tree Mortality triggered by drought and temperature stress. **Nature Climate Change**, v. 3, p. 30-36, 2013.

BEURS, K. M. de.; WRIGHT, C. K.; HENEBRY, G. M. Dual scale trend analysis for evaluating climatic and anthropogenic effects on the vegetated land surface in Russia and Kazakhstan. **Environmental Research Letters**, v. 4, p. 045012, 2009.

BEURS, K. M. de.; HENEBRY, G. M. A land surface phenology assessment of the northern polar regions using MODIS reflectance time series. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 36, p. 87-110, 2010.

BORCHERT, R.; RIVERA, G.; HAGNAUER, W. Modification of vegetative phenology in a tropical semi-deciduous forest by abnormal drought and rain. **Biotropica**, v. 34, p. 27-39, 2002.

BOTA, J.; MEDRANO, H.; FLEXAS, J. Is photosynthesis limited by decreased Rubisco activity and RuBP content under progressive water stress? **New Phytologist**, v. 162, p. 671-681, 2004.

CIAIS, P.; REICHSTEIN, M.; VIOVY, N.; GRANIER, A.; OGÉE, J.; ALLARD, V.; AUBINET, M.; BUCHMANN, N.; BERNHOFER, C.; CARRARA, A.; CHEVALLIER, F.; DE NOBLET, N.; FRIEND, A. D.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GRÜNWALD, T.; HEINESCH, B.; KERONEN, P.; KNOHL, A.; KRINNER, G.; LOUSTAU, D.; MANCA, G.; MATTEUCCI, G.; MIGLIETTA, F.; OURCIVAL, J. M.; PAPALE, D.; PILEGAARD, K.; RAMBAL, S.; SEUFERT, G.; SOUSSANA, J. F.; SANZ, M. J.; SCHULZE, E. D.; VESALA, T.; VALENTINI, R. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. **Nature**, v. 437, p. 529-533, 2005.

CHEN, B.; XU, G.; COOPS, N. C.; CIAIS, P.; INNES, J. L.; WANG, G.; MYNENI, R. B.; WANG, T.; KRZYZANOWSKI, J.; LI, Q.; CAO, L.; LIU, Y. Changes in vegetation photosynthetic activity trends across the Asia-Pacific region over the last three decades. **Remote Sensing of Environment**, v. 144, p. 28-41, 2014.

DIDAN, K.; HUETE, A. MODIS Vegetation Index Product Series Collection 5 Change Summary. Arizona, 2006. p.1-16. Disponível em: <http://landweb.nascom.nasa.gov/QA_WWW/forPage/MOD13_VI_C5_Changes_Document_06_28_06.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2016.

EASTMAN, J. R.; SANGERMANO, F.; GHIMIRE, B.; ZHU, H.; CHEN, H.; NEETI, N.; CAO, Y.; CREMA, S. Seasonal Trend Analysis of Image Time Series. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 10, p. 2721-2726, 2009.

FONSECA, L. P. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. **Agronomía Colombiana**, v. 27, n. 2, p. 179-191, 2009.

FORKEL, M.; CARVALHAIS, N.; VERBESSELT, J.; MAHECHA, M. D.; NEIGH, C. S. R.; REICHSTEIN, M. Trend change detection in NDVI time series: Effects of inter-annual variability and methodology. **Remote Sensing**, v. 5, p. 2113-2144, 2013.

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

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

JACKSON, R. B.; RANDERSON, J. T.; CANADELL, J. G.; ANDERSON, R. G.; AVISSAR, R.; BALDOCCHI, D. D.; BONAN, G. B.; CALDEIRA, K.; DIFFENBAUGH, N. S.; FIELD, C. B.; HUNGATE, B. A.; JOBBÁGY, E. G.; KUEPPERS, L. M.; NOSETTO, M. D.; PATAKI, D. E. Protecting climate with forests. **Environment Research Letters**, v. 3, p. 44006, 2008.

Ji, L.; ZHANG, L.; WYLIE, B. K.; ROVER, J. On the terminology of the spectral vegetation index $(NIR - SWIR)/(NIR+SWIR)$. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, p. 6901-6909, 2011.

JONG, R. de.; BRUIN, S.; DE WIT, A.; SCHAEPMAN, M. E.; DENT, D. L. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 692-702, 2011.

JONG, R. de.; VERBESSELT, J.; SCHAEPMAN, M. E.; BRUIN, S. Trend changes in global greening and browning: Contribution of short-term trends to longer-term change. **Global Change Biology**, v. 18, p. 642-655, 2012.

JONG, R. de.; VERBESSELT, J.; ZEILEIS, A.; SCHAEPMAN, M. E. Shifts in global vegetation activity trends. **Remote Sensing**, v. 5, p. 1118-1133, 2013.

JONG, R. de.; BRUIN, S. de. Linear trends in seasonal vegetation time series and the modifiable temporal unit problem. **Biogeosciences**, v. 9, p. 71-77, 2012.

JULIEN, Y.; SOBRINO, J. A. The Yearly Land Cover Dynamics (YLCD) method: An analysis of global vegetation from NDVI and LST parameters. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 2, p. 329-334, 2009.

JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, D. P.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V. V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R. B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; WAN, Z.; HUETE, A. R.; LEEUWEN, W. V.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J. P.; LEWIS, P.; BARNESLEY, M. J. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228-1249, 1998.

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. 2, p. 3-15, 2002.

KENDALL, M. G. Rank correlation measures. London: Charles Griffin. 1975. 220p.

LEEUWEN, W. J. D. van; ORR, B. J.; MARSH, S. E.; HERRMANN, S.M. Multi-sensor NDVI data continuity: uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, p. 67-81, 2006.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245-259, 1945.

MENZEL, A.; FABIAN, P. Growing season extended in Europe. **Nature**, v. 397, p. 659-669, 1999.

MISHRA, N. B.; CHAUDHURI, G. Spatio-temporal analysis of trends in seasonal vegetation productivity Uttarakhand, Indian Himalayas, 2000 e 2014. **Applied Geography**, v. 56, p. 29-41, 2015.

NEETI, N.; ROGAN, J.; CHRISTMAN, Z. Mapping seasonal trends in vegetation using AVHRR-NDVI time series in the Yucatán Peninsula, Mexico. **Remote Sensing Letters**, v. 3, n. 5, p. 433-442, 2012.

NEMANI, R. R.; KEELING, C. D.; HASHIMOTO, H.; JOLLY, W. M., PIPER, S. C.; TUCHER, C. J.; MYNENI, R. B.; RUNNING, S. W. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. **Science**, v. 300, p. 1560-1563, 2003.

NEPSTAD, D. C.; TOHVER, I. M.; RAY, D.; MOUTINHO, P.; CARDINOT, G. Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest. **Ecology**, v. 88, p. 2259-2269, 2007.

PASHO, E.; CAMARERO, J. J.; DE LUIS, M.; VICENTE-SERRANO, S. M. Impacts of drought at different time scales on forest growth across a wide climatic gradient in north-eastern Spain. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, p. 1800-1811, 2011.

PHILLIPS, O. L.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LEWIS, S. L.; FISHER, J. B.; LLOYD, J.; GONZÁLEZ, G. L.; MALHI, Y.; MONTEAGUDO, A.; PEACOCK, J.; QUESADA, C. A.; VAN DER HEIJDEN, G. ALMEIDA, S.; AMARAL, I.; ARROYO, L.; AYMARD, G.;

BAKER, T. R. ; BÁNKI, O.; BLANC, L.; BONAL, D.; BRANDO, P.; CHAVE, J.; OLIVEIRA, A. C.; CARDOZO, N. D.; CZIMCZIK, C. L.; FELDPAUSCH, T. R.; FREITAS, M. A.; GLOOR, E.; HIGUCHI, N.; JIMÉNEZ, E.; LLOYD, G.; MEIR, P.; MENDOZA, C.; MOREL, A.; NEILL, D. A.; NEPSTAD, D.; PATIÑO, S.; PEÑUELA, M. C.; PRIETO, A.; RAMÍREZ, R. SCHWARZ, M.; SILVA, J. SILVEIRA, M.; THOMAS, A. S.; TER STEEGE, H.; STROPP, J.; VÁSQUEZ, R.; ZELAZOWSKI, P.; DÁVILA, E. A.; ANDELMAN, S.; ANDRADE, A.; CHAO, K. J.; ERWIN, T.; DI FIORE, A.; CORONADO, E. N. H.; KEELING, H.; KILLEEN, T. J.; LAURANCE, W. F.; CRUZ, A. P.; PITMAN, N. C.; VARGAS, P. N.; RAMÍREZ-ANGULO, H.; RUDAS, A.; SALAMÃO, R.; SILVA, N.; TERBORGH, J.; TORRES-LEZAMA, A. Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. **Science**, v. 323, p. 1344-1347, 2009.

SOBRINO, J. A.; JULIEN, Y. Global trends in NDVI-derived parameters obtained from GIMMS data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 15, p. 4267-4279, 2011.

WAGNER, A. P. L.; FONTANA, D. C.; FRAISSE, C.; WEBER, E. J.; HASENACK, H. Tendências temporais de índices de vegetação nos campos do Pampa do Brasil e do Uruguai. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 9, p. 1192-1200, 2013.

WANG, X.; PIAO, S.; CIAIS, P.; LI, J.; FRIEDLINGSTEIN, P.; KOVEN, C.; CHEN, A. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006. **Proceedings of the National Academy of the United States of America**, v. 108, p. 1240-1245, 2011.

WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, L. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **International Journal of Remote Sensing of Environment**, v. 89, p. 467-483, 2004.

WHITE, M. A.; BEURS, K. M.; DIDAN, K.; INOUE, D. W.; RICHARDSON, A. D. JESEN, O. P.; O'KEEFE, J.; ZHANG, G.; NEMANI, R. R.; VAN LEEUWEN, W. J. D.; BROWNSS, J. F.; DE WIT, A.; SCHAEPMAN, M.; LIN, X.; DETTINGER, M.; BAILEY, A. S.; KIMBALL, J.; SCHWARTZSS, M. D.; BALDOCCHI, D. D.; LEE, J. T.; LAUENROTH, W. K. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1992-2006. **Global Change Biology**, v. 15, p. 2335-2359, 2009.

XU, Z. X.; LI, J. Y.; LIU, C. M. Long term analysis for major climate variables in the yellow river basin. **Hydrological Processes**, v. 21, p. 1935-1948, 2007.

YUE, W.; XU, J.; TAN, W.; XU, L. The relationship between land surface temperature and NDVI with remote sensing: application to Shanghai landsat & ETM+ data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, p. 3205-3226, 2007.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B. Global vegetation phenology from moderate resolution imaging Spectroradiometer (MODIS): evaluation no global patterns and comparison within situ measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, p. 1-14, 2006.

ZHAO, M. S.; RUNNING, S. W. Drought-Induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. **Science**, v. 329, p. 940-943, 2010.

6. CONCLUSÕES GERAIS

- O índice de condição da vegetação apresentou um notório potencial para análises de ocorrências de seca em regiões e áreas com diferentes densidades de vegetação. Nesse sentido, pode ser empregado como uma poderosa ferramenta para compor um sistema de alerta precoce e abrangente de seca para acompanhar as mudanças na cobertura espacial na vegetação e sua gravidade.
- A utilização de imagens e curvas sazonais da tendência monotônica de Mann-Kendal e das análises de tendências sazonais, respectivamente, permitiu observar a indicação das áreas com tendências negativas e positivas, a resposta da vegetação às variações climáticas e identificar o ponto de máximo e mínimo do vigor vegetativo.
- Os dados obtidos a partir do sensor MODIS, NDVI, EVI e TST, com a vantagem de ter uma série livre de nuvens e aerossóis, mostraram-se adequados para a análise espaço-temporal de ocorrências de seca e de tendências na vegetação.
- Por fim, o uso de dados meteorológicos permitiu verificar que existe relação com o crescimento da vegetação e sua dinâmica dentro do limites da zona de amortecimento e da Reserva Biológica de Sooretama.