



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL  
– MESTRADO –**

**ANÁLISES GEOESPACIAIS DA DINÂMICA DAS SECAS  
VEGETATIVAS NA BACIA DO ALTO RIO PARAÍBA-PB ENTRE  
2001 E 2017**

*Por*

***Nádja Melo de Oliveira***

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba  
para obtenção do grau de Mestre*

**João Pessoa – Paraíba**

**Agosto de 2019**



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL  
– MESTRADO –**

**ANÁLISES GEOESPACIAIS DA DINÂMICA DAS SECAS  
VEGETATIVAS NA BACIA DO ALTO RIO PARAÍBA-PB ENTRE  
2001 E 2017**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

**Nádja Melo de Oliveira**

**Orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva**

**João Pessoa – Paraíba**

**Agosto de 2019**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

O48a Oliveira, Nádja Melo de.  
Análises geoespaciais da dinâmica das secas vegetativas na bacia do Alto Rio Paraíba-PB entre 2001 e 2017 / Nádja Melo de Oliveira. - João Pessoa, 2019.  
94 f. : il.

Orientação: Richarde Marques da Silva.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Secas - Monitoramento. 2. Sensoriamento remoto.  
3. Geotecnologias. 4. Semiárido. I. Silva, Richarde Marques da. II. Título.

UFPB/BC CDU 551.577.38(043)

**"ANÁLISES GEOESPACIAIS DA DINÂMICA DAS SECAS VEGETATIVAS NA BACIA DO  
ALTO RIO PARAÍBA-PB ENTRE 2001 E 2017"**

**NÁDJA MELO DE OLIVEIRA**

**Dissertação aprovada em 30 de agosto de 2019**

**Período Letivo: 2019.2**

  
**Prof. Dr. Richarde Marques da Silva – UFPB**  
**Orientador**

  
**Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos – UFPB**  
**Examinador Interno**

  
**Prof. Dr. Vinicius da Silva Seabra – UERJ**  
**Examinador Externo**

**João Pessoa/PB**  
**2019**

Dedico esta dissertação para aqueles que assim como eu, acreditam que a educação é a base para transformação social e crescimento do Brasil enquanto nação.

## AGRADECIMENTOS

Finalizando mais uma etapa de minha vida acadêmica, gostaria de agradecer a aqueles que participaram e contribuíram de forma indireta e direta para o desenvolvimento e conclusão dessa pesquisa.

Meu agradecimento inicial vai para Deus, este Ser Supremo, ao qual eu dedico toda minha existência, os meus maiores aprendizados, tudo que superei e alcancei no meu caminho até hoje, e por ressignificar minha vida diariamente.

Agradeço a minha família por serem os meus maiores encorajadores e pelo apoio incondicional durante todos esses anos. À minha mãe Cássia e a meu pai Ronilson toda a minha gratidão, por terem realizado todos os esforços para que eu tivesse a oportunidade de ter uma educação de qualidade e assim chegar ao ensino superior.

Agradeço aos meus amigos e companheiros de profissão Eliane, Irla, Maria Israelita (Cecilia) e Perilo pelo incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço, e por todo apoio e carinho desde a graduação.

Também agradeço aos meus amigos de toda vida, Amanda, Bruna, Danila, Andressa e João Carlos, por todo carinho, torcida, força e incentivo dado durante todos os anos e especialmente na fase do mestrado.

Estendo meus agradecimentos aos professores com os quais tive aula durante o mestrado, são eles: Adriano Paz, Celso Santos, Elisangela Rocha, Roberto Pimentel, Solange Leder, Tarciso Cabral e Richarde Marques da Silva. Certamente todo conhecimento compartilhado por esses professores durante as aulas contribuíram grandemente na minha formação e no desenvolvimento dessa pesquisa.

Também agradeço ao professor Pedro Vianna pela oportunidade de realizar o estágio de docência na disciplina Cartografia Ambiental, ministrada por ele. Foi muito gratificante ter a experiência das práticas docentes no ensino superior sob a supervisão do professor.

Faço um agradecimento especial ao meu orientador, o Prof, Dr. Richarde Marques da Silva, pelas oportunidades dadas desde a graduação, de tê-lo também como orientador na pós, por seu incentivo e orientações, pela paciência, confiança e por me propiciar grandes aprendizados no desenvolvimento dessa pesquisa.

Agradeço aos professores membros da banca que avaliaram essa pesquisa na fase do colóquio: Vinicius da Silva Seabra e Victor Hugo Rabelo Coelho pelas discussões e sugestões realizadas durante o colóquio certamente enriqueceram a pesquisa.

Agradeço a toda equipe do LEPPAN por todos os trabalhos desenvolvidos, pelo companheirismo, presteza e pelos valiosos momentos vivenciados durante nossas confraternizações desde minha graduação até o mestrado. Especialmente gostaria de agradecer aos amigos: Glauciene, Janilce, Isabella, Ana Paula, Renata, José Carlos (Zé) e Alexandro.

Meus agradecimentos às amigas da turma do mestrado Camila, Juliana, Ana Beatriz e Amanda, pelo companheirismo, incentivo nas horas difíceis e por estar sempre passando mensagens de apoio e força durante o mestrado e na fase final da dissertação. Para mim foi um prazer conhecer essas excelentes pesquisadoras e profissionais inspiradoras.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) pela infraestrutura, recursos financeiros e humanos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado concedida, pelo apoio ao financiamento da pesquisa.

Agradeço a Universidade Federal da Paraíba por seu ensino público de qualidade, pelas oportunidades dadas, por todo amparo estrutural, emocional, e principalmente por ter aberto as portas para o universo do conhecimento, das descobertas, e por sua enorme e infinita contribuição na minha formação profissional.

Acredito que viver é sempre está em constante recomeço. Alguns sonhos são alcançados para outros se iniciarem. Esse chegou ao fim, mas não teria nem começado e concretizado se não fosse cada um de vocês aqui mencionados. Enfim, meu muito obrigado a todos.

“Se não puder voar, corra.  
Se não puder correr, ande.  
Se não puder andar, rasteje.  
Mas continue em frente  
de qualquer jeito”  
(KING, M. L.)

## RESUMO

A seca é um fenômeno natural muito complexo que afeta o abastecimento de água e por consequência impacta nas atividades agrícolas e socioeconômicas, causando crises sociais e políticas. Esse fenômeno é um dos fatores mais importantes que causam degradação na vegetação. Determinar as áreas com vegetação mais sensível à seca pode ser eficaz no gerenciamento de risco de seca. Assim, diferentes índices baseados em produtos de sensoriamento remoto vêm sendo utilizados para avaliar os impactos da seca na vegetação. Desta forma, esse estudo utilizou índices de seca baseados em dados oriundos do sensor MODIS a bordo dos satélites TERRA-AQUA, referentes ao *Normalised Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Land Surface Temperature* (LST) para estimar os índices *Vegetation Supply Water Index* (VSWI) e *Vegetation Health Index* (VHI) e analisar as secas vegetativas. Este estudo utilizou também dados de precipitação do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) para estimar o índice de Anomalia das Chuvas (IAC) e caracterizar o regime de chuvas na bacia do Alto Rio Paraíba para o período de 2001 a 2017 e caracterizar espaço-temporalmente as secas vegetativas na bacia. Nesse sentido, o objetivo desse estudo é analisar espaço-temporalmente as secas e seu impacto na cobertura vegetal da bacia do Alto Rio Paraíba. Os resultados do IAC mostraram os períodos secos e úmidos da bacia e foram classificados de acordo com suas intensidades. Assim, o IAC definiu a partir da série de 2001 a 2017 a ocorrência de secas extremas nos anos de 2012 e 2015, bem como um ano extremamente úmido em 2009. Sendo os períodos secos e úmidos que ocorreram com intensidades diferentes utilizados para analisar o impacto na vegetação. Com os valores estimados de VSWI e VHI para analisar as secas vegetativas, observaram-se para os anos de maior umidade e seca condições espaciais e temporais de secas diferentes. Esses índices variaram para a bacia entre 0 e > 40, onde os valores mais próximos ou > 40 indicaram condições normais de umidade para a vegetação, e, portanto, ausência de estresse hídrico, e os valores próximo a zero indicaram condições de seca extrema na vegetação. Com base nas estimativas da seca vegetativas baseadas no VSWI e VHI, o VSWI apresentou melhor a seca na bacia, pois o mesmo refletiu a diminuição do vigor da vegetação (NDVI) e o aumento na temperatura da superfície (LST) para indicar a seca e não subestimou a vegetação com menor estresse hídrico como ocorreu nas estimativas do VHI.

**Palavras-chave:** Monitoramento de Seca, Sensoriamento Remoto, Geotecnologias, Semiárido.

## ABSTRACT

Drought is a very complex natural phenomenon that affects water supply and consequently impacts on agricultural and socioeconomic activities, causing social and political crises. This phenomenon is one of the most important factors that cause degradation in vegetation. Determining areas with more drought sensitive vegetation can be effective in managing drought risk. Thus, different indices based on remote sensing products have been used to evaluate the impacts of drought on vegetation. Thus, this study used drought indices based on data from the MODIS sensor on the TERRA-AQUA satellites, referring to the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Land Surface Temperature (LST) to estimate the Vegetation Supply Water Index (VSWI) indices and Vegetation Health Index (VHI) and analyze vegetative droughts. This study also used rainfall data from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) to estimate Rain Anomaly Index (IAC) and to characterize the rainfall regime in the Upper Paraíba River basin for the period 2001-2017 and to characterize spatiotemporally. The vegetative droughts in the basin. In this sense, the objective of this study is to analyze spatially and temporarily the droughts and their impact on the vegetation cover of the Upper Paraíba River basin. The IAC results showed the dry and wet periods of the basin and were classified according to their intensities. Thus, from 2001 to 2017, the IAC defined the occurrence of extreme droughts in 2012 and 2015, as well as an extremely wet year in 2009. The dry and wet periods that occurred with different intensities were used to analyze the impact in the vegetation. With the estimated values of VSWI and VHI to analyze the vegetative droughts, it was observed for the years of higher humidity and drought spatial and temporal conditions of different droughts. These rates ranged from 0 to > 40 for the basin, where values closer to or > 40 indicated normal humidity conditions for the vegetation, and therefore no water stress, and values close to zero indicated extreme drought conditions in the basin vegetation. Based on estimates of vegetative drought based on VSWI and VHI, VSWI showed better drought in the basin, as it reflected the decrease in vegetation vigor (NDVI) and the increase in surface temperature (LST) to indicate drought and vegetation did not underestimate vegetation with lower water stress as occurred in VHI estimates.

**Keywords:** Drought Monitoring, Remote Sensing, Geotechnology, Semiarid.

## SUMÁRIO

**RESUMO**

**ABSTRACT**

**LISTA DE FIGURAS**

**LISTA DE TABELAS**

**LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

|            |                                                                                                    |           |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                            | <b>16</b> |
| <b>2</b>   | <b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                                                                   | <b>19</b> |
| 2.1        | CAUSAS E DEFINIÇÕES DE SECA .....                                                                  | 19        |
| 2.2        | O NORDESTE BRASILEIRO E O FENÔMENO DA SECA .....                                                   | 24        |
| 2.3        | A SECA NA PARAÍBA E SEUS IMPACTOS MAIS RECENTES.....                                               | 32        |
| 2.4        | DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADOS NO ESTUDO DE SECAS .....                                   | 35        |
| 2.5        | ÍNDICES E INDICADORES DE SECA.....                                                                 | 40        |
| 2.6        | ÍNDICES E INDICADORES DE SECA BASEADOS NO SENSORIAMENTO REMOTO .....                               | 50        |
| <b>3</b>   | <b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                                                                    | <b>57</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Características da Área de Estudo.....</b>                                                      | <b>57</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Procedimentos Metodológicos .....</b>                                                           | <b>58</b> |
| 3.3        | DADOS DE PRECIPITAÇÃO .....                                                                        | 59        |
| 3.4        | DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ANOMALIA DE CHUVA (IAC).....                                             | 61        |
| 3.5        | DETERMINAÇÃO DAS SECAS UTILIZANDO COMO INDICADOR A CONDIÇÃO DA<br>VEGETAÇÃO.....                   | 62        |
| 3.5.1      | OBTENÇÃO E PROCESSAMENTO DE IMAGENS UTILIZADAS .....                                               | 62        |
| 3.5.2      | ESTIMATIVA DAS CONDIÇÕES DE UMIDADE NA VEGETAÇÃO .....                                             | 63        |
| 3.5.3      | COMPORTAMENTO DA VEGETAÇÃO SADIA .....                                                             | 64        |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                                                                | <b>66</b> |
| 4.1        | – VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO MENSAL E ANUAL DA BACIA ESTIMADOS ATRAVÉS<br>DO SATÉLITE TRMM..... | 66        |
| 4.2        | – ANÁLISES DAS SECAS E ESCASSEZ HÍDRICA MEDIANTE O USO DO ÍNDICE DE<br>ANOMALIA DE CHUVA.....      | 70        |
| 4.3        | – AVALIAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE SECA VEGETATIVA NA BACIA BASEADOS EM<br>SENSORIAMENTO REMOTO .....    | 72        |
| <b>5.</b>  | <b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>                                                            | <b>82</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                                            | <b>84</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-Tipos de secas e seus impactos .....                                                                                                 | 23 |
| Figura 2-Anomalia da TSM do oceano Pacífico de 2001 a 2017 (El Niño e La Niña).....                                                           | 25 |
| Figura 3-Delimitação do Semiárido brasileiro. ....                                                                                            | 28 |
| Figura 4- Localização das mesorregiões geográficas do estado da Paraíba. ....                                                                 | 32 |
| Figura 5-Produção agrícola de feijão, milho e mandioca na Paraíba (2011–2015). ....                                                           | 34 |
| Figura 6-Elementos do ciclo hidrológico importantes no estudo do fenômeno da seca que podem ser obtidos através do sensoriamento remoto. .... | 37 |
| Figura 7-Mapa de localização da bacia do Alto Rio Paraíba. ....                                                                               | 58 |
| Figura 8-Etapas e procedimentos executados na pesquisa. ....                                                                                  | 59 |
| Figura 9-Grade do TRMM sobre o estado da Paraíba com a distribuição de 42 células na área da Bacia do Alto Rio Paraíba.....                   | 60 |
| Figura 10-Variação da precipitação mensal para o período 2001–2017. ....                                                                      | 66 |
| Figura 11-Variação da precipitação anual para o período 2001–2017.....                                                                        | 67 |
| Figura 12-Variação da precipitação anual para o período 2001–2017.....                                                                        | 68 |
| Figura 13-Estimativa da precipitação anual acumulada para o período de 2001–2017 na bacia.....                                                | 69 |
| Figura 14-Distribuição temporal do IAC para a bacia do Alto Rio Paraíba.....                                                                  | 71 |
| Figura 15-Estimativa do NDVI para a bacia do Alto Rio Paraíba durante o período de 2001 a 2017. ....                                          | 73 |
| Figura 16-Estimativa da temperatura média anual para o período de 2001 a 2017 na bacia do Alto Rio Paraíba. ....                              | 76 |
| Figura 17-Estimativa do VSWI para o período de 2001 a 2017 na bacia do Alto Rio Paraíba. ....                                                 | 78 |
| Figura 18-Estimativa do VHI para o período de 2001 a 2017 na bacia do Alto Rio Paraíba. ....                                                  | 80 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1-Histórico da ocorrência de seca no semiárido do Brasil. .... | 30 |
| Tabela 2-Índices de Seca Meteorológica.....                           | 43 |
| Tabela 3-Índices de Seca Agrícola. ....                               | 47 |
| Tabela 4-Índices de Seca Hidrológica. ....                            | 48 |
| Tabela 5-Classes de intensidade do Índice de Anomalia de Chuva. ....  | 62 |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer

BMDI – Índice de Seca de Bhalme & Mooley

CMI – Índice de Umidade da Cultura

DMSP – Defense Meteorological Satellite Program

DSI – Drought Severity Index

EDI – Índice de Seca Efetiva

ENOS – El Niño-Oscilação Sul

EVI – Enhanced Vegetation Index

FAEPA – Federação da Agricultura e Pecuária da Paraíba

GVI – Global Vegetation Index

IAC – Índice de Anomalia de Chuvas

IDW – Inverse Distance Weighted

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

LAI – Índice de Área Foliar

LST – Land Surface Temperature

MIN – Ministério da Integração Nacional

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

NPA – Normalized Monthly Precipitation Anomaly Percentage

NVSWI – Normalized Vegetation Supply Water Index

PDSI – Índice de Severidade de Seca de Palmer

PHDI – Índice Hidrológico de Seca de Palmer

PN – Porcentagem da Precipitação Normal

SEDEC – Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil

SIG – Sistemas de Informações Geográficas

SPI – Índice de Precipitação Padronizada

SWSI – Índice de Abastecimento de Água na Superfície

TCI – Temperature Condition Index

TRMM – Tropical Rainfall Measuring Mission

TSM – Temperatura de Superfície do Mar

VCI – Vegetation Condition Index

VCI – Vegetation Condition Index

VHI – Vegetation Health Index

VSWI – Vegetation Supply Water Index

WRSI – Water Requirement Satisfaction Index

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

## 1 INTRODUÇÃO

A seca é um dos riscos naturais mais complexos e generalizados, uma vez que metade da superfície terrestre é suscetível ao fenômeno (KOGAN,1997). Os grandes custos sociais ocasionados pelas secas têm provocado grande discussão no meio científico. A quantidade de áreas atingidas por esse fenômeno dobrou em todo o mundo de 1970 para o início de 2000 (NAGARAJAN, 2009), e quase todas as principais terras agrícolas estão situadas nessas regiões afetadas pela seca (USDA, 1994).

O fenômeno da seca origina-se de um período contínuo sem precipitação, com aumento da temperatura e uma diminuição da umidade relativa (MISHRA et al., 2010; PALMER, 1965), e seus efeitos acumulam-se com o tempo de duração e podem perdurar anos após a finalização do evento. Desta forma, a seca pode gerar vários impactos ambientais, sociais e econômicos.

Os eventos de seca vêm sendo relacionados nos últimos anos ao aumento da demanda por recursos hídrico devido o crescimento da população, expansão da agricultura, energia e setores industriais, e a variabilidade das variáveis hidrometeorológicas decorrente das mudanças climáticas (BELAL et al., 2014; MISHRA et al., 2010). Como resultado, o ciclo hidrológico das regiões afetadas pela seca tem se tornado objeto de pesquisas. É de grande importância obter informações que demonstram como os fatores climáticos e os ecossistemas são afetados nas regiões propensas à seca.

No Brasil, uma região que historicamente está relacionada a eventos de secas é o semiárido brasileiro. Essa região tem como características os índices pluviométricos anuais reduzidos (inferiores a 800 mm), a vegetação do tipo caatinga, e uma grande área de embasamento cristalino e os solos geralmente rasos. Além disso, apresenta temperaturas elevadas durante todo ano, forte insolação e altas taxas de evapotranspiração que superam na maioria das vezes os totais pluviométricos irregulares, apresentando taxas negativas no balanço hídrico (GONDIM et al., 2017).

Segundo o Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (Ministério da Integração Nacional, 2017), desenvolvido pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC/MI, 2017) nos últimos cinco anos o governo realizou o reconhecimento de 2.200 municípios em estado de emergência devido à seca em todo o Brasil. Sendo inseridos na região semiárida 1.135 municípios e abrigando uma população que chega a quase 24 milhões de habitantes que corresponde a quase 12% da população do País (GONDIM et al., 2017).

Devido ao fato da região semiárida apresentar baixos valores pluviométricos e grande irregularidade espaço-temporal das chuvas, a maior parte do semiárido sofre com um problema crônico de escassez hídrica, que se apresenta como uma barreira para o desenvolvimento de atividades agropecuárias. A ineficácia de sistemas para armazenamento de água, a recorrência de fortes secas em intervalos curtos e longos (de um ano até décadas), contribuem para intensificar ainda mais as frágeis condições da população do semiárido e provocar redução na produtividade agrícola, aumento de desemprego rural, fome, pobreza o que acarreta a migração da população das áreas afetadas, principalmente as populações mais pobres e os pequenos agricultores (MARENGO et al., 2011).

Nesse contexto, está a Bacia do Alto Rio Paraíba localizada na região semiárida do estado da Paraíba, que é frequentemente afetada por secas que acarretam problemas para o abastecimento público, produtividade agrícola e pecuária. A agricultura na região é totalmente dependente das precipitações e de suas evoluções dentro do período chuvoso. Segundo Medeiros et al. (2017) ocorreram quedas significativas na produção do milho, feijão e mandioca (principais culturas da região), na última seca prolongada ocorrida entre 2012 e 2017.

A Bacia do Alto Paraíba tem como principal fonte de água para a região os reservatórios, que no período de estiagens prolongados muitos entram em colapso, o que gera vários conflitos por uso da água e problemas sociais e econômicos, como ocorre no Reservatório Epitácio Pessoa, principal reservatório da bacia. Esse reservatório, mais conhecido como açude de Boqueirão, localizado na zona rural do município de Boqueirão, tem suas águas captadas pelas bacias do Alto Rio Paraíba e do Rio Taperoá, e tem importância significativa para o desenvolvimento socioeconômico da região (GALVÍNCIO, 2005).

O açude Epitácio Pessoa armazena água para suprir a demanda de cerca de 30 municípios da região e por está sujeito a estiagens prolongadas, compromete de forma qualitativa e quantitativa o sistema de abastecimento de cidades da região e circunvizinhas, bem como as principais atividades da região dependentes desse recurso como a agricultura e pecuária (LIMA et al., 2013).

Segundo projeções do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) até final do século XXI há uma estimativa da redução de chuvas e de seus extremos (IPCC, 2007). Essas projeções apontam como consequências, a degeneração de atividades relacionadas à agricultura de subsistência, o que impactaria as populações dependentes dessa atividade principalmente nas regiões que sofrem com efeitos de secas recorrentes. Esses

impactos podem afetar diretamente os 7 milhões de pessoas que são vinculadas a agricultura familiar no Nordeste e que frequentemente estão sujeitas aos eventos de secas, o que pode gerar o aumento de migrações das populações dessas regiões para outras cidades ou estados, o que agravaria ainda mais os problemas sociais já presentes nas grandes cidades pelos chamados “refugiados do clima” (IBGE, 2006; MARENGO et al., 2011).

Nesse contexto, compreender a dinâmica dos eventos de seca nas regiões vulneráveis a esses eventos é de grande importância para minimizar os impactos para os ecossistemas e população dessas áreas. Assim, várias abordagens e índices têm sido desenvolvidos para quantificar e analisar as secas considerando variáveis hidrometeorológicas obtidas a partir do sensoriamento remoto (ZHANG et al. 2017).

Sensores capazes de detectar e mapear secas em grandes escalas espaciais e com continuidade temporal tem sido importantes para avaliar a gravidade espaço-temporalmente e extensão das secas (CHOI et al. 2013; LIN et al. 2014). Assim, dados do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) tem sido cada vez mais utilizados para o monitoramento e avaliação de secas (WAN et al, 2004).

Além disso, índices de seca que relacionam a temperatura de superfície com índices de vegetação têm sido utilizados como forma de indicar as condições de umidade do solo, e avaliar o impacto dos eventos de secas na vegetação (Wang et al. 2014). Entre eles está o Índice de Saúde da Vegetação-VHI e o Índice de Suprimento de Água para Vegetação-VSWI (GOMES et al., 2017; CUNHA et al., 2018).

Para este estudo foi realizada uma análise espaço-temporal do fenômeno da seca na Bacia do Alto Rio Paraíba, situada no semiárido brasileiro, que sofre com secas recorrentes, acarretando problemas na disponibilidade hídrica para região e problemas socioeconômicos devido a essa condição hídrica a qual a bacia está sujeita.

Portanto, o estudo para a bacia do Alto Rio Paraíba, teve como objetivo geral analisar o comportamento espaço-temporal das secas sobre a vegetação através de índices derivados de produtos MODIS, no período compreendido de 2001 a 2017.

O trabalho teve como objetivos específicos:

- Avaliar a variabilidade espaço-temporal da precipitação da bacia e caracterizar seu regime climático.
- Determinar a periodicidade e a intensidade com que ocorrem anos secos e chuvosos.
- Indicar espaço-temporalmente as condições de seca na vegetação com base em índices de seca e dados MODIS.

De acordo com os objetivos desse estudo pretende-se proporcionar uma análise da distribuição espaço-temporal das secas na bacia a partir de índices estimados através de dados MODIS, a fim apresentar uma avaliação qualitativa dos eventos de seca ocorridos no período de 2001 a 2017, com ênfase na última seca de 2012 a 2017. O estudo pretende contribuir com informações e a metodologia, apresentar instrumentos capazes de analisar a seca e fornecer informações que poderá servir de base para planos de gerenciamento de risco e efeitos da seca.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

O trabalho foi estruturado em cinco capítulos além da introdução, conclusão e referências bibliográficas. O segundo capítulo do trabalho trata do referencial teórico, apresentando os temas que fundamentam a pesquisa, o terceiro capítulo é a caracterização da área de estudo, o quarto são os materiais e métodos que resumem as etapas que foram seguidas para realização da pesquisa, e por fim no quinto capítulo são apresentados os resultados e as discussões alcançados acerca desta pesquisa.

### **2.1 Causas e Definições de Seca**

A seca é apontada como um dos desastres naturais menos compreendidos e o que mais afeta pessoas no mundo (HAGMAM, 1984). Esse fenômeno ocorre com frequência em diversas áreas da superfície terrestre a cada ano, e tem características muito distintas de outros desastres naturais existentes. Entre as características mais marcantes desse evento destacam-se: duração e evolução, a ausência de uma definição universalmente aceita e precisa de seca, e uma compreensão do alcance dos seus impactos (SOUSA JÚNIOR e LACRUZ, 2015).

A seca tem uma dinâmica que dificulta a sua predição, isso ocorre devido os seus efeitos serem acumulativos, eles se acumulam lentamente durante um período prolongado de tempo, não sendo possível identificar o início e a duração do evento, podendo o mesmo se prolongar durante muitos anos depois do fim do evento (WILHITE, 2000).

Determinar o fim ou o início de uma seca é difícil, como também definir os critérios utilizados para determinar esse evento. Esse fenômeno ocorre de forma diferenciada em várias partes do mundo, nos países de clima desértico, por exemplo, devido possuir altas taxas de evaporação potencial maior que as precipitações como característica comum, a seca

só é identificada após dois ou três anos sem chuvas significativas, já nas regiões de semiárido a seca é detectada em um período de seis ou mais meses sem chuvas (BOKEN, 2005).

A dificuldade em compreender a seca não está somente ligada as suas causas como também a seus impactos, que afeta diretamente quase todos os componentes do ciclo hidrológico, desde a precipitação, as águas superficiais, a recarga e o armazenamento das águas subterrâneas, bem como afeta os elementos biológicos dos ecossistemas e as ações humanas. Devido a seca ser um fenômeno cíclico, grandes áreas e várias pessoas têm sido afetadas, podendo durar seus impactos desde meses até anos, impactando significativamente atividades socioeconômicas que dependem essencialmente da água para produção de bens de consumo e para ofertar serviços (KOGAN, 1997).

Das principais consequências da seca temos o aumento do consumo, perdas por evapotranspiração, diminuição da intensidade das precipitações e a umidade do ar, bem como o aumento da insolação e dos ventos secos. Além disso, temos perda de culturas e pastagens, alterações no uso e ocupação do solo, diminuição dos níveis de água, ausência de água para o abastecimento, maior ocorrência de incêndios, perda de rebanhos e da fauna e flora das regiões afetadas por esse fenômeno (SOUSA JÚNIOR e LACRUZ, 2015).

A seca é um fenômeno que se desenvolve de forma lenta e se propaga de forma descontínua espacialmente e temporalmente. Assim, esse fenômeno tem sido caracterizado a partir de sua intensidade, duração e extensão. A intensidade do fenômeno é medida usualmente a partir do distanciamento da normal de um parâmetro climático (precipitação), em relação a um indicador (nível de um reservatório) ou um índice como, por exemplo, o Índice de Precipitação Normalizado (WMO, 2006).

A severidade da seca depende da ausência, a duração do evento na região afetada e da necessidade do recurso hídrico para manutenção dos sistemas ambientais e para as atividades humanas (SOUSA JÚNIOR e LACRUZ, 2015). Assim, o grau de severidade da seca é medido a partir dos impactos causados por esse fenômeno aos sistemas ambientais e as atividades socioeconômicas (WILHITE, 2000).

A duração do evento da seca geralmente dura de meses a anos, e quando começa a ausência de precipitação os efeitos da seca são percebidos com atraso (dois a três meses depois). Especialmente a seca evolui em áreas afetadas por eventos intensos de forma gradativa, tendo as áreas mais afetadas pela seca seus efeitos prolongados entre uma estação do ano e outra, e até mesmo de um ano para outro devido à persistência do fenômeno (SOUSA JÚNIOR et al., 2015).

Existem várias formas pela qual a seca é sentida, isso depende quais sistemas ambientais e sociais a população identifica suas consequências primeiro. Nos sistemas ambientais a população identifica a seca através da ausência de chuvas ou diminuição delas no período esperado, redução da vazão de rios e até mesmo presença de rios secos, redução de espécies vegetais devido ao estresse hídrico ou diminuição da vegetação verde, e nos sistemas sociais as companhias responsáveis pela gestão dos recursos hídricos percebem os efeitos da seca na redução dos níveis de água em reservatórios, gerando consequências nas atividades socioeconômicas que dependem do recurso.

Devido à seca gerar vários impactos na agricultura, atividades socioeconômicas, e em regiões climáticas e hidrológicas diferentes, torna-se difícil chegar a uma definição consensual sobre seca. Assim, a seca apresenta efeitos diversos nos sistemas ambientais e socioeconômicos, que utilizam a água e sentem os impactos da seca de forma distinta. Nesse sentido, para estudar a seca e seus impactos foram classificadas quatro categorias de acordo com Wilhite e Glantz (1985), sendo elas (Figura1):

- Seca meteorológica: resulta da falta de precipitação sobre uma região por um longo período de tempo e quando as médias pluviométricas são inferiores à média pluviométrica da região. Esse tipo de seca decorre de elementos atmosféricos como temperatura, humidade do ar, pressão, entre outros. Assim, a seca meteorológica é dependente do local onde ocorre, visto que as condições atmosféricas são distintas de região para região.
- Seca Agrícola: está associada a uma escassez na disponibilidade de água para o desenvolvimento das plantas, ou seja, ocorre um desequilíbrio entre água no solo e a necessidade das culturas, e na transpiração das plantas, que também são dependentes do tipo de solo e cultura. Como impactos são apresentadas perdas agrícola, econômica, e consequências sociais como fome e migração. Esse tipo de seca causa grandes impactos na região do semiárido brasileiro na agricultura de sequeiro, que é uma atividade bastante utilizada na região. Outra característica desse tipo de seca é que seus primeiros sinais só podem ser notados posteriormente ao início da seca meteorológica, porém isso dependerá também da quantidade de água no solo previamente ao evento de seca.
- Seca hidrológica: está relacionada a uma deficiência no abastecimento das águas superficiais e subterrâneas, como por exemplo, redução dos níveis de água em

escoamentos superficiais, rios, reservatórios, e reservas de água subterrânea (aquíferos), entre outros. Os principais impactos dessa seca é o racionamento de água para população, ou o colapso nos sistemas de abastecimento de água para cidades, irrigação e indústrias. Essa seca ocorre temporalmente mais atrasada do que a seca agrícola por necessitar de um período maior de tempo para que os impactos do déficit da precipitação sejam sentidos. Além disso, outra característica é que essa seca não depende apenas de fatores climáticos ou meteorológicos pode estar relacionada também a alterações no estado do solo, como alterações ou degradação no uso do solo, bem como mau gerenciamento dos recursos hídricos.

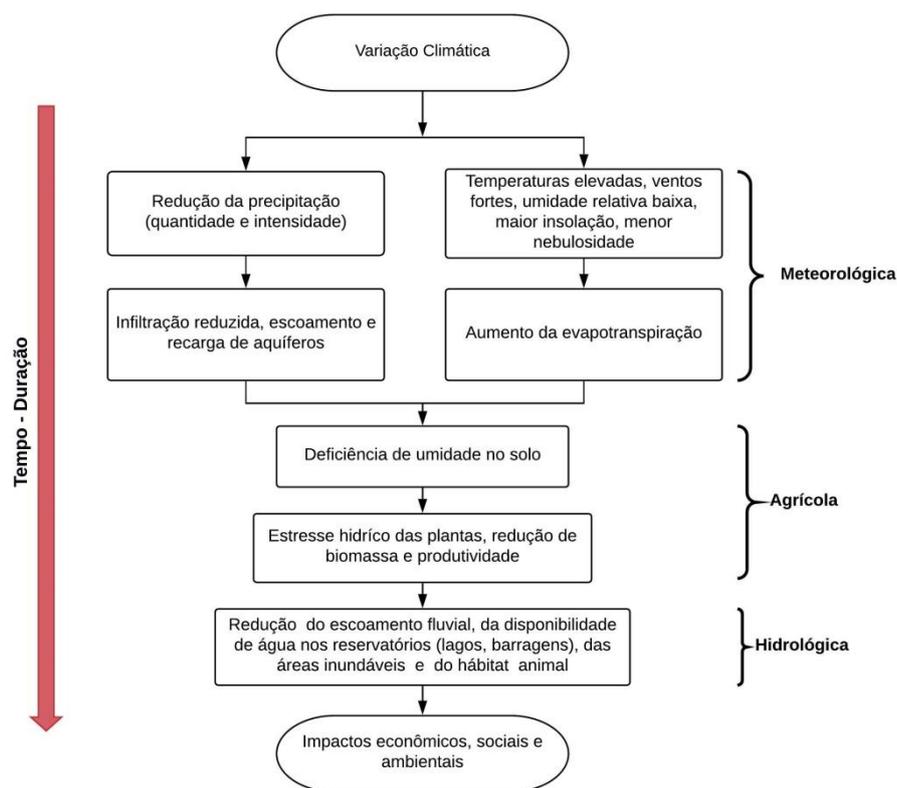
- Seca socioeconômica: implica no contínuo déficit de precipitação que gera um abastecimento insuficiente para atender as demandas econômicas e sociais, ocorrendo uma desigualdade entre a oferta de água e a sua demanda.

A partir das características das categorias de seca abordadas por Wilhite e Glantz (1985), percebe-se que todos seus tipos estão diretamente relacionados, e com suas origens centradas na deficiência da precipitação, que afeta a disponibilidade de água para os sistemas naturais e as atividades socioeconômicas.

Uma situação que exemplifica bem a interação das categorias de seca (Figura 1) é quando, por exemplo, as precipitações são inferiores ou ausentes em um período onde ocorre o crescimento das plantas, a produtividade agrícola e o desenvolvimento dos ecossistemas são limitados decorrentes da deficiência de umidade no solo, ocorrendo assim à seca agrícola. A persistência da falta de chuvas interfere na umidade do solo, no escoamento superficial, nos rios, e armazenamento de águas subterrâneas e superficiais, devido o aumento da evapotranspiração e redução da precipitação, causando assim a seca hidrológica.

Essas situações são decorrentes de longos períodos com déficits anormais de chuva, resultantes da seca meteorológica que ocorrem em períodos estendidos (uma década ou mais). Vale ressaltar que o primeiro nível a ser afetado durante um evento de seca é o agrícola, devido a sua forte dependência à água disponível no solo (SOUSA JÚNIOR e LACRUZ, 2015). Evidencia-se ainda que, com o agravamento da seca meteorológica, pode ocorrer as secas agrícolas, hidrológicas e socioeconômicas no mesmo tempo, o que provoca consequências graves para a sociedade (WMO, 2006).

Figura 1-Tipos de secas e seus impactos



Fonte: Adaptado de Wilhite (2001).

Observando as interações entre os tipos de seca na Figura 1, pode-se compreender que a forma como as secas interagem depende das características da região onde esse fenômeno ocorre. Na Região Nordeste do Brasil, por exemplo, por apresentar como características solos rasos, que apresentam baixa capacidade de armazenamento de água, os processos de interação entre os tipos de secas ocorrem de forma diferente, tendo em vista que grandes parcelas das precipitações escoam superficialmente. Desta forma, uma ausência de chuvas ou redução ocasiona de forma conjunta redução na umidade do solo e de águas nos reservatórios, ocorrendo ao mesmo tempo seca agrícola e hidrológica (CANAMARY, 2015).

Compreendido os tipos de secas e suas interações, também é necessário discutir alguns conceitos que são culturalmente confundidos com esse fenômeno. Entre os conceitos que geralmente são confundidos com o de seca, destacam-se: estiagem, aridez e escassez. A seca é considerada uma estiagem prolongada (com um intervalo de meses até anos), que provoca uma redução acentuada dos recursos hídricos, interrompe o ciclo hidrológico e desequilibra os sistemas naturais (CASTRO et al., 2003).

A estiagem compreende a um período prolongado de baixa pluviosidade, retardo do período chuvoso ou ausência das chuvas esperadas para uma determinada estação, em que a perda da umidade do solo é superior à sua reposição. Nesse processo existe um atraso no período chuvoso de forma precisa durante um período superior a quinze dias ou quando as médias pluviométricas mensais dos meses chuvosos são inferiores a 60% das médias mensais de longo período medidos para uma região (CASTRO et al., 2003). Assim, a seca é considerada uma forma duradora da estiagem, e a estiagem ocorrem por um período menor e menos intenso que a seca (KOBAYAMA et al., 2006).

A Aridez é considerada uma característica permanente de um clima seco e é definida através das médias climáticas da área analisada, já a escassez de água ocorre quando a população usa mais água do que está disponível (DE NYS et al., 2016).

## **2.2 O Nordeste Brasileiro e o Fenômeno da Seca**

Dentre as catástrofes naturais, os eventos meteorológicos extremos correspondem a aproximadamente 85%, sendo a seca a causadora da maior parte dos prejuízos (HAIED et al., 2017). Na América do Sul existem três núcleos de regiões semiáridas, separadas geograficamente (AB'SÁBER, 1974), são elas: o deserto do Atacama que se estende desde Norte do Chile até a divisa com o Peru, a parte central e sul da Argentina, e no Brasil a região nordeste (MARIN et al., 2013).

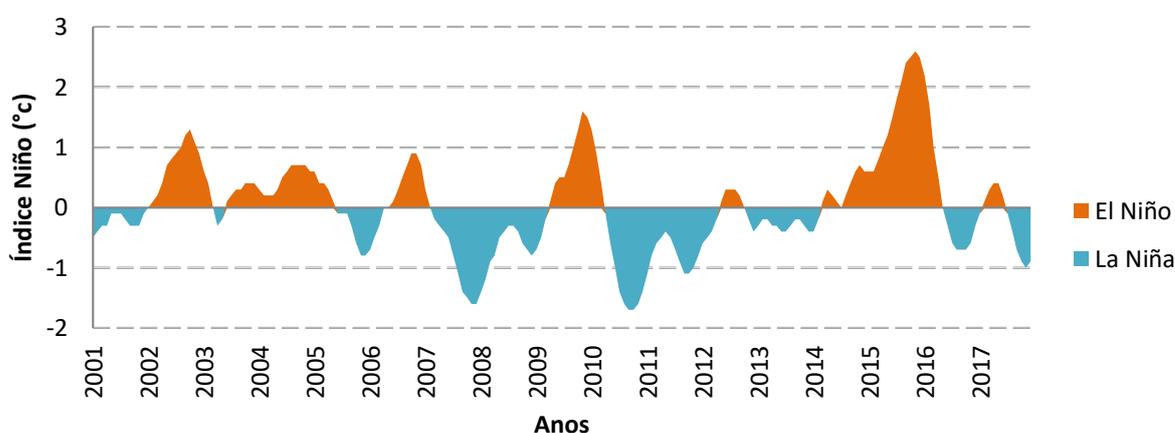
A origem do fenômeno da seca tem sido explicada do ponto de vista físico a partir de anomalias da circulação atmosférica derivada ou relacionada a variações na circulação oceânica. Isso ocorre por os oceanos exercerem influência sob a atmosfera e serem a principal fonte de calor que conduz a circulação atmosférica, bem como de umidade, que é convertida em precipitação. Desta forma, no semiárido brasileiro a seca está intimamente ligada a mudanças no comportamento da Temperatura de Superfície do Mar (TSM) nos oceanos Atlânticos e Índico e a relação com a dinâmica das circulações atmosféricas na escala zonal (KAYANO et al., 2009).

O gradiente Meridional das anomalias de TSM sobre o oceano Atlântico tropical e o fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) sobre o Pacífico equatorial na porção Central e Leste, modificam interanualmente o clima da América do Sul. O fenômeno El Niño se caracteriza pelo aquecimento anormal das águas do Pacífico Equatorial na parte central e leste, o que provoca um deslocamento da circulação da célula de Walker, que passa a ascender no oceano pacífico com um ar quente e úmido que provoca chuvas nessa região, e descer sobre a região Nordeste do Brasil, com o ar seco dificultando a formação de nuvens

e ocorrência de chuvas na estação chuvosa (KAYANO et al., 2009). A Figura 2 apresenta as anomalias da TSM do oceano Pacífico durante o período de estudo abordado nessa pesquisa para analisar as ocorrências de secas.

O Índice Niño tornou-se a forma padrão para se identificar os eventos de El Niño e La Niña no Oceano Pacífico Tropical. O índice apresenta uma variação ao longo da série que indica maior ou menor intensidade dos eventos de El Niño e La Niña e podem ser relacionados à redução das chuvas no Nordeste brasileiro. A intensidade dos eventos é subdividida em: Fraco (0,5 a 0,9), Moderado (1,0 a 1,4), Forte (1,5 a 1,9) e Muito Forte ( $\geq 2,0$ ).

Figura 2-Anomalia da TSM do oceano Pacífico de 2001 a 2017 (El Niño e La Niña)



Fonte: Adaptado de Correia et al. (2016).

Dentro do quadro de secas registradas no Nordeste, recentemente a última seca registrada de 2012 a 2016 foi considerada uma das piores já registradas (GODIM et al., 2017). Com base nesse registro de secas foi observado que o período de secas coincidiu com o evento El Niño, sendo considerado Muito forte: 2015–2016 e Fraco: 2014–2015 (Figura 2).

Apesar das distribuições da TSM sobre o Pacífico Equatorial influenciarem na pluviometria da região do Nordeste brasileiro, os fenômenos atmosféricos e oceânicos sobre o Atlântico tropical são mais significativos estatisticamente para a variabilidade interanual do clima sobre o Nordeste brasileiro do que os fenômenos que ocorrem sobre o Pacífico (CHU, 1984; HASTENRATH et al., 1987). As relações entre secas no Nordeste e os padrões de anomalias de TSM do Atlântico foram iniciadas por Serra (1941) e documentadas por Hastenrath e Heller (1977).

O padrão de anomalias de TSM sobre o Atlântico tropical associados às reduções pluviométricas no Nordeste é denominado de “Dipolo do Atlântico tropical”. Esse padrão de anomalias da TSM se caracteriza pelo gradiente meridional de anomalias com sinais oposto ao norte e ao sul do equador sobre o Atlântico tropical, o que impacta grandemente a posição latitudinal da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical), influenciando dessa forma na distribuição das precipitações sobre o Atlântico Equatorial, a região do Nordeste do Brasil e uma parte Central da Amazônia (NOBRE et al., 1996).

O Dipolo do Atlântico Tropical é um fenômeno oceânico que dificulta a formação de nuvens, provocando reduções no regime pluviométrico. Esse fenômeno é identificado a partir de mudanças anômalas na temperatura da superfície do mar no oceano Atlântico Tropical. Assim, quando as águas do Atlântico Tropical Norte estão mais quentes e as águas do Atlântico Equatorial e Tropical Sul estão mais frias, ocorrem movimentos descendentes de massas de ar frio e seco dos altos níveis da atmosfera sobre o Nordeste do Brasil atrapalhando a formação de nuvens e diminuindo as precipitações, a chamada Fase Positiva do Dipolo, que pode provocar seca. Em contrapartida, na Fase Negativa do Dipolo, ocorre quando as águas do Atlântico Tropical Norte estão mais frias e as águas do Atlântico Tropical Sul estão mais quentes correm aumentos nos movimentos ascendentes de massas, impulsionando a formação de nuvens e gerando precipitações maiores na região (ARAGÃO, 1996).

Em resumo as precipitações no Nordeste dependem de pelo menos quatro sistemas atmosféricos importantes, são eles: A ZCIT que é responsável pelas precipitações que ocorrem no centro Norte da região no período de fevereiro a maio que; os distúrbios ondulatórios de leste que são responsáveis pelas chuvas na parte leste do Nordeste entre maio e agosto; os sistemas frontais que ocasionam chuva no centro sul do Nordeste de novembro a janeiro; os vórtices ciclônicos de altos níveis a partir do posicionamento provocam chuvas na primavera, verão e outono, durante o período de setembro a abril, com máxima no mês de janeiro (CALBETE et al., 1996; COUTINHO et al., 2010).

Um outro fator que influencia na diminuição das precipitações na região do semiárido é a perda da umidade das principais frentes frias que se dirigem para o interior do Nordeste. Isso ocorre quando frentes frias vão perdendo umidade ao se deslocarem para o interior do Nordeste (efeito de continentalidade), gerando a perda de umidade, e pequenas precipitações no semiárido Nordestino. Essas características são bem marcantes nas regiões fronteiriças dos Estados de Pernambuco, Bahia e Piauí (CORREIA, 2016).

O relevo também influencia as precipitações na região Nordeste, pois existe a formação de microclimas decorrentes da presença de serras e montanhas, que se caracterizam por serem regiões de maiores precipitações e condições de umidade, em contrapartida o relevo impede a circulação das massas de ar e a penetração no semiárido, essa situação pode ser minimizada quando os sistemas atmosféricos possuem maior força e conseguem ultrapassar o relevo. Entre essas áreas no Nordeste que tem essa característica temos a Chapada da Diamantina na Bahia, e o planalto da Borborema que contribui para a formação desses microclimas nos estados da Paraíba e Pernambuco (CORREIA, 2016).

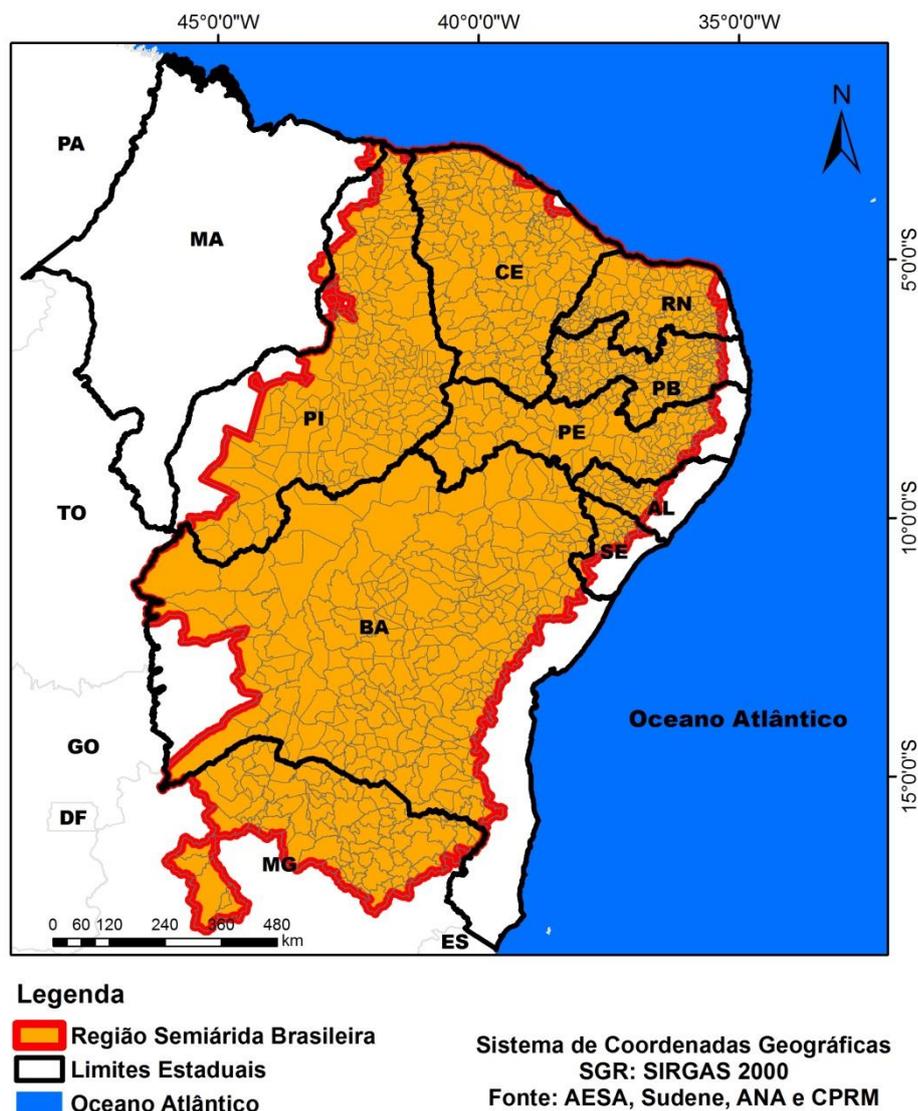
No aspecto climático a região semiárida apresenta como características de destaque a aridez, má distribuição espacial temporal da precipitação, que associados a baixos totais anuais de chuva sobre a região, ocasionam o aumento de estiagens e conseqüentemente a ocorrência de eventos de seca. Em média a região do semiárido tem uma precipitação acumulada inferior a  $800 \text{ mm/ano}^{-1}$ . Na parte norte da região Nordeste é onde se situa maior parte do semiárido brasileiro, nessa região o período chuvoso ocorre entre os meses de fevereiro a maio, e a estação seca acontece na maior parte da região nos meses de agosto e outubro (MARENGO, 2011).

O semiárido brasileiro foi oficialmente definido pelo Ministério da Integração Nacional (MIN, 2005) utilizando os seguintes critérios para definir os municípios que se inserem na região semiárida (BRASIL, 2007): Precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 mm; Índice de aridez de até 0,5 calculado pelo balanço hídrico que relacionou as precipitações e a evapotranspiração entre 1961 e 1990; e o Risco de seca ou prolongamento da estação da seca de um ano maior que 60 % baseando-se no período de 1970 e 1990.

Assim com base nesses critérios o semiárido brasileiro foi definido possuindo uma área de 980.133,07 km<sup>2</sup>, que compreende 1.135 municípios. Estando 1.050 municípios situados nas regiões semiáridas dos estados do Maranhão, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Alagoas, Sergipe, Bahia, e 85 municípios situados em Minas Gerais, como pode ser observado na Figura 3 (MARIN et al., 2013).

Vale ressaltar que dos 24 milhões de pessoas que habitam a região semiárida no Nordeste, cerca de 10 milhões situam-se na zona rural. Porém, tem sido observado o desenvolvimento de grandes centros urbanos que tem influência regional e até mesmo nacional, é o caso de Campina Grande, na Paraíba; Caruaru, em Pernambuco; Feira de Santana e Vitória da Conquista, na Bahia, apontados como os municípios mais populosos do semiárido (MEDEIROS et al., 2012).

Figura 3-Delimitação do Semiárido brasileiro.



Fonte: Adaptado de ANA (2017).

A denominação semiárida é utilizada para delimitar áreas onde a quantidade de precipitação é menor que a quantidade de água que evapora. Assim no Brasil identificam-se quatro tipos de clima semiárido (MARIN et al., 2013): semiárido com 6 meses secos sem ocorrência de chuvas, que ocorre em todos os estados da região Nordeste, mas com maior incidência no Piauí e no leste do Maranhão; semiárido de 7 a 8 meses secos, que predomina nos sertões do Ceará, Paraíba, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Sergipe e Bahia, e uma parte do sertão alagoano e piauiense; semiárido que se prolonga de 9 a 10 meses secos, que ocorre nos sertões da Paraíba, parte do Rio Grande do Norte, nos sertões da Bahia e Pernambuco; e por fim o semiárido de clima mais severo com duração de 11 meses secos, que ocorre na Paraíba, nos municípios de Barra de São Miguel, Cabaceiras, Gurjão,

Juazeirinho, São Domingos do Cariri, São João do Cariri, São Vicente do Seridó e Soledade, e no sertão baiano, em Abaré, Chorrochó, Macururé e Rodelas.

No estudo de Correia et al. (2011) foi observado os totais médios mensais da precipitação no Semiárido. Sendo as chuvas concentradas em poucos meses (3-4 meses), com um padrão intenso e ocorrendo em poucos dias do ano. Constatou-se que os quatro meses mais chuvosos ocorrem de fevereiro a maio para os Estados que estão na parte Norte do Nordeste, como Ceará, Rio Grande do Norte e parte da Paraíba, e na parte Oeste da Paraíba, Pernambuco, Leste do Piauí e região Norte da Bahia, a quadra chuvosa, que corresponde aos quatro meses com maiores totais pluviométricos, ocorrem de janeiro a abril, sendo possível em algumas dessas regiões verificar chuvas no mês de dezembro.

Compreender os elementos que contribuem e caracterizam a seca no nordeste é algo complexo, devido à sua periodicidade e por ser um fenômeno que não tem sua causa relacionada apenas as influências climáticas locais, como também sofre com os fenômenos que atuam em escalas globais do clima.

Apesar de a seca ser um fenômeno natural e que pode ocorrer em várias regiões do Brasil é na região do semiárido que se têm os maiores destaques históricos de Seca crônica. Ocorrem relatos sobre secas na região semiárida desde quando os portugueses chegaram no Brasil, e fizeram os primeiros registros durante o século XVI (Tabela 1).

Devido às condições climáticas nas quais a região semiárida é caracterizada, a vegetação local, conhecida como caatinga também se desenvolve e se adapta de acordo com as condições climáticas da região. Santos e Brito (2007) sugerem que a vegetação do bioma Caatinga tem uma forte correlação e é mais dependente de eventos extremos de chuva do que a vegetação de Mata Atlântica.

A Caatinga é um ecossistema predominante na região Nordeste, cuja flora e a fauna apresentam tolerância e adaptação às condições climáticas da região. A composição florística da Caatinga não é regular e é altamente dependente da quantidade das precipitações. As espécies de plantas apresentam espinhos, sistemas de armazenamento de água em raízes e caules modificados e sistemas fisiológicos adaptados, a exemplo é quando ocorre o fechamento dos estômatos nas horas mais quentes do dia ou durante os eventos de seca extrema, para não perder umidade, o que as caracterizam como plantas xerófilas (GIULIETTI et al., 2006).

Porém, a Caatinga, assim como muitos outros biomas brasileiros, tem sofrido um processo de destruição massivo tanto devido a períodos de secas longos e as atividades antrópicas, o que acarreta na perda da qualidade desses ecossistemas locais e do solo,

principalmente por esse solo ser afetado pela falta de umidade prolongada especialmente na região do Semiárido. A destruição da vegetação nessa região vem contribuindo para processos de desertificação e salinização. Segundo Rocha et al. (2011) é estimado que 500.000 ha de Caatinga sejam desmatados por ano, sendo um dos biomas brasileiros mais degradados pelas atividades humanas.

Tabela 1-Histórico da ocorrência de seca no semiárido do Brasil.

| Décadas   | Séc. XVI     | Séc. XVII | Séc. XVIII                                  | Séc. XIX                  | Séc. XX                             | Séc. XXI          |
|-----------|--------------|-----------|---------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| <b>00</b> |              | 1603      | 1707                                        | 1804                      | 1900                                | 2001              |
| <b>10</b> |              | 1608      | 1710-1711                                   | 1808-1809<br>1814         | 1903<br>1915<br>1919                | 2003<br>2012-2017 |
| <b>20</b> |              | 1614      | 1721-1722<br>1723-1724<br>1725-1726<br>1727 | 1824-1825<br>1829         |                                     |                   |
| <b>30</b> |              |           | 1730<br>1736-1737                           | 1830<br>1833<br>1844-1845 | 1932                                |                   |
| <b>40</b> |              | 1645      | 1744-1745<br>1746-1747                      |                           | 1942                                |                   |
| <b>50</b> |              | 1652      | 1751<br>1754                                |                           | 1951-1952<br>1953<br>1958           |                   |
| <b>60</b> |              |           | 1760<br>1766                                |                           | 1962<br>1966                        |                   |
| <b>70</b> |              |           | 1771-1772<br>1777-1778                      | 1870<br>1877-1878<br>1879 | 1970<br>1976<br>1979                |                   |
| <b>80</b> | 1583<br>1587 |           | 1783-1784                                   | 1888-1889                 | 1980-1981<br>1982-1983              |                   |
| <b>90</b> |              | 1692      | 1791-1792<br>1793                           | 1898                      | 1990-1991<br>1992-1993<br>1998-1999 |                   |

Fonte: Adaptado de Correia et al. (2011).

Os impactos da seca têm sido bastante discutidos, dada sua complexidade e por afetarem diretamente as populações locais, pois dificultam o acesso a atividades econômicas rentáveis. Como a principal atividade da região semiárida é a agricultura de subsistência e a pecuária, que é uma atividade desenvolvida na região por mais de 10 milhões de habitantes (MMA, 2017), e que se constitui como um dos maiores fatores para diminuir a vulnerabilidade socioeconômica dessas populações, a seca provoca grandes impactos para essas atividades na região.

Pensando nesse aspecto, compreender a dinâmica com que as chuvas ocorrem e variam espacialmente e temporalmente contribui para que atividades como a agricultura de subsistência e pecuária, entre outras, possam ter o seu devido planejamento a partir dessas informações e não se tenham grandes perdas, pois o semiárido é responsável por uma produção significativa de alimentos, especialmente feijão, milho e mandioca, e uma pecuária baseada na criação de bovinos, ovinos e caprinos, que atendem as necessidades das populações da região (DE NYS et al., 2016).

Aos impactos ocasionados pela seca, como os processos de desertificação e salinização, temos também a origem desses processos ligadas ao uso do solo indiscriminado com práticas inapropriadas ao clima e bioma da Caatinga, somando-se a isso temos os impactos que decorrem de uma gestão pouco eficiente dos recursos hídricos na região. Apesar de a política de criação de barragens e açudes, transposição do rio São Francisco, implantação de cisternas terem sido um avanço para o acesso à água no semiárido pelas populações rurais, ainda é insuficiente quando considerada a necessidade de água dessas populações para a manutenção dos seus sistemas produtivos, principalmente em situações de seca persistente.

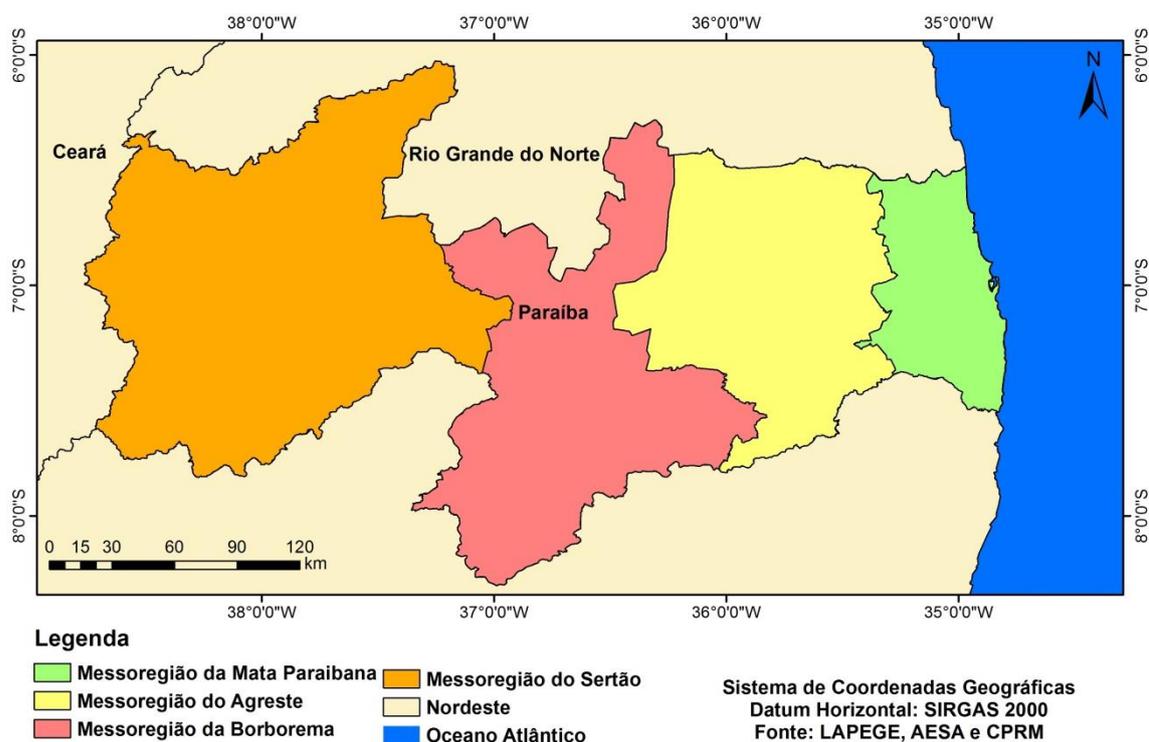
A Seca é um dos principais eventos que geram decretos de calamidade pública (CASTRO, et al. 2003) de acordo com o Manual Nacional de Desastres. Esse evento é frequentemente classificado como recorrente, devido a seu alcance e periodicidade cíclica, acaba prejudicando as atividades industriais, agrícolas e as comunidades em geral que estão situadas nas localidades que sofrem com a seca. Esse fenômeno tem sido discutido por seus impactos diretos a sociedade e aos ecossistemas e é alvo de agendas nacionais de combate à desertificação e de políticas públicas estruturantes e não estruturantes no Nordeste e Sul do país (CASTRO et al., 2002; CASTRO et al., 2003; BRASIL, 2012).

A região semiárida é uma região que sofre com mudanças climáticas, qualquer redução em relação ao valor médio pluviométrico anual pode gerar grandes impactos. Antes o ecossistema era resiliente e mais adaptado aos eventos de seca, no entanto, agora com o uso da terra sem práticas sustentáveis, a região está mais vulnerável. Assim, um evento de seca significa, falta de água para agricultura, para consumo humano, animais domésticos e espécies da fauna e flora do semiárido. Entre os impactos gerados podem ser citados a perda da safra agrícola, a mortandade de animais, desemprego, fome e em casos extremos a morte de pessoas (DE NYS et al., 2016).

### 2.3 A seca na Paraíba e seus impactos mais recentes

Na região Nordeste, o estado que possui os menores valores pluviométricos é a Paraíba (CORREIA et al., 2016). A Paraíba possui uma área de 56.372 km<sup>2</sup>, composto por 223 municípios, sendo que 170 estão inseridos na região semiárida (FRANCISCO, 2010). A região de semiárido do Estado se localiza nas mesorregiões do Agreste Paraibano, Borborema, e Sertão paraibano (MOREIRA, 1989), estando essas regiões sujeitas a estiagens que de forma prolongada são consideradas secas (Figura 4).

Figura 4- Localização das mesorregiões geográficas do estado da Paraíba.



Fonte: Autora (2019).

Nessas regiões ocorrem predominantemente rochas cristalinas, solos rasos e baixos índices pluviométricos, que variam entre 300 a 800 mm e o período chuvoso ocorrendo de 3 a 5 meses (AES A, 2006). Em grande parte da Messorregião da Borborema e do Sertão predomina o clima semiárido quente, com chuvas irregulares que variam em torno de 500 mm anualmente e temperatura média de 26°C, no entanto, na mesorregião do Sertão Paraibano a temperatura média é de 27°C (CEPED, 2013).

A cobertura vegetal da região semiárida do Estado se caracteriza por apresentar a vegetação da Caatinga do tipo arbustiva densa ou aberta, que perde suas folhas durante o período de seca, tornando a florescer no período chuvoso. Nas regiões mais secas como o

Cariri Paraibano a Caatinga é definida como hiperxerófila, já nas proximidades do Agreste e Sertão apresenta-se uma Caatinga do tipo hipoxerófila. Algumas espécies da vegetação Caatinga são: xiquexique, mandacaru, macambira, baraúnas, aroeira, angico, umbuzeiro, juazeiro, entre outros (CEPED, 2013). Grande parte da Caatinga na região semiárida foi degradada durante muito tempo para o plantio de algodão e criação de gado.

Durante o período de 1991 a 2012 foram registrados oficialmente na Paraíba 1.984 casos de estiagem e seca, especializados dentro de um total de 212 municípios. Os eventos de seca e estiagem ocorreram em diferentes mesorregiões do Estado, no entanto, o número de registro maior foi encontrado para as mesorregiões do Agreste Paraibano e Borborema, onde os índices pluviométricos são mais baixos e irregulares, e à mesorregião do Agreste é a que apresenta o menor número de eventos de seca, devido à proximidade com o Oceano Atlântico o que influencia no regime hídrico da região (CEPED, 2013).

Segundo Macedo et al. (2010), a seca depende de sistemas meteorológicos que atuam na região e de fenômenos que tem atuação em grande escala e influenciam as variáveis que definem o comportamento e circulação da atmosfera. Nesse contexto, os eventos de seca no Estado da Paraíba podem estar associados a fenômenos como El Niño e Dipolo do Atlântico (aquecimento/esfriamento do Atlântico Norte/Sul).

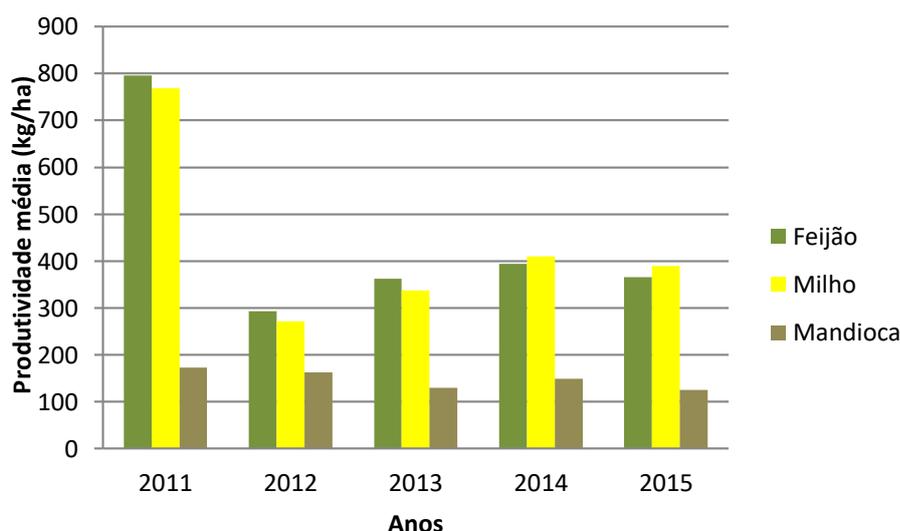
Os eventos de seca sempre impactaram as atividades agropecuárias no Nordeste, sendo muitas vezes responsáveis pelo insucesso dessa importante atividade na região (CORREIA et al., 2011). Nesse contexto, a Paraíba durante o evento de seca mais recente de 2012 a 2016 apresentou os maiores déficit de chuva na mesorregião da Borborema. Segundo Medeiros et al. (2017) em 2012 a mesorregião da Borborema apresentou um déficit de chuva de 69% abaixo da média, enquanto que o a mesorregião do Sertão paraibano teve um déficit de 56,3%.

Segundo Medeiros et al. (2017) durante o período de seca de 2012 a 2016 houve uma redução do déficit de chuva no período de 2012 a 2016, porém devido a variabilidade espaço-temporal característica das chuvas na região, não ocorreu uma recuperação hídrica satisfatória para as atividades agrícolas e recuperação dos reservatórios. Assim, a seca prolongada que assolou a Paraíba trouxe grandes problemas, principalmente para a agricultura de sequeiro e pecuária.

No período de seca de 2012 a 2016 todos os setores da economia de forma direta ou indireta foram afetados na Paraíba. Nesse contexto estão à agricultura de sequeiro e de subsistência, que possui como as principais culturas representativas da lavoura temporária e

alimentos de grande parte dos pequenos e médios agricultores na Paraíba, as culturas do milho, feijão e a mandioca (MEDEIROS et al., 2017). Sendo essas culturas totalmente dependentes do regime de chuvas durante o período chuvoso, e segundo dados da Gerência Executiva Estadual de Defesa Civil (GEEDECPB, 2016) foram muito impactadas pela seca de 2012 a 2016, sendo que no primeiro ano dessa série o milho e o feijão sofreram uma queda drástica (Figura 5).

Figura 5-Produção agrícola de feijão, milho e mandioca na Paraíba (2011–2015).



Fonte: Adaptado da Gerência Executiva Estadual de Defesa Civil da Paraíba.

Ainda de acordo com a Figura 5, pode ser observado o impacto da seca principalmente nas culturas de feijão e milho, que tem uma queda nas suas produtividades ano a ano, mas de forma maior em 2012 e 2013, posteriormente a produção tem um leve aumento em 2014 e em 2015 declina, provocando impactos negativos para a agricultura de subsistência e pequenos agricultores.

Além da agricultura a pecuária foi intensamente afetada pela seca, que segundo dados da Federação da Agricultura e Pecuária da Paraíba (FAEPA, 2016), a longa estiagem provocou perda de aproximadamente 40% do rebanho do Estado afetando o rebanho bovino, equino, suíno, caprino, e ovino, que tiveram sua maior perda a partir de um ano e meio após 2012. Por consequência a perda animal a Paraíba teve uma redução significativa na produção do leite, que se igualou a produção agrícola e também teve sua maior perda na produção em 2012.

Entre os anos de 2012 a 2016, os recursos hídricos da Paraíba distantes da faixa litorânea foram intensamente impactados pela seca, as chuvas ocorridas não conseguiram recarregar os mananciais e aos poucos a capacidade hídrica do Estado foi sendo reduzida. Devido à seca intensa e a alta redução das reservas hídricas foi observado à necessidade de adoção de regras de restrição de uso que variaram desde irrigação, que começou a ocorrer à captação em dias alternados, como também medidas de restrição de áreas irrigadas e tipos de culturas e em algumas situações a interrupção total da irrigação, como ocorreu no açude Epitácio Pessoa, em Boqueirão (GODIM, 2017). Esse açude tem uma parte de suas águas captadas da sub-bacia do Alto paraíba.

#### **2.4 Dados de sensoriamento remoto aplicados no estudo de secas**

Estudos referentes ao fenômeno da seca sempre foram feitos a partir de dados históricos de precipitação, temperatura, evaporação e áreas irrigadas, por meio de métodos convencionais. Porém, a seca é um fenômeno que afeta grandes regiões, devido a essa característica seu monitoramento é dificultado utilizando-se equipamentos tradicionais baseados em medições de campo. Para entender o risco de seca de uma região é necessário compreender a frequência, severidade e extensão espacial com que ocorrem os eventos de seca, além do que a vulnerabilidade da população ou das atividades socioeconômicas aos efeitos do fenômeno (UNISDR, 2009). O conhecimento das causas da vulnerabilidade a seca de uma região é um importante elemento para a gestão desse fenômeno (SOUSA JÚNIOR et al., 2015).

Os pesquisadores que analisam a seca através de estações de medição meteorológicas ou hidrológicas locais, enfrentam uma série de problemas na aquisição de dados, pois essas estações apresentam geralmente pouca distribuição, dificuldade na disponibilidade dos dados, presença de interrupção nas séries e inconsistências, demora na atualização dos dados, e principalmente não apresentam a variação espacial do fenômeno. Desta forma, os estudos sobre seca são prejudicados o que afeta as principais medidas de mitigação, bem como a gestão desse fenômeno nas regiões afetadas.

Assim, o sensoriamento remoto e os sistemas de informações geográficas vêm sendo empregados no estudo da seca, no caso dos sistemas de sensoriamento remoto, em razão da sua eficiência em coletar informações de grandes áreas de forma contínua, completa (visão sinóptica) e do seu baixo custo se comparado com medições de campo, para que assim auxiliem na gestão do fenômeno (SOUSA JÚNIOR et al., 2015).

O sensoriamento remoto conjuntamente com os sistemas de informações geográficas tem apresentado grandes alternativas para o estudo de eventos extremos. Os satélites oferecem informações através da sua cobertura, monitorando a superfície terrestre bem como as estações chuvosas e secas de uma região. Para que desta forma possa contribuir na redução de impactos e no fornecimento de informações para definir planos estratégicos de combate a seca (MOREIRA et al., 2015).

A grande utilização de dados obtidos por sensores remotos justifica-se pela facilidade em se obter esses dados, na disseminação destes dados e das técnicas de tratamento dos mesmos, na facilidade dos sensores remotos recobrirem grandes áreas, e principalmente na capacidade dos sistemas sensores produzirem produtos em diversas faixas espectrais, tornando possível o estudo e a análise de diferentes elementos, em diferentes faixas espectrais.

Apesar das grandes vantagens do uso de dados de sensoriamento remoto no estudo da seca, essa ferramenta também apresenta algumas necessidades que dificultam seu uso, como o processamento para eliminação de ruídos nas séries de dados, e em alguns estudos, é preciso o trabalho de campo para validar e analisar as informações obtidas através de sensoriamento remoto (SOUSA JÚNIOR et al., 2015).

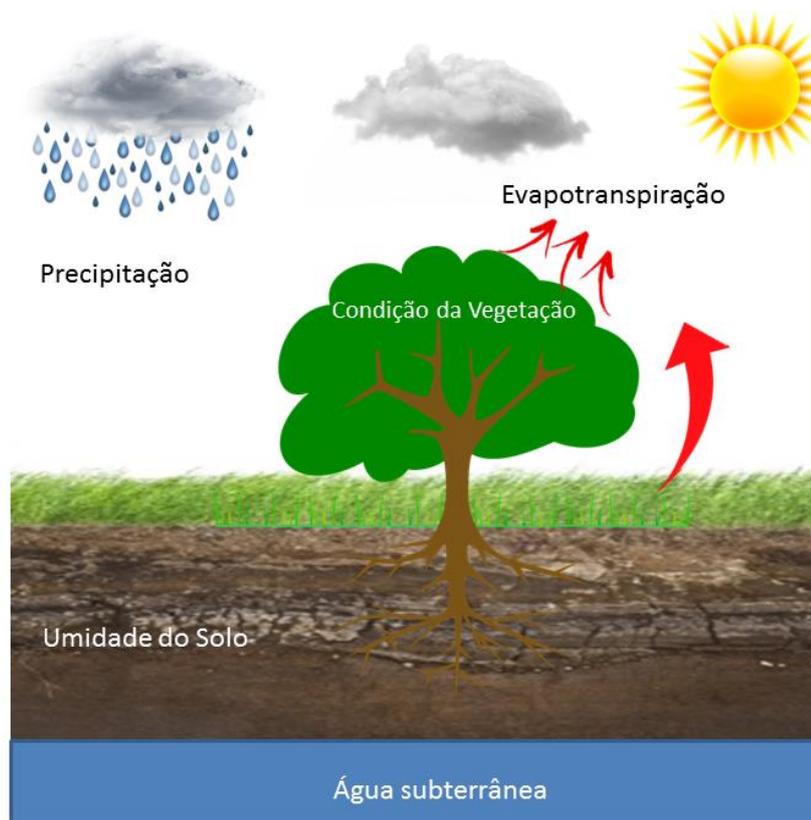
O fenômeno da seca se caracteriza por ocorrer em grandes extensões da superfície terrestre, devido a isso é necessário para sua análise a obtenção de dados de sistemas de sensoriamento remoto que tenham uma cobertura regional. Para determinar qual é o melhor sistema de sensoriamento remoto para análise da seca, observa-se a resolução espacial do sensor, pois ela determina o tamanho dos alvos que podem ser identificados em uma imagem.

Para estudos de seca são utilizadas imagens de alta, média e baixa resolução espacial, entretanto, comumente são mais utilizadas as de média e baixa resoluções espaciais, como imagens do AVHRR (1,1 km), o TRMM (2,4 km a 5,1 km) o sensor MODIS (250 m a 1 km) a bordo dos satélites TERRA-AQUA da NASA, que oferece dados da superfície terrestre referente à temperatura da superfície, reflectância, albedo, índices de vegetação (NDVI, LAI), mudanças na cobertura, entre outras informações. Além disso, imagens de maior resolução como dos Satélites Landsat-7/Sensor ETM+ (15 m a 60 m), Landsat-5/Sensor TM (30 m a 80 m) e o Landsat-8/Sensores OLI e TIRS (15 m a 100 m), disponíveis com diferentes resoluções espaciais e temporais, tem sido amplamente utilizado para gerar informações de uso e cobertura do solo e condição da vegetação, como informações adicionais nos estudos de secas.

O monitoramento de secas a partir do sensoriamento remoto pode ser baseado nas principais variáveis ambientais afetadas pelas secas na região de estudo. Porém, dada à complexidade dos eventos de seca, dificilmente esse fenômeno é detectado apenas por imagens de satélites, sua análise é feita usualmente por meio de índices e metodologias que permitem integrar os dados a fim de caracterizar o fenômeno (SOUSA JÚNIOR et al., 2015).

O sensoriamento remoto tem sido empregado no estudo do ciclo hidrológico (Figura 6), a fim de obter informações importantes para o estudo de eventos de seca. Essa ferramenta tem fornecido dados de precipitação, evapotranspiração, umidade do solo, condição da vegetação, níveis de rios e reservatórios, que são obtidos de forma direta e contínua de uma região.

Figura 6-Elementos do ciclo hidrológico importantes no estudo do fenômeno da seca que podem ser obtidos através do sensoriamento remoto.



Fonte: adaptado de Hayes et al. (2012).

Os indícios de seca têm sido observados a partir das mudanças espaciais e temporais de indicadores ambientais através do sensoriamento remoto, como a cobertura vegetal,

precipitação, temperatura, evapotranspiração, umidade do solo, água subterrânea, níveis de água armazenada em represas e lagos e produtividade agrícola. Para o estudo de algumas dessas variáveis ambientais, como também climáticas e econômicas com enfoque no estudo de seca, tem se desenvolvido alguns métodos que integram o sensoriamento remoto com índices de seca.

O índice de seca utilizado conjuntamente com a ferramenta do sensoriamento remoto tem proporcionado análises da ocorrência e severidade dos eventos de seca, esses índices são desenvolvidos baseados nos principais elementos climáticos afetados pela seca. Assim, nos estudos referentes à seca são escolhidos os principais sistemas de sensoriamento remoto que adquirem as variáveis climáticas mais relevantes que são afetadas pela seca e que podem ser mensuradas por sistemas de sensoriamento remoto. O uso do sensoriamento remoto para o monitoramento de eventos de seca é principalmente baseado em precipitação, temperatura, umidade do solo e monitoramento da vegetação (JEYASEELAN, 2004).

A precipitação é uma das variáveis hidrometeorológicas mais analisadas em estudos de seca com o uso do sensoriamento remoto, podendo ser monitorado através de técnicas baseadas nas bandas do visível, infravermelho e micro-ondas, com sensores passivos como o SSM/I, a bordo dos satélites do *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP), e sensores ativos como o *Tropical Rainfall Measuring Mission* – TRMM (SOUSA JÚNIOR et al., 2015).

Através da temperatura da superfície obtida de satélites é possível obter indicadores de seca que indicam o estresse hídrico em culturas e na vegetação, além da baixa taxa de evapotranspiração de culturas. Os dados de temperatura da superfície são utilizados conjuntamente com índices de vegetação a fim de conhecer o estado da vegetação (SOUSA JÚNIOR et al., 2015).

A umidade do solo é a água mantida nos espaços entre as partículas do solo. A umidade do solo na superfície é a água que está nos 10 cm superiores do solo, em contrapartida a umidade do solo na zona da raiz é a água que está disponível para as plantas encontrada nos 200 cm superiores do solo. Na zona radicular a umidade é um indicador padrão para o alerta de seca agrícola. Devido ao solo apresentar poucos centímetros superiores mais expostos à atmosfera, essa situação leva a uma umidade do solo variando rapidamente em resposta à precipitação e à evaporação. Nessa situação o sensoriamento remoto passivo apresenta-se como a metodologia de maior potencial entre as existentes que medem umidade do solo (JEYASEELAN, 2004).

O monitoramento da cobertura vegetal é de suma importância tanto nas fases de mitigação quanto de resposta ao fenômeno da seca. No período da mitigação busca-se monitorar as condições (estado) e a dinâmica da vegetação (desenvolvimento), enquanto que na fase de resposta pretende-se monitorar com o objetivo de adquirir informações a respeito da área afetada pela seca e como a vegetação foi impactada pelo fenômeno. A condição da vegetação se dá a partir da precipitação, da umidade do solo, das práticas e manejo agrícola.

Alterações nesses elementos provocam mudanças no comportamento espectral da vegetação que podem ser detectadas e analisadas através de sensoriamento remoto, por meio da integração de diferentes bandas como o modelo de mistura espectral, a geração de índices de vegetação ou mesmo de índices de seca. Esses índices de vegetação são obtidos através de transformações espectrais de duas ou mais bandas da imagem de satélite que permitem destacar as características da vegetação a partir da resposta espectral da vegetação verde na região do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético (SOUSA JÚNIOR et al., 2015).

As informações referentes às características da vegetação são obtidas através de imagens de sensoriamento remoto da região do infravermelho termal a partir da energia emitida da superfície terrestre que está relacionada com a temperatura da superfície e emissividade dos objetos da superfície (ANYAMBA et al., 2005). Além dessa região ser utilizada para analisar estresse na vegetação também é usada para desenvolver índices que modelam o fluxo de calor sensível e latente, que estão associados com a temperatura de brilho e proporcionam o monitoramento de secas (SOUSA JÚNIOR et al., 2015).

A seca é detectada através do estresse hídrico que causa uma diminuição na atividade fotossintética e na transpiração da vegetação, que por consequência provoca uma expressiva redução do índice de vegetação, e quando ocorre um acréscimo na quantidade de vegetação e atividade fotossintética o índice apresenta um aumento (BONIFACIO; DUGDALE; MILFORD, 1993).

Para superar esses problemas, diversos instrumentos e metodologias associadas à ferramenta do sensoriamento remoto tem sido empregada, foram observados que diversos estudos utilizam índices de seca com base em sensoriamento remoto por essa ferramenta proporcionar um monitoramento espaço-temporal contínuo da condição da vegetação, umidade do solo, ocorrência e severidade das secas, entre outras variáveis ambientais (BAI JIAN-JUN et al., 2017). Índices de seca baseados em dados de sensoriamento remoto têm sido amplamente aplicados para o monitoramento de secas agrícolas (WANG et al., 2016), secas hidrológicas (HATMOKO et al., 2015), e secas meteorológicas (HAIED et al., 2017).

A relação da diminuição da precipitação em um período específico com outras variáveis hidrometeorológicas, como diminuição da umidade no solo, aumento da temperatura e evapotranspiração, provocam uma redução da cobertura vegetal boa (BAYARJARGAL et al., 2006). Sendo essa relação entre as variáveis climáticas e a condição da vegetação utilizada para detectar e analisar a seca, devido ao impacto da seca nesses indicadores ambientais.

## **2.5 Índices e indicadores de seca**

Com a complexidade do fenômeno da seca e suas inúmeras características e impactos distintos em diferentes regiões do mundo, observou-se a necessidade de analisar esse fenômeno através de instrumentos capazes de apresentar suas características espaciais, temporais e de intensidade. Assim, os índices de seca surgem a partir da necessidade de obter medidas que possibilitassem a comparação de secas em regiões climáticas diferentes, como também para comparar eventos de seca de momentos históricos diferentes das regiões ou localidades que se deseja analisar.

Os índices têm como objetivo apresentar quando se inicia e termina um evento de seca, e avaliar sua severidade ao longo do tempo. As técnicas para quantificar a seca têm sido desenvolvidas desde o início do século XX (SOUSA JÚNIOR et al., 2015). Essas técnicas consistem basicamente nos índices de seca que tem propiciado análises temporais e espaciais do fenômeno, bem como o monitoramento a curto e longo prazo, o que possibilita estudos de predição para o fenômeno.

Os índices de seca são basicamente representações numéricas computadas referentes à severidade das secas, avaliadas com base nas variáveis hidrometeorológicas que são os indicadores ou parâmetros usados para apresentar a condição de seca (WMO, 2016).

A literatura apresenta uma grande quantidade de índices de seca disponíveis, no entanto, a melhor escolha para cada tipo de estudo depende de algumas características, como as informações disponíveis, os aspectos climáticos da região analisada, qual o tipo de seca (meteorológica, Agrícola ou hidrológica), a escala espacial (continental, nacional ou regional), o objetivo da pesquisa e o tipo de impacto, seja na vegetação, na agricultura, social, econômico, entre outros (NIEMEYER, 2008).

A seca pode ser identificada através de uma série histórica de dados meteorológicos, índices que quantificam as secas e análises estatísticas. Os índices utilizam equações empíricas para identificar os períodos de seca de forma pontual ou regional. Esse procedimento foi utilizado por vários pesquisadores para caracterizar as secas no Nordeste

(XAVIER et al., 1984; KUMAR et al., 1989; LIMA et al., 1989; REPELLI et al., 1991; AZEVEDO et al., 1994; FREITAS, 1996).

Devido à seca possuir um comportamento que afeta diversos elementos físicos, biológicos, humano e econômico, se torna impossível desenvolver um índice que abarque de forma contundente todos os tipos de seca. À medida que as secas evoluem, os impactos podem variar por região e estação do ano. Desta forma, o monitoramento dos diferentes componentes do ciclo hidrológico pode exigir uma variedade de indicadores e índices.

Os índices desenvolvidos utilizam vários parâmetros hidrometeorológicos como precipitação, condição da vegetação, umidade do solo, temperatura de superfície, evapotranspiração, escoamento superficial, entre outros parâmetros, a fim de identificar o início e o fim de um período de seca. Além disso, os índices de seca apresentam características diferentes, sendo muitos desses índices desenvolvidos para ambientes específicos. Assim vários índices vêm sendo desenvolvidos para se adaptarem a diversos tipos de seca (meteorológica, hidrológica, agrícola e socioeconômica).

Para compreender as secas são utilizadas metodologias que quantificam e caracterizam a magnitude do evento. Assim diversos indicadores e índices vêm sendo desenvolvidos nas últimas décadas e utilizados por vários países e principalmente no Brasil. A WMO (2016) apresenta um manual de indicadores e índices de seca mais comumente aplicados em regiões propensas a secas. Esses índices são agrupados no manual de acordo com o tipo de seca, dados de entrada, características, aplicações e facilidade de uso, com o objetivo de apresentar as principais características dos índices e indicadores para que pesquisadores possam ter uma facilidade na escolha do índice para seu estudo.

Existem vários índices de seca criados por vários pesquisadores (PALMER, 1965; GIBBS et al., 1967; SHAFER et al., 1982; MCKEE et al., 1993; KOGAN et al., 1998; CARLSON et al., 1994) que são agrupados por tipo de seca devido a um número muito amplo de índices. A seguir são descritos alguns dos índices citados na literatura.

Os índices de seca meteorológica (Tabela 2) têm como objetivo determinar irregularidades nas precipitações de uma região em períodos determinados para avaliar o comportamento da precipitação e assim fornecer uma avaliação quantitativa, espacial e temporal do fenômeno da seca.

O Índice de Anomalia de Chuvas – IAC (*Rainfall Anomaly Index-RAI*) é utilizado para analisar as irregularidades nas precipitações (anos secos e anos chuvosos), permitindo análises das precipitações atuais de determinado local com dados históricos, e também a variabilidade espaço-temporal da precipitação (FREITAS, 2004 e 2005; MARCUZZO et al.,

2011; SANCHES et al., 2014). Segundo Repelli et al. (1998), o IAC é um índice que tem boa aplicação em regiões semiáridas, pois propicia uma análise referente a ocorrência, gravidade e impacto da seca. Assim, por fornecer informações a respeito da dinâmica das chuvas, pode propiciar um planejamento regional ou zoneamento agrícola.

Araújo et al. (2007) utilizaram o IAC para identificar anos secos e chuvosos, e a variabilidade espaço-temporal da precipitação na Bacia do Rio Paraíba. No estudo foi verificado um padrão da precipitação entre as sub-bacias do médio e baixo curso do Rio Paraíba e nas bacias do Rio Taperoá e do Alto Paraíba, ocorrendo semelhanças entre os anos secos e chuvosos ao longo da série. Verificou também que o IAC pode ser utilizado como uma ferramenta para acompanhamento climático de uma localidade.

Alves et al. (2016) utilizaram o IAC para monitorar anos de seca e anos chuvosos em quatro municípios de diferentes mesorregiões (Zona da Mata, Agreste e Sertão) do Estado de Pernambuco. No estudo verificaram-se divergências referentes ao IAC, devido aos municípios estarem em mesorregiões que possuem características climáticas distintas. Além disso, o estudo observou uma grande quantidade de anos que apresentaram um IAC negativo para todos os municípios, bem como uma enorme variação entre anos secos e chuvosos para a série histórica, levando a caracterizar as localidades como instáveis para a produção agrícola.

O índice Deciles é obtido colocando-se os valores de precipitações medidos em ordem decrescente, em um período de tempo mínimo de 30 anos, para adquirir a frequência acumulada. Os dados são divididos em dez partes (os Decis), sendo o quinto decil definido como a mediana. Com base na mediana, considera-se que há 50% dos valores maiores e 50% dos valores menores. A exemplo, o primeiro decil, que apresenta menor valor, pode ser aumentado 90% das vezes, o que dá a ele 10% de chance de ocorrer (FERNANDES et al., 2009).

Valadão et al. (2010) apresentaram um estudo propondo uma comparação entre quatro índices que quantificam a seca (Percentis; Porcentagem normal Climatológica-PN; Índice padronizado da precipitação-SPI; SPI modificado-SPI-M). Para o estudo foram utilizados dados mensais de chuva medidos nas nove capitais nordestinas, referente ao período de 1961–2009. Os índices foram estimados para a quadra chuvosa das capitais do Nordeste. Os resultados demonstraram que os índices Percentis e Porcentagem normal Climatológica apresentaram correspondência nos seus resultados, e o SPI demonstrou-se ser o índice mais minucioso para identificar a intensidade da seca que os demais índices e o SPI\_M.

Tabela 2-Índices de seca meteorológica.

| Índices                                         | Dados de Entrada    | Características                                                                                                                                                                                                                                            | Autores                         |
|-------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| <i>Rainfall Anomaly Index</i> (RAI)             | Precipitação        | Analisa a frequência com que ocorrem os anos secos e chuvosos e a intensidade dos mesmos avaliando seu grau de severidade e duração; pode ser obtido na escala mensal e anual;                                                                             | Rooy (1965)                     |
| <i>Deciles</i>                                  | Precipitação        | Agrupa as ocorrências mensais da precipitação em Decis (décimo da distribuição dos dados); valores diários, mensais e anuais são considerados; precisa de 30 anos de dados no mínimo.                                                                      | Gibbs e Maher, (1967)           |
| <i>Effective Drought Index</i> (EDI)            | Precipitação Diária | Utiliza dados diários de precipitação; os cálculos do EDI podem ser aplicado para qualquer lugar do mundo.                                                                                                                                                 | Byun e Wilhite (1999)           |
| <i>Percent of Normal Precipitation</i>          | Precipitação        | Cálculos simples; pode ser calculado em escalas de tempo diárias, semanais, mensais, sazonais e anuais.                                                                                                                                                    | Hayes (2006)                    |
| <i>Standardized Precipitation Index</i> (SPI)   | Precipitação        | Destacado pela WMO (2009) como principal índice que os países deveriam usar para monitoramento de secas meteorológicas; calculada em qualquer número de escalas de tempo, de um mês a 48 meses ou mais.                                                    | McKee, Doesken, e Kleist (1993) |
| <i>Bhalme &amp; Mooley Drought Index</i> (BMDI) | Precipitação        | Eficaz para ser aplicado nas regiões tropicais; o calculo se baseia no do índice PDSI (Índice de Severidade de Seca de Palmer), com a diferença de que o índice umidade na equação de Palmer foi substituído por um índice simples de precipitação mensal. | Bhalme e Mooley (1980)          |

Fonte: modificado de WMO (2016).

O Índice de Seca Efetiva (*Effective Drought Index* – EDI) foi criado para atender a necessidade de detectar o início, duração e fim dos períodos de seca. O índice apresenta uma definição clara do comportamento da seca, os resultados são padronizados para permitir a comparação de diferentes localidades. Apesar da viável aplicação do EDI em todas as localidades que possuam informações diárias das precipitações, o mesmo apresenta-se frágil por utilizar apenas a informação da precipitação para caracterizar as secas (WMO, 2016).

O Índice de Seca de Bhalme & Mooley (*Bhalme & Mooley Drought Index* – BMDI) é utilizado para avaliar a intensidade da seca baseando-se apenas na precipitação. Esse índice é estimado a partir da precipitação média mensal e do desvio padrão utilizados para gerar o índice de umidade (FERNANDES et al., 2009). Um estudo que utilizou o índice BMDI foi o realizado por Freitas (1998), no estudo foi criado um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas no Estado do Ceará com base nas estimativas do índice RAI (*Rainfall Anomaly Index*), BMDI (*Bhalme & Mooley Drought Index*), HSI (*Hesbst Severity Index*) e o LRDI (*Lamb Rainfall Departure Index*). A partir dos índices foram obtidas informações a respeito da severidade, intensidade, duração do período seco, para que medidas de compensação pudessem se basear nessas características para serem implementadas.

Azevedo et al. (1994) utilizou o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI), Índice de Anomalia de Chuva (RAI), Índice de Seca de Bhalme & Mooley (BMDI) e o Índice de Seca de Bhalme & Mooley Modificado para avaliar a seca no agreste da Paraíba. O estudo buscou avaliar qual índice seria melhor para identificar períodos secos e chuvosos na região, bem como qual teve melhor aplicabilidade na região. Fazendo uma comparação dos índices o índice que obteve melhor resultados para a região foi o BMDI modificado, se mostrando sensível as variações de umidade no solo maior do que o PDSI, e demonstrou facilidade na sua aplicação.

O Índice de Porcentagem da Precipitação Normal (*Percent of Normal Precipitation* – PN) por utilizar apenas precipitação como dado de entrada tem sua aplicação facilitada, pois esse tipo de variável climática é medido em diversas localidades. Também utiliza uma série histórica de 30 anos para obter a precipitação normal e pode ser calculado em uma escala de tempo variada (semanal, mensal e anual). Os valores de PN são classificados em onze categorias, variando de extremamente úmido, com valores entre 100% a 90% ou  $\geq$  a 100%, e à seca extrema variando entre -90% a  $\leq$  -100% (FERNANDES et al., 2009).

O Índice de Precipitação Padronizada (*Standardized Precipitation Index – SPI*) pode ser obtido para qualquer região para monitorar a seca. Para seu cálculo os dados de precipitação são ajustados de acordo com uma função gama e posteriormente transformados em uma distribuição normal. Na estimativa os valores positivos são as precipitações acima da média e os negativos são os valores abaixo da média. Além disso, é ideal para o cálculo no mínimo 30 anos de dados (FERNANDES et al., 2009).

O estudo de Macedo et al. (2010) utilizou o SPI para identificar eventos de seca severa no Estado da Paraíba. A estimativa do SPI foi realizada nas escalas temporais de 12 e 24 meses, em três regiões com pluviometria semelhante. Sendo utilizado o método de agrupamento *K-Means* para determinar as sub-regiões. Assim, foram definidas a Sub-região I localizada na parte Leste do Estado, com a média anual de precipitação de 1177,3 mm; a Sub-região II localizada na parte central do Estado, apresentando a menor média anual com 524,3 mm; e a Sub-região III situada na parte Oeste do Estado, apresentou precipitação média anual de 790,5 mm. As estimativas de SPI para o período de 12 e 24 meses, apresentaram secas severas nas três regiões analisadas, sendo a Sub-região III a que apresentou maiores quantidades de secas.

Santos et al. (2018) realizou um estudo na Paraíba que objetivou avaliar a gravidade das secas a curto, médio e longo prazo e suas tendências para o período de 1998–2015. No estudo foram utilizados os dados de precipitação do TRMM para se adquirir o índice de precipitação padronizado (SPI), e aplicado o teste de *Mann-Kendall* e o método estimador de inclinação de Sen. Com base nos resultados o estudo propôs uma nova classificação geoespacial para a análise de risco de seca, para que fosse possível determinar de forma mais precisa quais eventos de seca afetaram ou não afetaram uma região a partir das estimativas do SPI e do seu comportamento temporal para série histórica observada.

Os índices de seca agrícola (Tabela 3) têm como objetivo determinar o déficit de umidade do solo e os impactos disso na vegetação de uma região, para que assim possa fornecer informações quantitativas e qualitativas a respeito do fenômeno da seca agrícola. Na Tabela 3 são apresentados alguns dos índices utilizados para analisar seca agrícola. Para realizar o cálculo do índice é necessário analisar se para a área de estudo existe disponibilidade de dados que permitam adquirir os resultados desejados.

Os índices de seca agrícola em sua maioria requerem grande quantidade de indicadores por isso é necessário analisar a disponibilidade de dados. Além disso, é

comumente necessário realizar uma calibração do índice tendo em vista que eles são desenvolvidos geralmente para regiões de climas específicos.

O índice de Severidade de seca de Palmer (*Palmer Drought Severity Index* - PDSI) foi desenvolvido para regiões homogêneas. Esse índice é calculado a partir de dados de evapotranspiração, escoamento superficial, recarga do solo e perda de umidade na camada de superfície. O PDSI é calculado caracteristicamente com base em dados mensal, fornece o comportamento espacial e temporal das secas históricas (FERNANDES et al., 2009). A incapacidade do PDSI está associada a não conseguir caracterizar inteiramente os aspectos hidrológicos, climáticos e geográficos e a variabilidade de cada parâmetro dentro das áreas de estudo (ALLEY, 1984; KARL et al., 1985).

Rossato et al. (2017) fizeram um estudo para todo o Brasil durante 2000–2015 aplicando o Índice PDSI para avaliar as condições de umidade no solo durante eventos de seca, e relacionar com os impactos na vegetação. Os resultados mostraram que o PDSI estimou bem as variações interanuais e que variou de acordo com as condições climáticas apresentadas em todas as regiões do País, o índice reconheceu a seca em diferentes localizações geográficas. Sendo apresentado valores severos e extremos de seca no Nordeste brasileiro.

O Índice de Umidade da Cultura (*Crop Moisture Index* – CMI) é destinado para avaliar a seca agrícola, e possibilita medir o teor de umidade das culturas para curtas escalas do tempo, geralmente é calculado semanalmente. O índice é influenciado pelo local e tempo analisado (WMO, 2016).

O CMI também tem uma resposta rápida às mudanças das condições em curto prazo, e não é indicado para escalas do tempo muito grande, pois pode gerar resultados que não expressam a realidade, por exemplo, a ocorrência de uma precipitação durante uma seca pode induzir para que o valor de CMI indique condições de umidade adequadas, mesmo estando em um evento de seca a longo prazo persiste no local. Outra característica é que o CMI é utilizado para medir as condições de umidade apenas na estação de crescimento principal, não sendo aplicável para medir a condição de umidade nas culturas durante eventos de seca que se estendem por vários anos (FERNANDES et al., 2009).

Tabela 3-Índices de seca agrícola.

| Índices                                     | Dados de Entrada                                                                                 | Características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Autores               |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| <i>Palmer Drought Severity Index</i> (PDSI) | Precipitação, Temperatura, Valores da umidade do solo; evapotranspiração, escoamento superficial | Desenvolvido principalmente para identificar as secas que afetam a agricultura; o índice mede a perda e a demanda por umidade para o solo; fornece medidas normalizadas das condições de umidade para que comparações possam ser feitas entre diferentes localidades e entre meses.                                                                                                                                                | Palmer, W. C., (1965) |
| <i>Crop Moisture Index</i> (CMI)            | Precipitação, Temperatura                                                                        | Desenvolvido para avaliar o impacto da seca na agricultura, pois demonstra rapidamente as mudanças na cobertura vegetal devido à seca; Como foi desenvolvido especificamente para regiões produtoras de grãos nos Estados Unidos, o CMI pode apresentar uma falsa sensação de recuperação de eventos de seca de longo prazo, uma vez que melhorias no curto prazo podem ser insuficientes para compensar problemas de longo prazo. | Palmer, W. C., (1968) |

Fonte: modificado de WMO (2016).

Os índices de seca hidrológica objetivam caracterizar o déficit no abastecimento das águas superficiais e subterrâneas. A seca hidrológica sempre é consequência dos eventos de secas meteorológica e agrícola. Os índices (Tabela 4) desenvolvidos para analisar a seca hidrológica podem se basear na variação das águas superficiais e subterrâneas, no entanto, como esses índices usualmente são desenvolvidos para lugares específicos, para regiões com condições muito diferentes da sua área de origem são necessárias adaptações. É importante que os índices reflitam com precisão o comportamento que ocorre durante a seca.

Tabela 4-Índices de seca hidrológica.

| Índices                                                  | Dados de Entrada                                                                                                    | Características                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Autores                |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| <i>Palmer Hydrological Drought Severity Index</i> (PHDI) | Temperatura, precipitação mensal, Capacidade de retenção de água dos solos                                          | Parte do conjunto de índices desenvolvidos por Palmer e a agência meteorológica dos EUA em 1960; baseado no PDSI; possui capacidade de calcular quando o evento da seca vai terminar com base na precipitação.                                                                                                      | Palmer (1965)          |
| <i>Reclamation Drought Index</i> (RDI)                   | Precipitação, Temperatura, Quantidade de Neve, Fluxo de Superfície e Escoamento Superficial, Níveis de Reservatório | Como o SWSI, o RDI pode ser calculado à nível de Bacia; esclarece a relação do clima com a disponibilidade de água.                                                                                                                                                                                                 | Weghorst (1996)        |
| <i>Surface Water Supply Index</i> (SWSI)                 | Precipitação, dados de reservatório, vazão, quantidade de neve                                                      | Desenvolvido para abordar algumas limitações identificadas no PDSI; é calculado a nível de bacia; identifica condição de secas associadas a variações hidrológicas; considerando os recursos hídricos totais de uma bacia, fornece uma boa indicação da saúde hidrológica de uma bacia ou de uma região específica. | Shafer e Dezman (1982) |

Fonte: modificado de WMO (2016).

O Índice Hidrológico de Seca de Palmer (*Palmer Hydrological Drought Severity Index* – PHDI) foi criado para levar em conta a seca de longo prazo que afetará o armazenamento de água, vazão e a água subterrânea. O PHDI pode estimar quando uma seca terminará com base na precipitação necessária usando uma proporção de umidade recebida

pela umidade necessária para acabar com a seca. O impacto humano decorrente das decisões de gestão e irrigação, não são considerados nos cálculos (WMO, 2016).

O Índice de Abastecimento de Água na Superfície (*Surface Water Supply Index – SWSI*) foi desenvolvido para ser aplicado em regiões montanhosas, onde se tem neve que tem um papel importante. O cálculo é feito em nível de bacia levando em conta os recursos hídricos das mesmas e fornece uma boa indicação das condições de seca associadas aos recursos hídricos. Os valores do índice podem ser normalizados para permitir comparações entre bacias, à escala do tempo para realizar os cálculos é mensal. Além disso, o índice dependente da estação do ano, sendo calculado no período de inverno o SWSI somente com dados de neve, precipitação e armazenamento do reservatório. Durante o período do verão, o fluxo de superfície substitui os dados de neve como um componente dentro da equação do SWSI (WMO, 2016; FERNANDES et al., 2009).

Mais de um índice têm sido utilizados para estudar o fenômeno da seca, por proporcionar uma melhor compreensão dos eventos de seca e uma análise mais completa dos índices de seca. Além disso, esses índices são geralmente aplicados em escalas de tempo mais longas para identificar tendências nas escalas sazonais (6 meses), anuais (12 meses) ou mesmo interanuais (24 ou 48 meses) (MEZA, 2013). Entende-se que para analisar as secas para diferentes escalas de tempo, é essencial uma longa série de tempo.

Esses índices não descrevem ou caracterizam apenas a seca em bacias hidrográficas, mas podem servir de base para ações que minimizem os efeitos da seca a longo prazo, vale salientar que cada índice de seca desenvolvido foi definido sobre diferentes condições, portanto, deve-se observar se o índice escolhido tem aplicação adequada para a área de estudo (PEDRO-MONZONÍS et al., 2015).

Esses índices são caracterizados por serem medidas quantitativas que descrevem os níveis de seca a partir de dados de um ou vários indicadores, que podem ser precipitação, evapotranspiração, entre outros (HAIED et al., 2017). Além de subsidiar estudos fornecendo informações a respeito da gravidade da seca, os índices de seca podem servir de base de informações para os tomadores de decisão elaborar seus planos de contingência de seca.

Selecionar o índice que vai ser utilizado na área de estudo depende de vários fatores, entre eles é se o índice escolhido é simples de usar, e que seja livremente disponível o que não significa que seja o melhor a ser aplicado. A melhor abordagem a ser seguida é que o usuário adote múltiplos indicadores e índices como parte de um plano abrangente de mitigação de seca e sistema de alerta precoce de seca. Isso requer uma pesquisa mais

aprofundada para saber quais indicadores funcionam melhor em regimes climáticos, regiões, bacias e locais específicos, para que assim identificados os principais indicadores possa ser com base neles definidos os índices a serem aplicados e as principais ações de resposta ou mitigação de emergência serem implementados dentro de um plano de seca.

Assim, para analisar nessa pesquisa a seca meteorológica, detectar a periodicidade de anos secos e chuvosos, e relaciona-los com as condições de umidade na vegetação e os eventos de seca vegetativa na Sub-bacia do Alto Paraíba, optou-se pelo índice IAC. Esse índice demonstrou uma boa aplicação em áreas semiáridas de acordo com a literatura, bem como é um índice de fácil aplicação que permite a análise do grau de intensidade e ocorrência dos eventos de umidade e seca em uma localidade.

## **2.6 Índices e indicadores de seca baseados no sensoriamento remoto**

Nos últimos anos tem ocorrido um forte interesse global e crescimento no desenvolvimento de novos índices baseados em múltiplos indicadores que sejam adequados para diferentes regiões climáticas e escalas espaciais e temporais. Essas ferramentas que surgiram proporcionaram mais escolhas aos tomadores de decisões e implementadores de políticas, no entanto, até atualmente não existia um método claro que pudesse sintetizar os resultados e ser de fácil compreensão ao público.

As limitações dos índices de seca sempre estiveram ligadas na obtenção de dados que cobrissem grandes áreas para o estudo da seca. Com isso o sensoriamento remoto orbital foi à solução concedida em parte. Assim, muitos estudos passaram a utilizar dados obtidos por satélite para melhores análises com os índices de seca no processo de quantificar a gravidades das secas e acompanhar esse fenômeno (UNGANAI et al., 1998; HUETE et al., 2002; CHANDRASEKAR et al., 2010; REMBOLD et al., 2013; WMO, 2016).

Com o surgimento dos sistemas de informações geográficas, sensores orbitais de observação da terra e a evolução das capacidades dos computadores foram possíveis desenvolver sobreposições, mapeamentos e comparações envolvendo diversos indicadores e índices aplicados no monitoramento da seca. O sensoriamento remoto tem seu potencial reconhecido para avaliar as condições de seca em todo mundo.

Um dos primeiros índices gerados a partir de imagens de satélite foi o índice de vegetação da diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI), proposto por Rouse et al. (1973). Esse índice é determinado a partir da relação da quantidade de radiação absorvida pela vegetação, que resulta em uma medida da quantidade e condição da vegetação (Eq. 1). Os valores do NDVI variam dentro do intervalo de -1 a +1. Os valores

negativos do NDVI indicam presença de nuvem e de corpos de água, os valores positivos próximos de zero representa valor aproximado para superfícies não vegetadas, os valores variando entre 0,1 e 0,5 indicam vegetação do tipo arbustiva e os valores de NDVI superiores a 0,6 indicam maior densidade de cobertura vegetal (SOUSA JÚNIOR e LACRUZ, 2015). O NDVI é obtido através da equação:

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

Sendo NIR a banda do infravermelho próximo, e R a banda do vermelho.

A viabilidade de utilização do NDVI é devido à acessibilidade de dados necessários para seu cálculo estarem presentes na maioria dos satélites (ANYAMBA et al., 2005). Uma característica necessária para compreender o índice NDVI é a sua relação com a precipitação, embora exista uma relação direta, ocorre um atraso de tempo, pois a seca agrícola na qual o índice NDVI é empregado somente pode ser detectada semanas depois da estiagem/seca meteorológica.

O NDVI tem sido utilizado para demonstrar a condição da vegetação e relacionar com a seca em estudos na região nordeste do Brasil (AQUINO et al., 2008; ARAÚJO et al., 2018) e na Paraíba (ALVES et al., 2014; NASCIMENTO et al., 2014) por apresentar uma correlação entre as precipitações, a umidade do solo e a condição da vegetação. Assim o NDVI tem sido aplicado para monitorar se houve uma redução da biomassa depois de um evento de seca e monitorar a seca vegetativa. Os índices de vegetação são definidos a partir de mudanças espectrais de duas ou mais bandas que tem como objetivo evidenciar as condições da vegetação.

Um outro índice de vegetação baseado em dados obtidos por sensoriamento remoto foi o *Enhanced Vegetation Index* (EVI), que é um índice aperfeiçoado para realçar o sinal da vegetação por meio da redução dos efeitos de substrato do dossel e da influência da atmosfera (HUETE et al., 1994; HUETE et al., 1997). Esse índice se relaciona principalmente com as variações estruturais do dossel, o índice de área foliar, tipo do dossel, fisionomia da planta e arquitetura do dossel, em comparação com outros índices de vegetação (GAO et al., 2000).

Com o lançamento do sensor MODIS em 1999 (com resolução espacial de 250 m) os índices de vegetação EVI e NDVI passaram a ser disponibilizados como produtos do sensor MODIS, pois o sensor permite análises regulares da vegetação no mundo todo, bem

como uma avaliação das mudanças no uso e cobertura do solo e na condição da vegetação por meio de imagens de satélite (HUETE et al., 2002). Desta forma, a grande relação entre índices de vegetação e as dinâmicas espaço temporais da vegetação vêm sendo observadas através de dados do sensor MODIS devido à grande disponibilidade de dados em uma escala global, o fácil acesso desses produtos e do seu grande potencial para o monitoramento da cobertura vegetal de grandes áreas.

A partir do NDVI também surgiram outros índices como o Índice de Severidade de Seca (*Drought Severity Index* – DSI), e em seguida o Índice da Condição da Vegetação (*Vegetation Condition Index* – VCI) e o Índice de Satisfação da Necessidade da Água (*Water Requirement Satisfaction Index* – WRSI), que utiliza dados de evapotranspiração.

Embora o NDVI seja muito bem utilizado para caracterizar a vegetação e para monitorar as condições da mesma, esse índice trabalha apenas com duas bandas (visível e infravermelho próximo) apresentando insuficiente para o monitoramento de culturas principalmente no período de secas, pois a saúde da vegetação não depende apenas do estresse de água, mas também das condições térmicas. Visando atender essa deficiência, foram desenvolvidos índices de três bandas, um exemplo é o Índice de Vegetação Global (*Global Vegetation Index* – GVI), baseado nas bandas do visível, infravermelho próximo e do infravermelho termal (KOGAN, 2005). Esse índice pode ser utilizado para monitorar os impactos da seca nas condições de umidade e temperatura da vegetação.

Além disso, o NDVI também é considerado uma variável de resposta lenta ao estresse hídrico, pois o NDVI apresenta condição de seca, quando a mesma já ocorreu, de forma contrária ao LST é considerada uma variável de resposta rápida, que combinada ao NDVI pode ser um bom indicador de umidade do solo (CUNHA et al., 2015). A temperatura de superfície apresenta o estresse hídrico da vegetação mesmo em situações onde condição da vegetação é verde, devido às plantas fecharem seus estômatos para minimizar a perda de água por transpiração. Sendo a temperatura uma variável importante para a análise da seca.

Alguns índices foram construídos visando comparar séries de dados de NDVI e temperatura, tendo em vista que a relação entre temperatura e a saúde da vegetação pode ser utilizada para caracterizar as condições de umidade solo, e isso tem sido usado com sucesso para monitorar secas vegetativas/agrícolas e a estimativa das perdas de culturas (KOGAN, 1997; ZHOU et al., 2012; SON et al., 2012; DU et al., 2013; UM et al., 2013; YANG et al., 2013; ABBAS et al., 2014; NICHOL et al., 2015). Entre os índices desenvolvidos tem se destacado o Índice de Saúde da Vegetação (*Vegetation Health Index* -VHI) proposto por Kogan et al. (1998), e o Índice de Suprimento de Água para Vegetação (*Vegetation Supply*

Water Index-VSWI) proposto por Carlson et al. (1994), que se baseiam em dados de NDVI e LST e tem sido aplicado em vários estudos (LI et al., 2012; BHUIYAN et al., 2017; ZHANG et al., 2017).

Durante o período de seca a umidade do solo diminui, como consequência a evapotranspiração também, provocando aumento na temperatura do dossel. Essa característica provoca um aumento da energia emitida no infravermelho termal, caracterizando condições de estiagem. Desta forma, o uso combinado de dados de temperatura com índice de vegetação interessa estudos de seca (ANYAMBA et al., 2005).

O Índice da Condição da Vegetação (*Vegetation Condition Index – VCI*) foi criado para caracterizar a umidade da vegetação, pois permite quantificar o impacto do clima e detectar mudanças temporais e espaciais na vegetação (KOGAN, 1995). Esse índice é expresso em porcentagem e faz uso dos valores máximos e mínimos do NDVI para dar uma ideia de onde o valor observado se situa em relação os valores extremos observados durante o período analisado. Os valores mais baixos indicam as piores condições de seca na vegetação e os valores mais altos apresentam melhores condições (LOPES et al., 2015). Assim, o VCI é a normalização do NDVI, utilizado para caracterizar a variabilidade espacial e temporal da vegetação, quantificando quanto a vegetação foi impactada pela seca.

Um estudo realizado por Moreira et al. (2015) utilizou dados MODIS para estimar o VCI objetivando realizar um mapeamento de seca no Norte do estado de Minas Gerais ao longo de 2013. Sendo essa região sujeita a repetitivos e prolongados eventos de seca. Os mapeamentos obtidos com base no índice demonstraram que a região apresentou praticamente em todos os meses classes indicativas de seco e extremamente seco, e também verificou que o VCI teve uma aplicação satisfatória na identificação do evento de seca durante o período de chuvas esperado para a região.

Na província de Liaoning, na China, Liu et al. (2015) utilizaram dados de LST e NDVI oriundo do MODIS para estimar os índices VCI e VSWI para o ano de 2014, e assim avaliar a capacidade de monitoramento desses índices durante uma seca agrícola. De acordo com os resultados verificou-se que o VCI poderia ser um bom método para avaliação de perdas e o VSWI é um índice mais completo para indicar o padrão espacial da secas por inserir no seu cálculo as informações de temperatura de superfície. Além disso, segundo o estudo como pode ser utilizado como um método de alerta precoce de secas.

O índice da condição da Temperatura (*Temperature Condition Index – TCI*) é considerado um indicador de estresse térmico na vegetação. Sendo proposto para relacionar fenômenos de seca com a temperatura (KOGAN, 1995). O índice assume que durante um

evento de seca a umidade do solo é reduzida provocando um aumento na temperatura da superfície maior do que em períodos onde não há registro de seca. Assim, o TCI permite identificar pequenas mudanças na saúde da vegetação devido aos efeitos térmicos. Com a intensificação do evento da seca, a umidade do solo vai sendo reduzida provocando um aumento da temperatura. Assim, o índice reflete a resposta da vegetação a temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura maior a seca.

O TCI é calculado utilizando a banda infravermelha termal dos satélites. Combinando TCI e o VCI, foi estabelecido um novo índice que integrasse os efeitos da umidade e temperatura na condição da vegetação, assim surge o VHI. No estudo de Zhang et al. (2017) foi analisado a seca nos EUA utilizando uma variedade de índices, o estudo concluiu que o uso de índices combinados garante melhores resultados para a análise da seca, como que ocorre com o VHI.

O VHI desenvolvido por Kogan (1995) descreve a saúde da vegetação através da combinação da estimativa de umidade do solo (VCI) com as condições térmicas (TCI). O potencial para o estresse ocorre quando a água armazenada no solo é insuficiente para o desenvolvimento da vegetação, assim a vegetação reage fechando seus estômatos para minimizar a perda de água por transpiração o que resulta em um aumento da temperatura do dossel. Segundo Liu et al. (2013) nas áreas de cobertura vegetal, o LST pode ser considerado igual à temperatura do dossel da vegetação. Índices como TCI e VHI baseiam-se na hipótese de que altas temperaturas indicam baixa umidade e estresse na vegetação que podem resultar em secas (SIVAKUMAR et al., 2011). Os valores de VCI e VHI variam entre 0 (nível mais alto de severidade da seca) e 100 (nível mais baixo de severidade), e no TCI os valores próximos a 100 representam altas temperaturas e, portanto, estresse hídrico na vegetação. Esses índices têm sido amplamente empregados em avaliações de impacto da seca na agricultura (WANG et al., 2014; BOKUSHEVA et al., 2016; GARCÍA-LEÓN et al., 2019).

Gomes et al. (2017) utilizaram o VHI na região Sudeste do Brasil para analisar o estresse hídrico na vegetação para o período de 2000-2014. O estudo apresentou com base no VHI áreas que apresentaram estresse hídrico que se caracterizaram por ter apresentado mudanças no vigor da vegetação, sendo nessas áreas encontrados os mais baixos valores do VHI e as maiores temperaturas.

O VSWI (CARLSON et al., 1990; 1994) é obtido através NDVI com a temperatura de superfície, e com base nisso é utilizado para analisar a seca vegetativa. Esse índice é comumente utilizado devido a sua simplicidade e capacidade de representar dois parâmetros (NDVI e LST) que são capazes de expressar a seca vegetativa (NICHOL et al., 2015).

Segundo Zhang et al. (2014) a explicação física na qual o VSWI se baseia para indicar seca vegetativa parte da ideia de que regiões com condições de precipitação normal apresentam a umidade do solo nas suas condições normais destinadas ao suprimento de água para as plantas. O suprimento de água suficiente para vegetação resultará em abertura estomática, levando a uma forte transpiração, resfriando a superfície da copa da vegetação. Assim, ocorre uma diminuição na temperatura da superfície do dossel (TS), e o valor do VSWI aumenta. Em contrapartida, regiões que sofrem com ausência de chuvas e aumento na temperatura de superfície, apresentará uma vegetação com aumento nas taxas de evaporação para resfriar as plantas e, em seguida, a umidade do solo será transportada pelas plantas para fornecer água para a evaporação. Desta forma, a umidade do solo diminui até certo ponto e seca, provocando o efeito de murchamento nas plantas. Nesse contexto, o NDVI se torna relativamente baixo e a temperatura de superfície aumenta. Como resultado, o VSWI apresentará valores reduzidos, indicando condições de estresse hídrico. Nesse sentido, o VSWI pode ser utilizado para estimar indiretamente a umidade do solo em áreas que sofrem com secas na vegetação.

Cunha et al. (2015) utilizaram o índice VSWI para avaliar impactos da seca ocorridos em 2012 e 2013, usando o NDVI do Terra-MODIS e os produtos de LST. O índice foi aplicado apenas nas áreas de pastagens e terras agrícolas, excluindo a vegetação natural do semiárido brasileiro. Nos resultados dessa pesquisa o VSWI demonstrou concordância, indicando condições de seca, com os demais resultados obtidos por meio de interpolação de dados observacionais de precipitação, armazenamento de água no solo (modelo de balanço hídrico) e dados de produção pecuária.

Arslan et al. (2016) avaliaram espacialmente a seca em Mithi, no Paquistão, com base em produtos MODIS de NDVI e LST para estimar o índice VSWI, e obteve como resultado a distribuição espacial da seca com base no índice VSWI para o período de 2010 a 2014. Os resultados mostraram que o VSWI foi bastante baixo, indicando que a taxa de transpiração da vegetação diminuiu, o que confirmou a ocorrência de seca.

Um estudo que avaliou a eficácia dos índices *Normalized Vegetation Supply Water Index* (NVSWI), *Normalized Monthly Precipitation Anomaly Percentage* (NPA) e *Vegetation Health Index* (VHI) para o monitoramento da seca, foi proposto por Cong et al. (2017), todos os índices foram utilizados para analisar a distribuição espaço-temporal da seca no Nordeste da China. As informações da área de estudo foram obtidas através de dado sensoriamento remoto do MODIS, AMSR-E e TRMM. As relações entre NVSWI, NPA, VHI e a umidade do solo também foram investigadas para verificar algum tipo de correlação

com esses índices de seca. Além da análise da relação entre chuva e seca verificado através dos dados do TRMM e do NVSWI, e a obtenção da tendência de seca da área de estudo. No estudo, constatou-se que para o Nordeste da China o índice de seca que demonstrou o melhor desempenho foi o NVSWI.

Áreas semiáridas que sofrem com elevadas temperaturas, variabilidade espaço-temporal das precipitações e eventos de seca recorrentes, tem seus ecossistemas mais propícios a mudanças significativas (WEI et al., 2016). Nessa perspectiva o monitoramento de regiões que sofrem com impactos extremos da seca na cobertura vegetal é de grande importância para identificar as áreas mais suscetíveis, as causas do evento, para o planejamento de medidas que possam reduzir os impactos nessas regiões.

As plantas precisarem de fornecimento contínuo de água para se desenvolver, e nas áreas agrícolas a chuva e irrigações são as principais fontes de água no solo. Quando o teor de água no solo é suficiente para o desenvolvimento vegetativo da planta a evapotranspiração das plantas é alta, se contrapondo a isso as temperaturas de superfície observadas em imagens de satélites apresentam-se baixas. No período de seca o solo vai perdendo umidade e se torna insuficiente para atender as necessidades das plantas, e para evitar a perda de água às plantas fecham seus estômatos, propiciando o aumento da temperatura do dossel. Nesse sentido, relacionar mudanças de temperatura na superfície com o teor de água no solo e mudanças fisiológicas da vegetação decorrentes da condição de estresse hídrico, pode ser uma ferramenta de monitoramento de seca (CUNHA et al., 2017).

Nessa perspectiva, este estudo considerou os índices VSWI e VHI que são baseados na ferramenta do sensoriamento remoto, para serem explorados e utilizados na caracterização do estresse hídrico na vegetação para a Sub-bacia do Alto Paraíba, localizada no semiárido brasileiro. As estimativas basearam nesses índices, devido a literatura aqui revisada abordar que a relação entre temperatura de superfície e condição da vegetação na qual esses índices se baseiam, tem tido sucesso para monitorar e caracterizar as secas vegetativas.

Uma das contribuições que esses índices podem trazer para os sistemas de gestão da bacia é suas capacidades de fornecer informações a respeito de locais mais afetados pela seca através de dados históricos das variáveis hidrometeorológicas, propiciando dessa forma a visualização de cenários que servem de base para os sistemas de gestão decidirem, por exemplo, as melhores localidades para realização de obras hidráulicas, bem como possibilitarem o acompanhamento dos impactos das secas, proporcionando as autoridades

competentes informações para executarem planos de mitigação, reduzindo possíveis impactos decorrentes da seca.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Características da Área de Estudo**

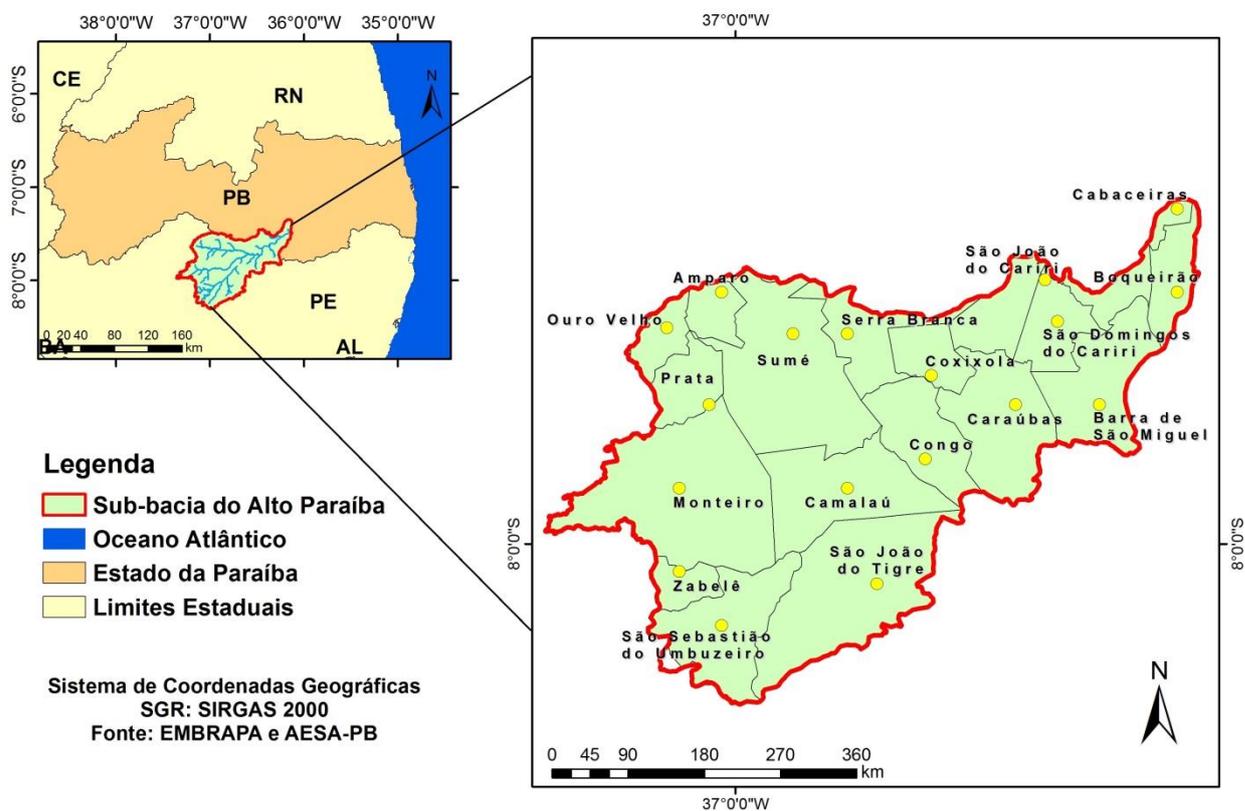
A bacia hidrográfica do Alto Rio Paraíba (Figura 7) está localizada na microrregião do Cariri paraibano, na parte sudoeste do Planalto da Borborema, entre as latitudes 06°00'11" a 08°19'54" Sul e longitudes 34°45'50" a 38°47'58" Oeste, abrangendo uma área de 6.717,39 km<sup>2</sup> que compreende inteiramente ou parcialmente 19 municípios, são eles: Amparo, Barra de São Miguel, Boqueirão, Cabaceiras, Camalaú, Caraúbas, Congo, Coxixola, Monteiro, Ouro Velho, Prata, São Domingos do Cariri, São João do Cariri, São João do Tigre, São José dos Cordeiros, São Sebastião do Umbuzeiro, Serra Branca, Sumé e Zabelê.

A bacia do Alto Rio Paraíba se situa na parte sudoeste do Planalto na Borborema, sendo constituída pelos rios: Sucuru, Umbuzeiro e Monteiro contribuintes da margem esquerda, direita e da porção central da região, que se unem para formar o Rio Paraíba, sendo esse o rio principal que desagua no Oceano Atlântico no município de Cabedelo na mesorregião da Mata Paraibana. A principal característica da hidrografia é de rios intermitentes, com o fluxo de água superficial que seca durante o período de estiagem ou secas (ALVES, 2016).

Em relação às precipitações, as médias anuais variam entre 450 a 700 mm, sendo o período chuvoso concentrado em um intervalo de quatro meses, que correspondem aos meses de fevereiro, março, abril e maio. Além disso, os principais fenômenos atmosféricos que provocam chuvas nessa região e são responsáveis por aproximadamente 80% do total precipitado, são a Zona de Convergência intertropical e os Vórtices Ciclônicos em Ar Superior (AESAs, 2009).

Segundo a classificação de Mendonça e Danni-Oliveira (2007), o clima na região é do tipo tropical-equatorial, também conhecido como clima semiárido com nove a onze meses secos, caracterizado com paisagens secas e quentes, marcadas por irregularidades pluviométricas e elevadas temperaturas. As temperaturas médias anuais variam entre 25°C a 27°C, com uma insolação média de 2800 horas/ano por estar dentro da faixa equatorial. A umidade relativa é de cerca de 50% e a evaporação em torno de 2.000 mm/ano (NASCIMENTO et al., 2014).

Figura 7-Mapa de localização da bacia do Alto Rio Paraíba.



Fonte: Autora (2019).

Na Sub-bacia do Alto Paraíba os solos de forma geral apresentam-se rasos e a vegetação característica é a Caatinga, variando entre hipoxerófilas e hiperxerófilas (NASCIMENTO et al., 2014). Esse tipo de vegetação tem como característica comum perder sua folhagem no período de estiagem e voltar a florescer no período chuvoso. A hidrografia da área é caracterizada por rios intermitentes.

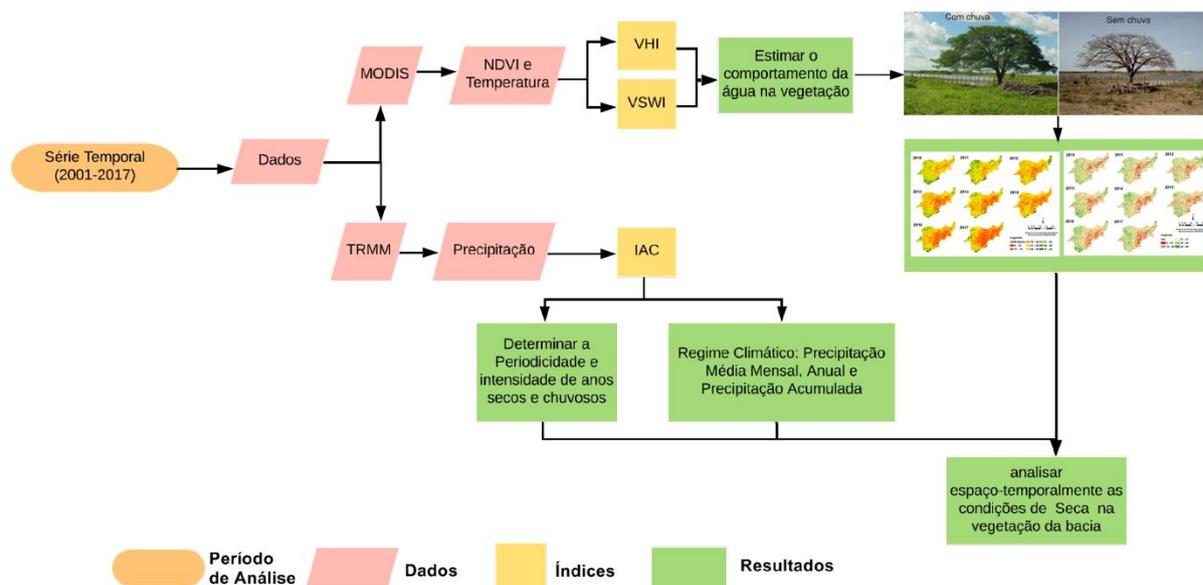
Sob o aspecto socioeconômico os municípios situados na bacia apresentam baixa produtividade agrícola e reduzidas opções de cultivos, limitadas técnicas de conservação do solo, e uma irregularidade dos recursos hídricos que afeta a produtividade agrícola da bacia (ALVES, 2016).

### 3.2 Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos metodológicos utilizados para a realização desta pesquisa consistem em um grande levantamento de informações e dados a respeito do monitoramento e avaliação de secas vegetativas, com base em índices de secas obtidos a partir de produtos de sensoriamento remoto. Após o levantamento dessas informações, foi realizada a etapa de

processamento e análise dos dados (NDVI, LST, precipitação). Nesta fase os dados foram organizados, tabulados, passaram por operações estatísticas e processamento em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), com o intuito de atingir os objetivos principais e específicos deste estudo. Segue abaixo um fluxograma com as etapas para realizar a pesquisa (Figura 8).

Figura 8-Etapas e procedimentos executados na pesquisa.

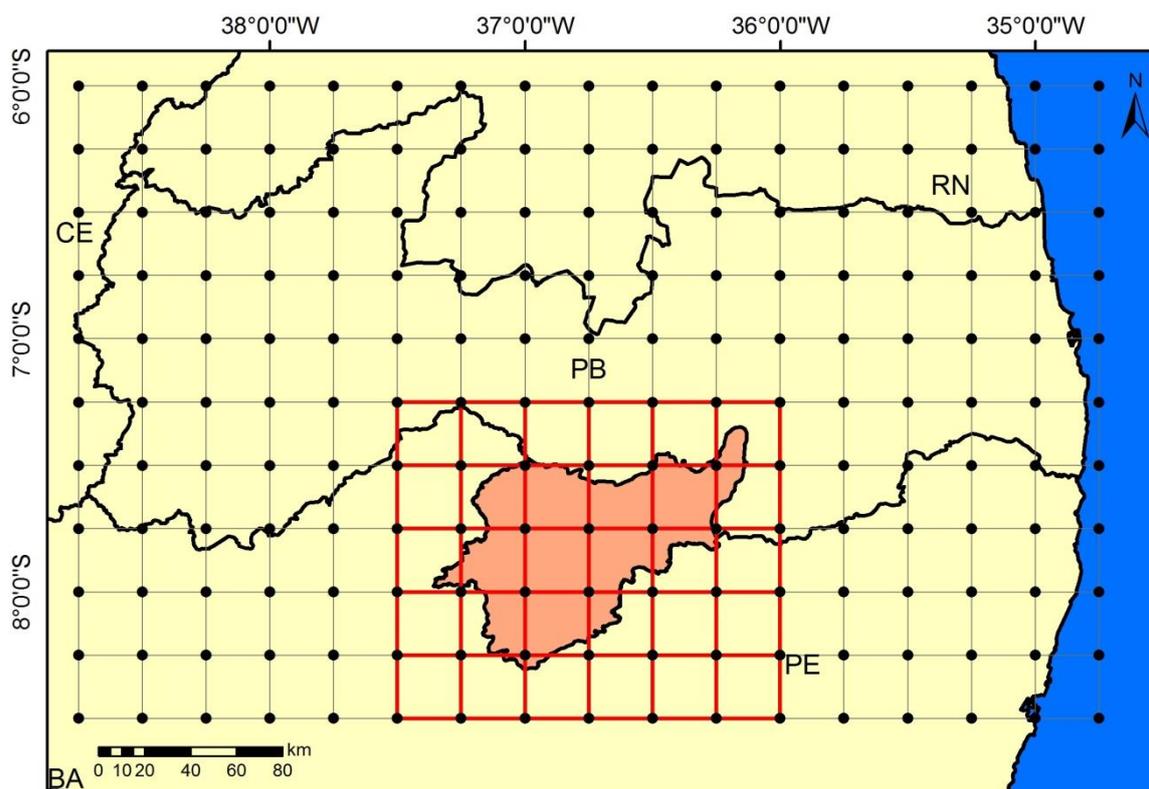


Fonte: A autora.

### 3.3 Dados de precipitação

Neste estudo foram utilizados dados de precipitação referente ao período de 2001 a 2017 do produto 3B42 versão 7 “Daily” do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Os dados foram coletados a partir do sítio eletrônico disponível em: [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM\\_3B42\\_Daily\\_7/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B42_Daily_7/summary), disponível no sítio da NASA. Esses dados do TRMM estão dispostos em uma grade de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  (aproximadamente 25 km), e encontram-se disponíveis desde janeiro de 1998, fornecendo informações em áreas tropicais e subtropicais. A resolução espacial do TRMM permitiu a utilização de 42 pontos com informações de precipitações dentro e nas proximidades da bacia do alto rio Paraíba, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9- Pontos com estimativa de precipitação do TRMM sobre a Bacia do Alto Rio Paraíba.



### Legenda

- Sub-bacia do Alto Paraíba
- Grade de pontos do TRMM Sobre a Sub-bacia do Alto Paraíba
- Grade do TRMM
- Limites Estaduais
- Oceano Atlântico

Sistema de Coordenadas Geográficas  
 Datum Horizontal: SIRGAS 2000  
 Fonte: ANA, NASA e AESA-PB

Fonte: A Autora (2019).

De posse dos dados diários da precipitação, os dados foram avaliados mediante técnicas estatísticas (médias mensais, anuais e desvio padrão) em um programa de planilha eletrônica, com o propósito de obter gráficos da precipitação pluviométrica mensal e anual, e fornecer dados para o cálculo do IAC.

Além disso, foram gerados mapas de precipitações acumuladas em ambiente SIG, para avaliar a variabilidade da precipitação na bacia, utilizando o método de interpolação Inverso da Distância Ponderada (*Inverse Distance Weighted – IDW*) no traçado de isolinhas para o mapeamento da precipitação. O IDW é uma das técnicas mais utilizadas para pontos espalhados espacialmente. Esse método de interpolação determina os valores dos pontos

usando uma combinação linear ponderada dos pontos amostrados, e o peso de cada ponto é o inverso de uma função da distância (MARCUIZZO et al., 2011).

Os dados de precipitação do satélite TRMM foram utilizados neste trabalho, tendo em vista que essa ferramenta já demonstrou aplicações satisfatórias em diversos estudos no Brasil. No estudo de Pereira et al. (2013), os resultados demonstraram boas correlações entre os dados estimados pelo TRMM e os das estações meteorológicas para todas as regiões do Brasil. Além disso, Soares et al. (2016) analisou séries temporais de posto pluviométricos e dados do TRMM sobre o estado da Paraíba, no Nordeste do Brasil, e constatou no estudo que as estimativas de chuva do satélite TRMM 3B42 versão 7 apresentaram de forma geral o padrão espaço-temporal do regime de chuvas, seja nas condições de sazonalidade ou de distribuição espacial das chuvas.

### 3.4 – Determinação do Índice de Anomalia de Chuva (IAC)

Com o intuito de determinar a frequência com que ocorrem anos secos e chuvosos, e para classificar as suas intensidades, foi aplicado o Índice de Anomalia de Chuva (IAC) (Van ROOY, 1965). Esse índice estima o grau de secas ocorridas na área de estudo baseado na intensidade pluviométrica (Tabela 5). Para utilizar esse índice foi necessário preparar os dados de chuva que foi coletado do Satélite TRMM. Os dados derivados da grade de pontos do satélite na área da bacia inicialmente eram diários, foram processados e organizados em médias mensais e posteriormente anuais para que em seguida fossem substituídos nas fórmulas.

$$IAC = 3 \left[ \frac{(N - \bar{N})}{(\bar{M} - \bar{N})} \right] \text{ Para anomalias positivas} \quad (2)$$

$$IAC = -3 \left[ \frac{(N - \bar{N})}{(\bar{X} - \bar{N})} \right] \text{ Para anomalias negativas} \quad (3)$$

Nessas equações,  $N$  refere-se à precipitação total (mm) do ano referido;  $\bar{N}$ , refere-se à média anual da série histórica (mm);  $\bar{M}$  representa a média das maiores precipitações anuais da série histórica (mm) e  $\bar{X}$ , a média das menores precipitações anuais da série histórica (mm). Para saber se a anomalia é positiva ou negativa foi feito uma média para

cada ano, sendo a média anual subtraída do desvio padrão. Pois as anomalias positivas representam os valores acima da média e as anomalias negativas os valores abaixo da média.

Tabela 5-Classes de intensidade do Índice de Anomalia de Chuva.

| Índice de Anomalia | Valores | Intensidade        |
|--------------------|---------|--------------------|
|                    | > 4     | Extremamente Úmido |
|                    | 2 a 4   | Muito Úmido        |
|                    | 0 a 2   | Úmido              |
|                    | -2 a 0  | Seco               |
|                    | -4 a -2 | Muito Seco         |
|                    | < -4    | Extremamente Seco  |

Fonte: Marcuzzo e Melo (2011).

### 3.5 Determinação das secas utilizando como indicador a condição da vegetação

#### 3.5.1 Obtenção e processamento de imagens utilizadas

Para a estimativa das secas no período de 2001 a 2017, foi utilizado o índice *Vegetation Supply Water Index* (VSWI), derivados de imagens MODIS (coleção 6) utilizando os seguintes produtos: (a) MODIS NDVI (MOD13Q1) para intervalos de 16 dias e 250 m de resolução espacial e (b) MODIS 8 dias LST (MOD11A2) com resolução espacial de 1 km. Em seguida, na imagem LST foi realizada a reamostragem (valor modal) para alterar o tamanho dos pixels de 1000 m para 250 m através do ArcGIS 10.4. Sendo obtidos os produtos de NDVI e LST com as mesmas resoluções espaciais de 250 m.

Os produtos MODIS foram obtidos no seguinte link: <[https://modis.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/GLBVIZ\\_1\\_Glb/modis\\_subset\\_order\\_global\\_col5.pl](https://modis.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/GLBVIZ_1_Glb/modis_subset_order_global_col5.pl)>. Para se obter os produtos de NDVI com os valores dos *pixels* restaurados foi necessário multiplicar cada pixel pelo fator de escala 0,0001, enquanto o produto LST precisou ser convertido de graus Kelvin para Celsius multiplicando cada pixel pelo fator de escala 0,02 e subtraindo por 273. Ambos os fatores de escala utilizados nos produtos foram obtidos do manual do produto MODIS. As imagens de LST e NDVI que apresentaram valores negativos, devido ao fato de sofrerem algum tipo de ruído ou interferência de nuvem ou água, tornando-os inválidos, passaram por algumas operações para serem computados no cálculo das medias mensais e anuais de LST e NDVI. Por fim, mapas com valores médios mensais e anuais de NDVI e LST foram gerados para toda a área de pesquisa ao longo de 17 anos (2001–2017), para posteriormente serem utilizados no cálculo dos índices *Vegetation Supply Water Index* (VSWI) e *Vegetation Health Index* (VHI).

### 3.5.2 Estimativa das condições de umidade na vegetação

Para estimar a quantidade de água no solo foi calculado o *Vegetation Supply Water Index* (VSWI). Esse índice foi desenvolvido por Carlson et al. (1994) e utiliza dados de NDVI e LST, e indica a condição de seca quando o valor do NDVI é baixo e a temperatura da vegetação é alta. O VSWI é indicado para verificar o estresse hídrico na vegetação, a umidade e áreas afetadas pela seca (ZHOU et al., 2013). Ocorre que a vegetação nas suas condições normais com água suficiente no solo, tende a apresentar uma temperatura de superfície baixa devido ao efeito de resfriamento causado pela evapotranspiração. Durante o período de seca a deficiência de água no solo faz com que as plantas reajam fechando seus estômatos para perderem menos água. A partir disso, a evapotranspiração diminui e a temperatura aumenta (ABBAS et al., 2014).

Assim, a partir das condições de umidade do solo, a vegetação se adapta fisiologicamente a condição de seca, sendo possível ser observada através da análise espectral de imagens obtidas por sensores. Baseando-se nisso o VSWI é um importante índice para monitorar a condição da vegetação influenciada pela seca (WU et al., 2015).

Valores menores de VSWI indicam alta temperatura e baixo índice de vegetação, apresentando uma vegetação com estresse hídrico e uma umidade baixa. Enquanto um valor alto de VSWI significa que a temperatura da vegetação está baixa e o valor do NDVI está alto, caracterizando condições de umidade e sem estresse hídrico (ZHANG et al., 2017). Para calcular o VSWI, foram realizadas médias mensais e anuais de produtos oriundos do sensor MODIS referentes à LST e NDVI para a série de 2001 a 2017, e posteriormente calculado o índice VSWI em ambiente SIG. Esse índice é calculado a partir da seguinte equação:

$$VSWI = \frac{NDVI}{LST} \times 1000 \quad (4)$$

sendo os produtos NDVI e LST processados para o período de 2001 a 2017. Diferente de outros índices o VSWI é adimensional, geralmente seu valor é muito pequeno, portanto um fator de escala é usado com frequência (XIANG et al., 2012) por isso nesse estudo o VSWI foi multiplicado por 1000.

O índice varia de 0 a 100, os valores de VSWI mais próximos à zero indica a seca mais severa durante o período de estudo e os valores de VSWI próximo a 100 indica

condições mais úmidas. No estudo de Abbas et al. (2014) os valores do índice foram divididos em cinco classes de seca, foram: (a) seca severa: < 20, (b) seca moderada: 20–40, (c) seca leve: 40–60, (d) normal: 60–80, e (e) úmida: > 80. Sendo essa a mesma classificação a adotada neste estudo.

### 3.5.3 Comportamento da vegetação sadia

Para se obter a condição de saúde da vegetação foi estimado o *Vegetation Health Index* (VHI), que foi desenvolvido por Kogan (1995). Esse índice foi desenvolvido utilizando dados obtidos através de sensoriamento remoto nos infravermelho e infravermelho próximo. Esses dados são usados para identificar e classificar o estresse na vegetação devido à seca. O VHI teve o apoio da NOAA nos Estados Unidos, sendo uma das primeiras tentativas de monitorar e identificar impactos agrícolas relacionados à seca usando dados de sensoriamento remoto.

Series temporais de NDVI e LST têm potencial para descrever dinâmicas das condições de seca. Nesse contexto, esses conjuntos de dados tem sido empregados para se obter a condição da vegetação e umidade através do *Vegetation Condition Index* (VCI) e a condição da temperatura por meio do *Temperature Condition Index* (TCI), sendo a integração desses índices utilizado para calcular o VHI (SHOLIAH et al., 2016). Esse índice é um índice de seca da vegetação que incorpora a saúde da vegetação para indicar a extensão da seca vegetativa no período analisado. O VHI varia de 0 a 100 e é calculado através da equação abaixo (KOGAN, 1995):

$$VHI = a \cdot VCI + b \cdot TCI \quad (5)$$

sendo a e b pesos atribuídos para VCI e TCI, e seu valor varia dependendo das condições de umidade e temperatura da área de estudo. Em casos de condições de umidade e temperatura não determinados no processo de desenvolvimento das plantas, a e b podem ser iguais a 0,5, sendo esses coeficientes igualmente ponderados para calcular o VHI (CONG et al., 2017). O VCI é obtido a partir do NDVI para monitorar a condição da vegetação, estimado através da seguinte equação:

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \times 100 \quad (6)$$

no qual NDVI representa o valor observado para um período analisado (mês ou ano), enquanto que  $NDVI_{min}$  e  $NDVI_{max}$  indicam o valor mínimo e máximo de NDVI ao longo de toda a série observada. O índice gera um valor entre 0 e 100, que varia de acordo com as condições da vegetação. Durante um período seco a condição da vegetação é ruim e o VCI é próximo ou igual a zero, um VCI de 50 reflete uma vegetação na condição moderada e um VCI próximo de 100 apresenta uma vegetação em boas condições. O VCI é uma importante fonte dos impactos provocados pela seca na vegetação.

O TCI foi desenvolvido por Kogan (1995) e utiliza dados de temperatura (LST) das bandas térmicas derivadas de imagens de satélite. O TCI analisa os registros históricos das observações da LST de uma localização e período específicos durante o ano e compara o valor da LST para uma data específica, com os valores mínimos e máximos históricos da LST, para determinar as condições de seca na vegetação.

O índice assume que o valor histórico máximo de LST (resultante da redução significativa da evapotranspiração) representa uma quantidade mínima de desenvolvimento da vegetação. Isso devido ao clima desfavorável (seca), enquanto que os valores históricos mínimos de LST (resultando em temperaturas mais baixas devido a taxas mais altas de vegetação não submetida à evapotranspiração) correspondem às condições meteorológicas mais favoráveis e à quantidade máxima de crescimento da vegetação (SIVAKUMAR et al., 2011). A severidade da seca para uma determinada data é determinada pela posição relativa do valor de LST para os limites mínimos e máximos historicamente definidos da LST para o período analisado. O cálculo da TCI é obtido a partir da seguinte equação:

$$TCI = \frac{(LST_{m\acute{a}x} - LST)}{(LST_{m\acute{a}x} - LST_{m\acute{i}n})} \times 100 \quad (7)$$

no qual LST é o valor de temperatura da superfície observado para o período específico (anual ou mensal) e  $LST_{min}$  e  $LST_{max}$  são os valores mínimos e máximos históricos de temperatura, respectivamente. O intervalo do TCI é de 0 a 100. Esse índice próximo a 100 representa a temperatura próxima da sua quantidade máxima e o estresse térmico para a vegetação (ALAMDARLOO et al., 2018).

Assim, combinando as informações do VCI e do TCI Kogan (1995) surgiu o VHI, e cada um desses indicadores indicam estresse extremo da vegetação quando apresentam valor 0 e 100 o melhor estado. Para o VHI o estudo utilizou o seguinte esquema de classificação

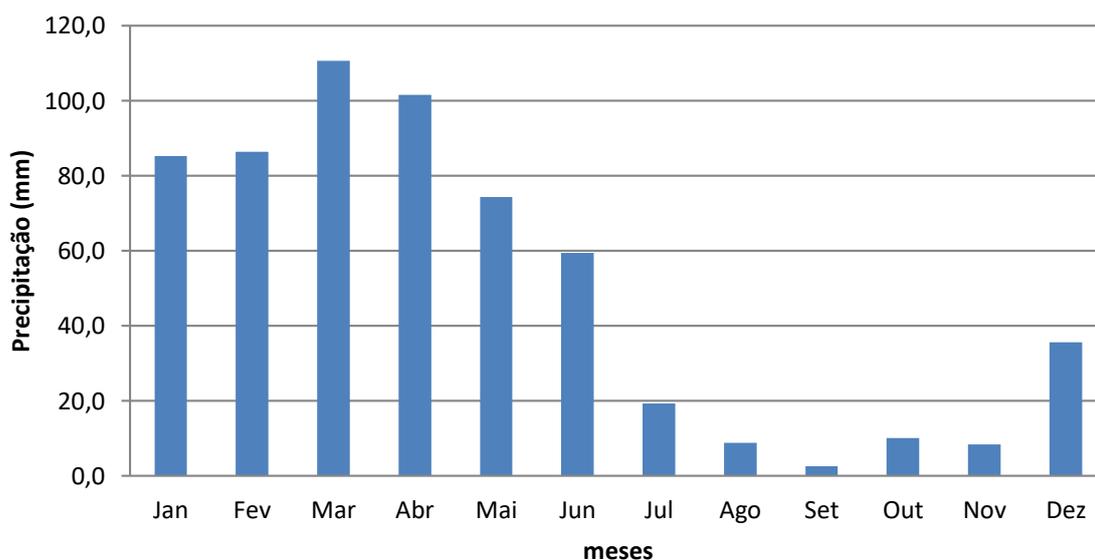
(SHOLIHAN et al., 2016), a saber: (a) seca extrema: < 10, (b) seca severa: 10–20, (c) seca moderada: 20–30, (d) seca suave: 30–40, e (e) condição normal: > 40.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 – Variabilidade da precipitação mensal e anual da bacia estimados através do satélite TRMM

A caracterização das chuvas na Sub-bacia do Alto Paraíba foi realizada levando-se em conta os dados estimados pelo TRMM para o período de 2001 a 2017. Nela, como mostra a Figura 10, identificou-se uma sazonalidade da precipitação média mensal para o período estudado, com a precipitação diminuindo no segundo semestre, entre os meses de julho a dezembro, enquanto há uma maior concentração das chuvas nos meses de janeiro a junho, e com os quatro meses consecutivos de maior precipitação (quadra chuvosa) ocorrendo de janeiro (85 mm) a abril (102 mm) para o período analisado (MENEZES et al., 2008). Percebe-se que no mês de março que se situa dentro da quadra chuvosa, ocorre a maior média mensal, com a precipitação de aproximadamente 111 mm. Por outro lado, a menor precipitação mensal ocorre no mês de setembro, com chuvas mínimas estimadas em torno de 3 mm.

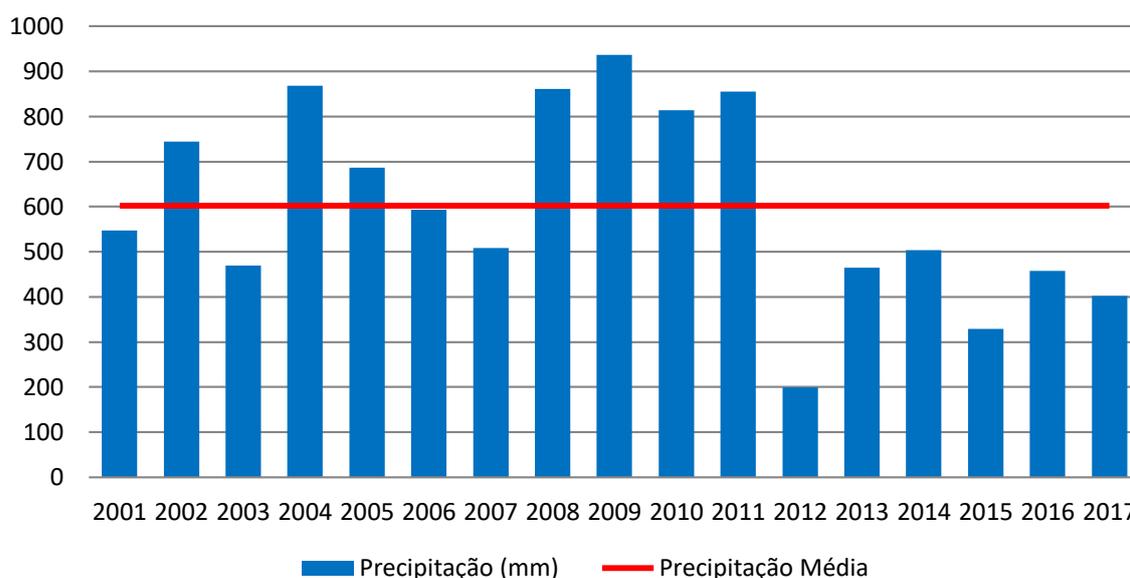
Figura 10-Variação da precipitação mensal para o período 2001–2017.



Fonte: A autora.

A variação anual das precipitações na Sub-bacia do Alto Paraíba baseado nos dados do TRMM entre 2001 e 2017 é demonstrado na Figura 11. Observa-se que as precipitações médias anuais variaram entre 199 mm (2012) e 937 mm (2009). Durante o período de 2008 a 2011 ocorreu uma temporada contínua de precipitações acima da precipitação média da bacia (2001–2017), que variaram entre 814 mm (2010) e 937 mm (2009). Durante esse período ocorreram eventos de La Niña considerados como fracos entre 2008 e 2009 e um evento de La Niña forte entre 2010 e 2011.

Figura 11-Variação da precipitação anual para o período 2001–2017.



Fonte: A autora.

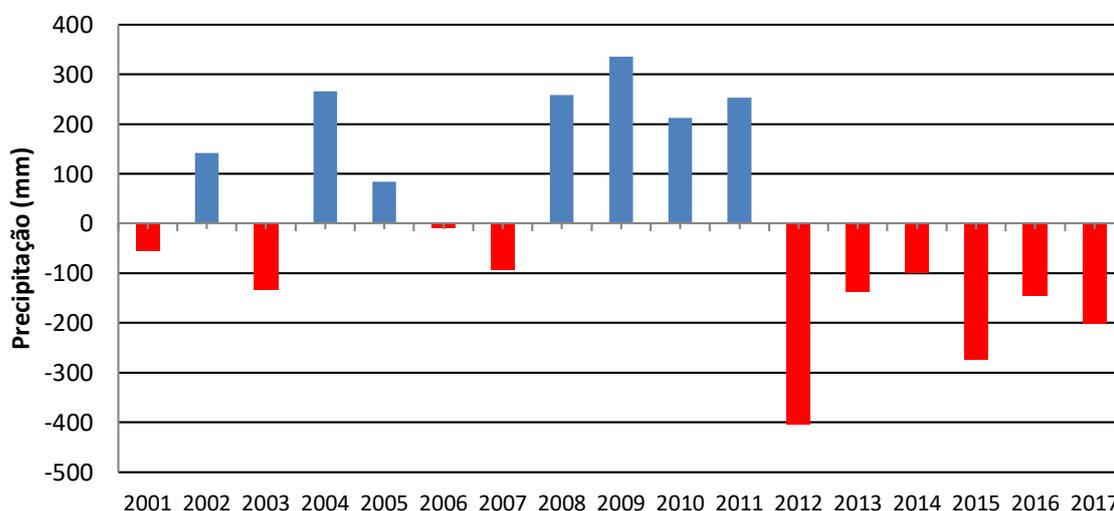
Outro período de destaque nas precipitações ocorreu entre 2012 e 2017, que foi um período marcado com os níveis de precipitação mais baixos em relação à precipitação média da bacia. Nesse período, os valores de precipitação variaram entre 199 mm (2012) e 329 mm (2015), como pode ser visto na Figura 11. Segundo Marengo et al. (2016), as regiões semiáridas no Nordeste brasileiro desde de 2012 vem passando por uma das secas mais longas e intensas das últimas décadas. Sendo esse evento de seca associado às condições meteorológicas associadas às temperaturas dos oceanos, como a ocorrência de um evento forte de El Niño durante 2015–2016, como também mudanças na circulação das massas, ocasionando um deslocamento da ZCIT para o norte de sua zona climatológica. Provocando, assim, o prolongamento e a gravidade da seca na região.

Analisando a Figura 12, observa-se o desvio absoluto das precipitações, que representa a diferença das precipitações medias anuais em relação à precipitação média da

bacia. Identificou-se que as precipitações na bacia têm um comportamento variado no período aqui analisado, mostrando períodos alternados de baixas e altas precipitações em relação a precipitação média da bacia. Sendo registrado entre os anos de 2001, 2003, 2006, 2007, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017 os maiores déficits de precipitação em relação à precipitação média, variando de 199 a 593 mm. Enquanto que, os anos 2002, 2004, 2005, 2008, 2009, 2010 e 2011 apresentaram os maiores valores de chuva acima da média histórica da bacia, com precipitações variando entre 686 e 937 mm.

Um período de destaque é a ocorrência de uma seca prolongada recente, que ocorreu entre 2012 e 2017, como pode ser visto na Figura 12. Nesse período de seca prolongada, os valores não ultrapassaram 504 mm, com uma precipitação média de 393 mm para o período de 2012 a 2017. Esse quadro de seca recente provocou redução na disponibilidade hídrica nos reservatórios e açudes que tem importância no armazenamento da água para atender diversos usos (abastecimento humano, dessedentação animal, irrigação e indústria, entre outros) na região semiárido do Brasil, ocorrendo uma redução acentuada no volume de água, principalmente, nos reservatórios dos estados do Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte (GONDIM, 2017).

Figura 12-Variação da precipitação anual para o período 2001–2017.



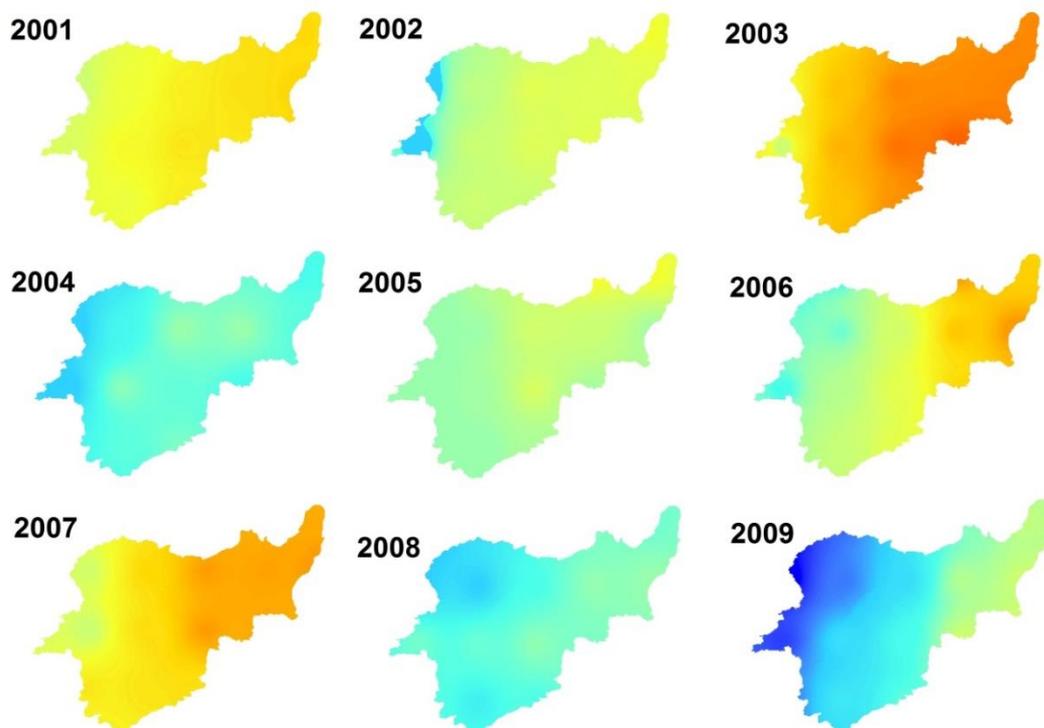
Fonte: A autora.

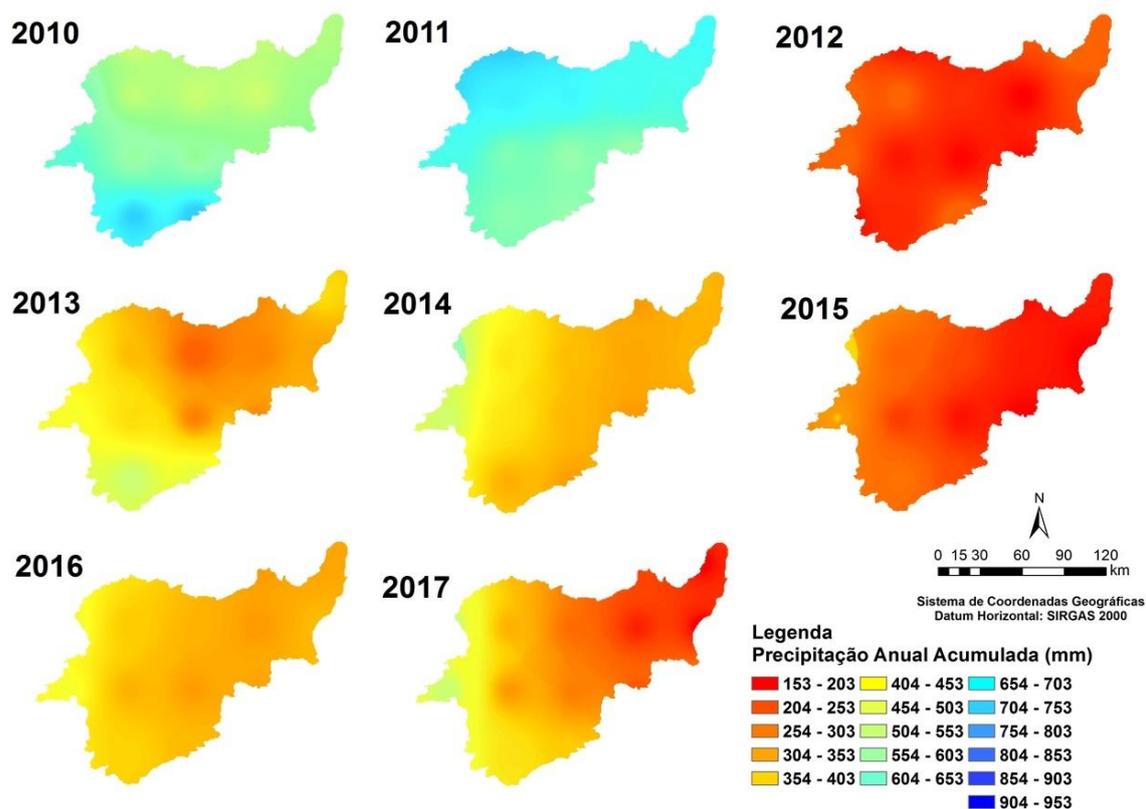
Com base na Figura 13 é possível analisar a variabilidade espaço-temporal da precipitação anual acumulada na bacia entre 2001 e 2017. A Figura mostra ainda que a bacia apresenta grande variabilidade espaço-temporal da precipitação, apresentando um

comportamento padrão na distribuição espacial das menores precipitações acumuladas na bacia, que se concentram na direção leste da mesma para todo o período analisado, sendo esse comportamento explicado pela presença do Planalto da Borborema que atua diretamente no deslocamento da umidade vinda de leste do estado, inibindo que essa umidade se propague na bacia na sua porção leste. Contrário a essa dinâmica ocorre na porção oeste, sul, noroeste e sudoeste da bacia a concentração dos maiores intervalos das precipitações mensais acumuladas.

Vale ressaltar que os anos de 2012 e 2015, definidos pelo IAC (Figura 14) como extremamente secos apresentaram as menores variabilidades espaciais das chuvas acumuladas, com as precipitações acumuladas que variaram aproximadamente entre o intervalo de 153 a 300 mm no ano de 2012, e para o ano de 2015 os intervalos de totais de chuva acumuladas variaram entre e 153 a 500 mm (Figura 13). Além disso, foi identificado que os maiores intervalos de precipitação anual acumulada ocorreram no ano de 2009, com variação das precipitações entre 601 a 953 mm.

Figura 13-Estimativa da precipitação anual acumulada para o período de 2001–2017 na bacia.





Fonte: A autora.

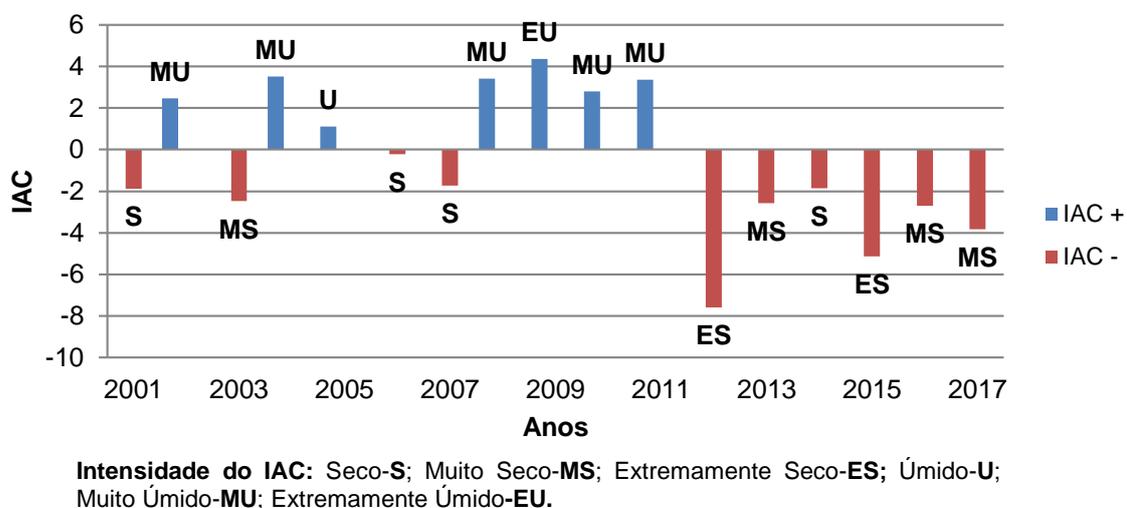
#### 4.2 – Análises das secas e escassez hídrica mediante o uso do índice de anomalia de chuva

Na Figura 14 é apresentado a distribuição temporal do IAC para a bacia do Alto Rio Paraíba durante o período 2001–2017. A partir desse índice foram definidos os anos secos e úmidos e a intensidade desses eventos. Assim, foram obtidos IAC positivos para os anos de 2002, 2004, 2005, 2008, 2009, 2010 e 2011, que corresponderam aos anos úmidos da série, com suas precipitações medias anuais com valores acima da precipitação média.

O IAC negativo foi obtido para os anos de 2001, 2003, 2006, 2007, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017, que corresponderam aos anos secos da série, e tiveram suas precipitações abaixo da precipitação média da bacia. Com base na intensidade do IAC verificou-se que, durante o período analisado, os anos que apresentaram classificados como extremamente secos foram 2012 e 2015 e o ano que correspondeu a extremamente úmido foi 2009.

Com base na definição de anos secos e úmidos obtidos através do IAC, verificou-se que a bacia apresenta uma variabilidade de ocorrência de anos secos e úmidos, no entanto, foram registrados com base no IAC a ocorrência de 10 anos secos para a bacia que variaram de acordo com as intensidades do índice em seco, muito seco e extremamente seco, e 7 anos definidos como úmidos que variaram entre úmido, muito úmido e extremamente úmido, como pode ser verificado na Figura 14.

Figura 14-Distribuição temporal do IAC para a bacia do Alto Rio Paraíba.



Fonte: A autora.

As precipitações no Nordeste do Brasil resultam da influência de diversos sistemas atmosféricos em várias escalas, como a Zona de Convergência Intertropical, os Vórtices Ciclônicos de Ar Superior, os Sistemas Frontais, e os Distúrbios de Leste (ESPINOZA, 1996), que sofrem modificações pelas características físicas da região e por anomalias atmosféricas de escala planetária. Os fenômenos ENOS (El Nino e La Nina) e o dipolo do Atlântico contribuem para modificar a frequência, a distribuição espacial e intensidade desses sistemas, causando mudanças diretas nas precipitações e nos recursos hídricos, e por consequência acarretam prejuízos para a população (ARAÚJO et al., 2009).

Alguns estudos apresentam o semiárido como uma das regiões mais afetadas pelas mudanças climáticas globais (IPCC, 2007). Dentre as consequências previstas com o impacto das mudanças climáticas no semiárido brasileiro temos: modificações na vegetação da Caatinga; diminuição da água de açudes e reservatórios; maior ocorrência de períodos secos; maior propensão a chuvas extremas e concentradas em um tempo curto, acarretando

enchentes; a indisponibilidade da produção agrícola de subsistência e o aumento da migração (ANGELOTTI et al., 2009).

O comportamento temporal do IAC (Figura 14) demonstra bem a variabilidade climática nessa região e a instabilidade, no qual correram sucessivos anos úmidos e secos. Uma explicação para essas anomalias poderia ser a atuação de fenômenos climáticos intensos como o El Niño e La Niña. Alguns estudos tem tentado associar ENOS (El Niño/Oscilação Sul) a mudanças em parâmetros climáticos e eventos de seca. Segundo Mendonça e Danni-Oliveira (2007), o El Niño é um fenômeno oceânico caracterizado pelo aquecimento acima do normal das águas superficiais situadas na região central e leste do pacífico, próximo a América do Sul e essencialmente na costa do Peru, que provoca alterações anormais nos climas terrestres gerando secas severas, inundações, ciclones, gerando impactos desastrosos para a sociedade. Os autores ainda relatam que existem várias teses e especulações referentes à origem do fenômeno, mas nada consolidado ainda.

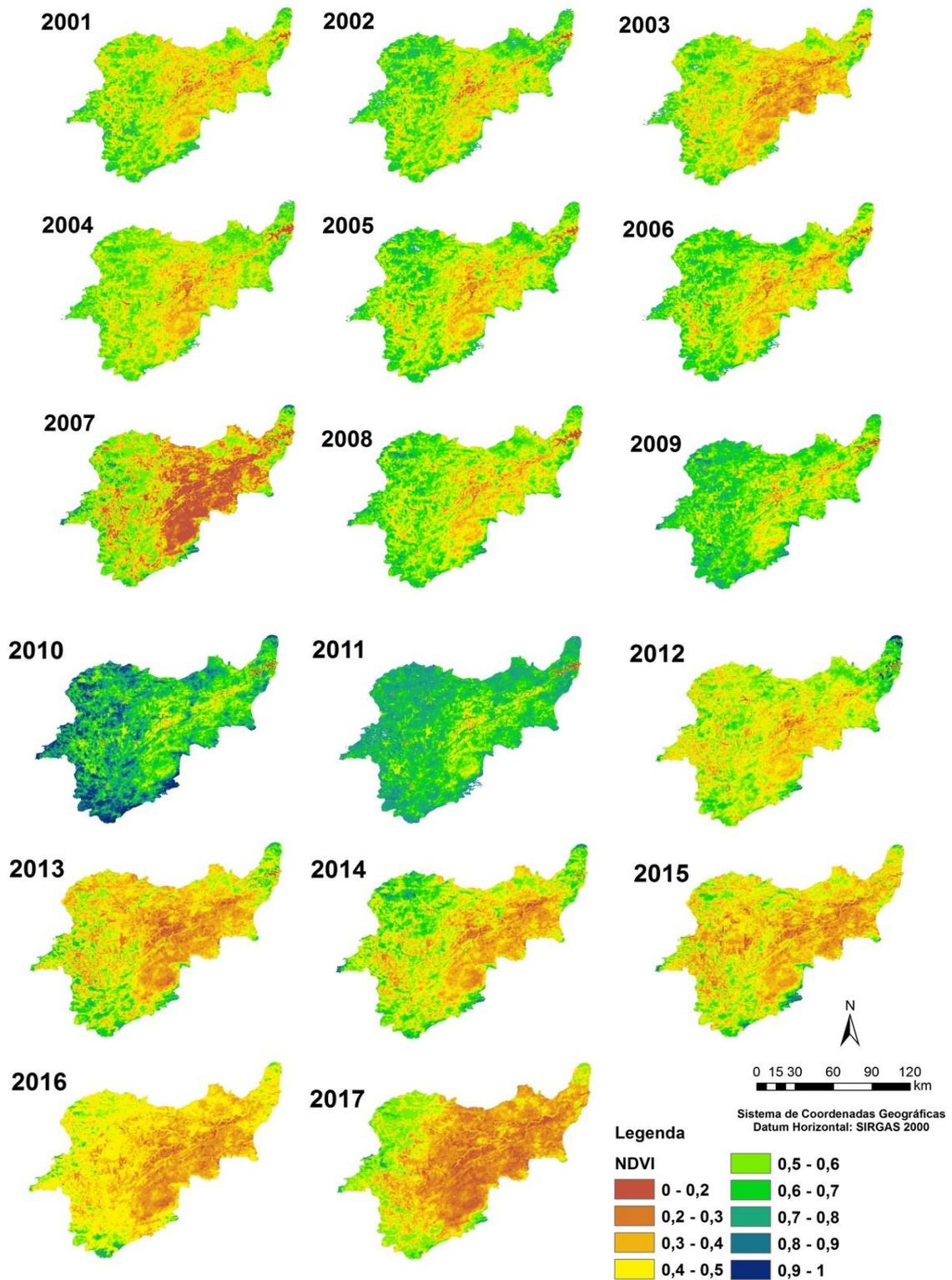
Ao analisar a ocorrência de ENOS (INMET, 2017) no período estudado foi possível observar que dos anos classificados como secos cinco tiveram a ocorrência de El Niño, sendo que o ano de 2012 foi caracterizado como extremamente seco e o ano de 2013 como muito seco não apresenta correlação com a ocorrência de El Niño. Mostrando que para essa bacia a correlação de anos de El Niño e ocorrência de seca não foi tão significativa.

#### **4.3 – Avaliação dos parâmetros biofísicos (NDVI e LST) obtidos do Sensor MODIS**

De acordo com as series temporais do NDVI foi possível identificar mudanças no comportamento da vegetação, como pode ser visto na Figura 15. Os resultados de NDVI demonstram que a vegetação apresentou suas melhores condições entre os anos de 2009, 2010 e 2011, que compreendem anos úmidos de acordo com o IAC, o que reflete na condição da vegetação.

Assim, praticamente toda a bacia apresentou valores de NDVI variando entre 0,4 a 1 nesses anos, e com os valores de NDVI bem distribuídos para toda a bacia, mas mais elevados nas regiões oeste, sudoeste e noroeste. Esse padrão apresenta concordância com a variabilidade espaço-temporal da precipitação, que também apresenta nessas mesmas direções às maiores concentrações das precipitações acumuladas na bacia.

Figura 15-Estimativa do NDVI para a bacia do Alto Rio Paraíba durante o período de 2001 a 2017.



Fonte: A autora.

Os valores de NDVI se apresentaram menores para os anos de 2003, 2007, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017, que são anos caracterizados pelo IAC neste estudo como secos (2001, 2006, 2007, 2014), muito secos (2003, 2013, 2016, 2017) e extremamente secos (2012). Foi observado para esses anos caracterizados como secos os menores valores de NDVI, que variam entre 0,2 e 0,5. Sendo os valores mais baixos de NDVI como entre 0,2 e 0,3 concentrados principalmente na parte central da bacia indicando a presença de solo exposto e uma vegetação possivelmente arbustiva ou áreas degradadas, como também apresentou um valor um pouco mais alto do NDVI de 0,4 a 0,6 nas áreas leste e oeste da bacia indicando uma vegetação mais arbórea (Figura 15).

Essa região de estudo, por ser semiárida, apresenta como característica a presença da vegetação natural conhecida como caatinga, composta de arbustos e pequenas árvores que geralmente são espinhosas e decíduas e perdem suas folhas no início da estação seca, resultando em estimativas baixas de NDVI. Durante a estação chuvosa, os valores de NDVI são mais elevados para a resposta da vegetação.

Assim, verifica-se a relação da precipitação com a condição da vegetação neste estudo, tendo em vista que nos anos úmidos foram verificados os maiores valores de NDVI e nos anos secos ocorreu a relação contrária. Além disso, também foi observado que as condições de seca e umidade prévias interferem nas condições posteriores do crescimento vegetativo das plantas como pode ser observado entre os períodos de 2009–2011 e 2012–2017.

Vale ressaltar que o NDVI é um índice que varia, geralmente, para uma área com cobertura vegetal, entre os valores de 0,1 a 0,8, dependendo da variação da estrutura da copa, densidade e umidade da vegetação. Valores de NDVI entre 0,4 e 0,8 são considerados altos e estão ligados a cobertura vegetal com boa condição, apresentando-se verde e densa. No entanto, valores pequenos, que variarem entre 0,2 e 0,3, representam baixa cobertura vegetal (CUNHA et al., 2015). No caso de regiões semiáridas, assim como na área da bacia do Alto Rio Paraíba, foram encontrados valores baixos do NDVI na área central da bacia, que também se apresentaram fortemente relacionados com a variabilidade espaço temporal da precipitação, conforme visto na Figura 13.

A partir dos valores de LST, apresentados na Figura 16, foi observado os menores valores de LST nos anos considerados como úmidos pelo IAC (2002, 2004, 2005, 2008, 2009, 2010 e 2011) com temperaturas que variaram entre 17 e 40 °C, e para os anos considerados secos (2001, 2003, 2006, 2007, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017), as

temperaturas variaram entre 20 e 42 °C. Além disso, também foi verificado que durante o período de seca prolongada, ocorrido entre 2012 e 2017, ocorreram as temperaturas mais altas, variando entre 25 e 42 °C. Sendo o ano de 2012 considerado pelo IAC como extremamente seco, com as temperaturas variando entre 36 e 42 °C para praticamente toda a bacia. A LST tem um comportamento parecido com as demais variáveis analisadas (precipitação, NDVI), com as maiores temperaturas concentradas na parte leste e central da bacia, e as menores temperaturas na parte oeste, sudoeste e noroeste da bacia.

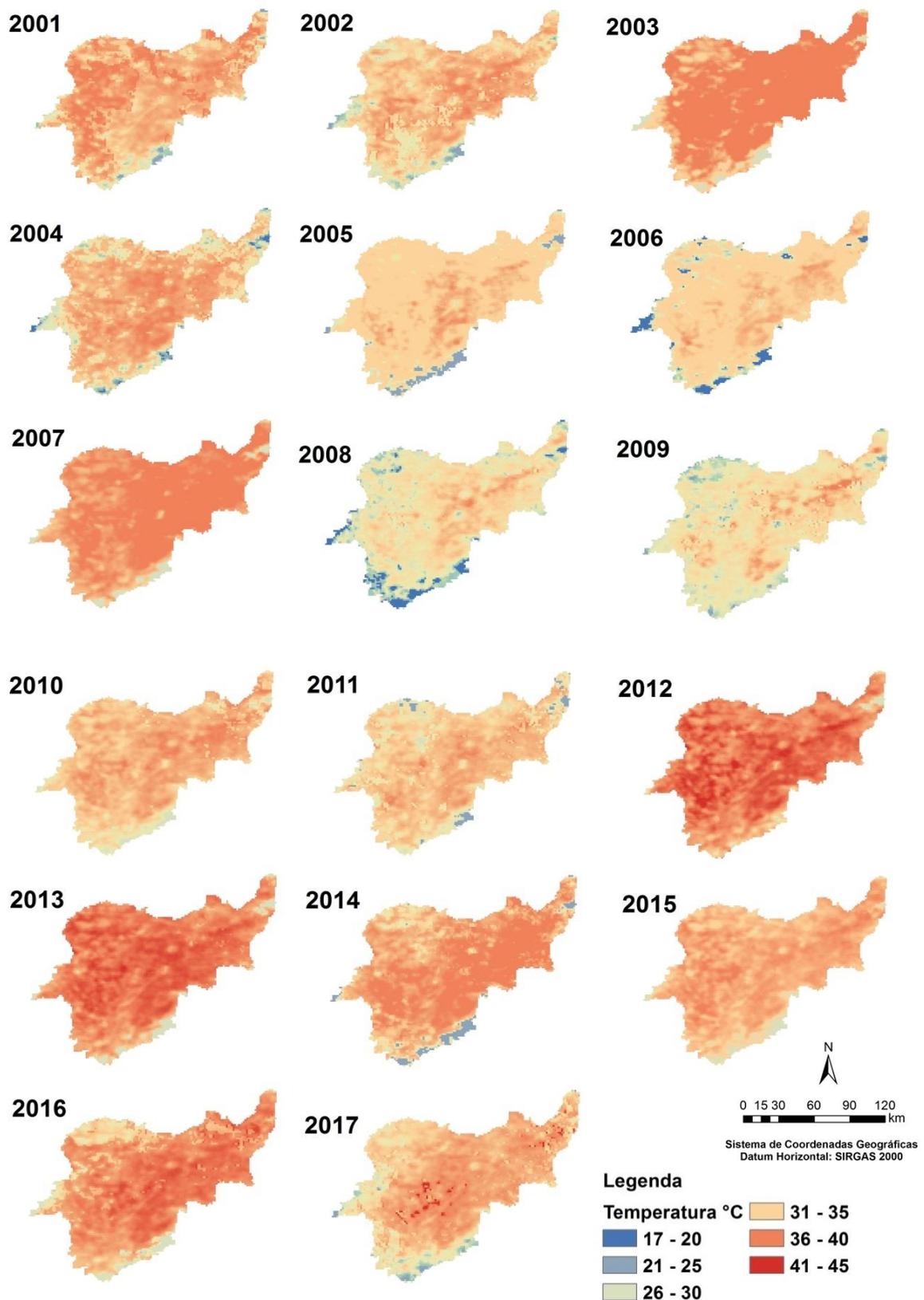
Analisando as Figuras 15 e 16, pode-se observar uma relação entre NDVI e LST, pois, nas porções da bacia onde ocorreram os valores mais baixos de temperatura da superfície como pode ser observado na Figura 16 também foram identificados os maiores valores de NDVI, como pode ser conferido nas porções oeste, sudoeste, noroeste, principalmente nos anos de 2008, 2009, 2010 e 2011, definidos pelo IAC como anos úmidos.

Como também a partir do período que marca o início prolongado de seca ocorrido entre 2012 e 2017 pode-se observar que ocorre um aumento na temperatura durante esse período para quase que toda a bacia principalmente durante os anos de 2012, 2013, 2015, 2016 e 2017, e se comparado com os valores obtidos para o mesmo período de NDVI verifica-se que se tem os menores valores de NDVI durante esses anos para a maior parte da bacia.

Porém, nas áreas e nos anos onde se concentraram os maiores valores de temperatura da superfície, o NDVI foi baixo, indicando que nessas áreas, a vegetação perdeu o seu vigor e possui menos biomassa, o que representa um maior nível de estresse da vegetação. Desta forma, compreende-se que durante as condições de seca, o aumento da temperatura de superfície da vegetação é um bom indicador do estresse hídrico das plantas e antecede o início da seca.

Vale ressaltar que, a condição da vegetação é limitada pela água e não pela temperatura de superfície, pois, nessa região, onde está inserida a bacia, há uma elevada incidência de radiação durante todo o ano, devido ao ângulo de inclinação da Terra e a sua proximidade com o a Linha do Equador. Assim, a radiação não é um fator limitante para o crescimento da vegetação, mas a variabilidade espaço-temporal com que as chuvas ocorrem pode interferir na condição da vegetação e na temperatura.

Figura 16-Estimativa da temperatura média anual para o período de 2001 a 2017 na bacia do Alto Rio Paraíba.



Fonte: A autora.

#### **4.4 – Avaliação da ocorrência de seca vegetativa na bacia baseados em sensoriamento remoto**

O cálculo do VSWI foi realizado através das médias mensais e anuais do NDVI e LST derivados do sensor MODIS. Foram avaliadas a extensão espacial e intensidade dos eventos da seca, principalmente para o período de seca entre 2012 e 2017. A análise foi feita para toda a Sub-bacia do Alto Paraíba, assim como a presença de vegetação natural, áreas agrícolas, áreas urbanas e corpos d'água.

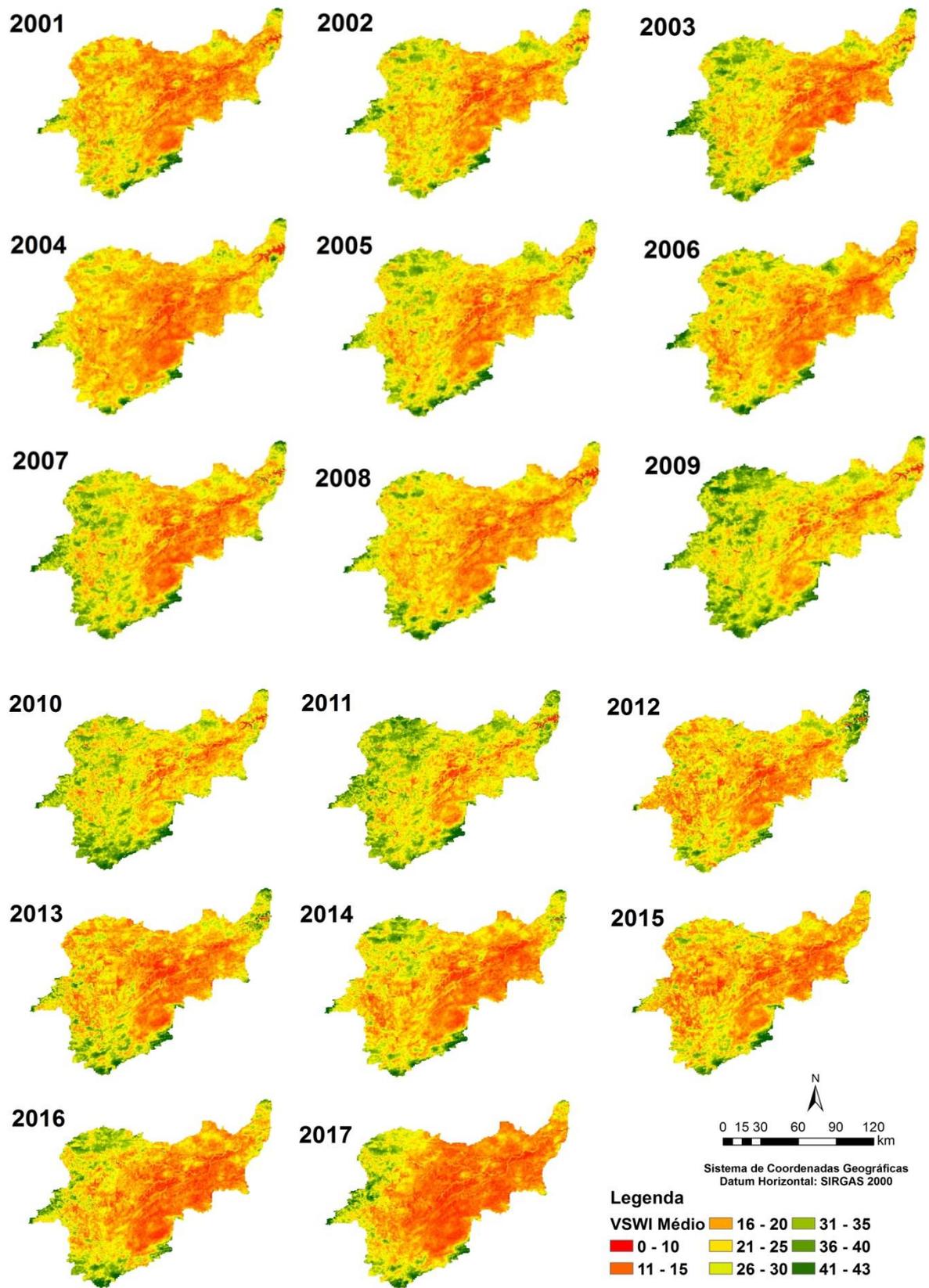
Como resultados, foram obtidos dados da série temporal entre 2001 e 2017 do VSWI para analisar as tendências de ocorrência de secas espaço-temporalmente na bacia (Figura 17). De acordo com Cong et al. (2017) compreende-se que os maiores valores de VSWI significam que a temperatura da vegetação é baixa ou que a densidade da vegetação é alta, não apresentando condição de seca.

Analisando o VSWI médio para a série temporal, observou-se que os menores valores estão concentrados na porção central e leste da bacia, o que pode estar associado ao padrão espacial da distribuição da precipitação acumulada (Figura 13).

Climatologicamente, a área de estudo é caracterizada por uma precipitação média anual que não excede 800 mm. Além disso, essa região semiárida tem como característica a vegetação de caatinga, com valores baixos de NDVI ao longo do ano. Também é perceptível que ao longo da série temporal analisada que os menores valores de VSWI indicaram altos estresse na vegetação na bacia, sendo representada a intensidade de seca mais severa pela cor vermelha na Figura 17.

De forma geral, as baixas precipitações prolongadas observadas nesse estudo a partir da análise da variabilidade média anual das precipitações e do IAC foram registradas durante os anos de 2012 e 2017, como esperado, devido ao fato da seca prolongada. Nesse período foi identificado também uma baixa produtividade na vegetação através do NDVI, bem como os maiores valores de temperatura da superfície, resultando no estresse hídrico para vegetação e maiores secas vegetativas, conforme detectado pelo VSWI.

Figura 17-Estimativa do VSWI para o período de 2001 a 2017 na bacia do Alto Rio Paraíba.



Fonte: A autora.

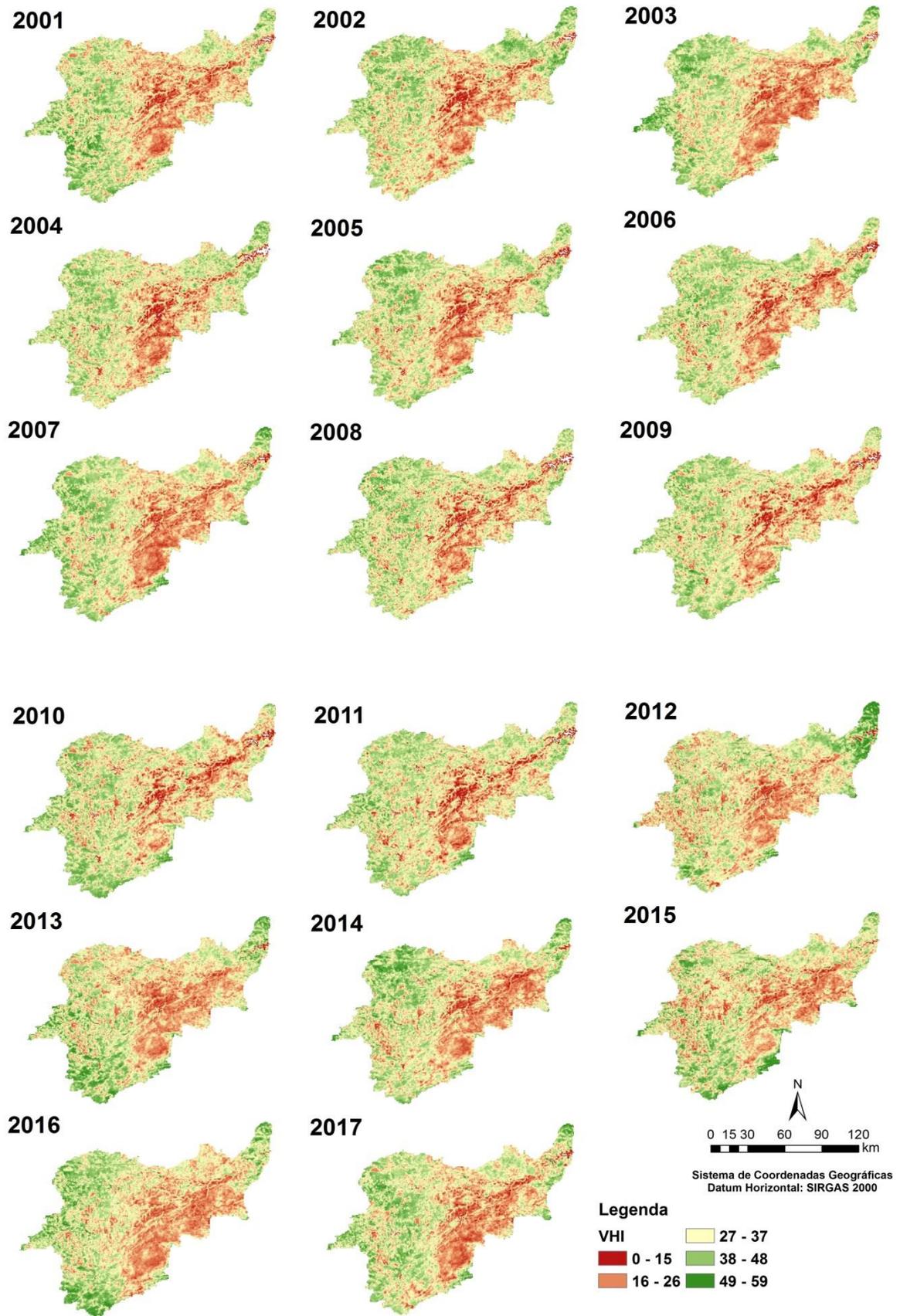
Analisando o padrão espacial e temporal do VSWI para o período de 2001 a 2017, pode ser observado que os anos 2009, 2010 e 2011, que foram caracterizados pelo IAC como extremamente úmidos e muito úmidos, apresentaram predominantemente as menores intensidades de seca vegetativa na bacia do Alto Rio Paraíba. Os resultados desse índice variaram qualitativamente entre seca moderada ( $VSWI > 20$ ) para a parte central e leste da bacia e condição normal ( $VSWI > 40$ ) para a parte oeste e sul. Sendo, apresentando nesse período as menores condições de seca vegetativa durante a série observada.

Durante o período de seca prolongado detectado pelo IAC ocorrido entre 2012 e 2017, foram observados que o VSWI indicou espacialmente condições de seca vegetativa para quase toda a bacia, com a vegetação apresentando condições de seca variando entre seca severa ( $VSWI < 20$ ) e seca moderada ( $VSWI > 40$ ), ocorrendo espacialmente na parte leste e central da bacia. Sendo observado um aumento espacial e temporal da condição de seca severa ( $VSWI < 20$ ) na bacia durante o período prolongado da seca entre 2012 e 2017, sendo no período de 2016-2017 observado os impactos mais significativos na vegetação, pois a maior parte da bacia durante esses anos apresentam condição de seca severa, principalmente na parte leste e central da bacia.

Aplicando o VSWI ficou exposto que as condições de seca na bacia não ocorrem de forma igual, tanto nos seus aspectos temporais quanto espaciais, sendo observado que mesmo em anos considerados úmidos pelo IAC a bacia apresentou condições de seca moderada ( $> 40$ ) o que pode estar relacionado às condições de uso e ocupação do solo da bacia. Entretanto, é perceptível com base no índice que a condição de seca na bacia seguiu um padrão espacial na porção central e leste da bacia para o período aqui analisado. De forma geral a os resultados do índice VSWI apresentaram uma boa relação empírica entre o LST e o NDVI para a bacia, bem como uma indicação de forma indireta das condições de umidade no solo.

Analisando os resultados obtidos para o VHI (Figura 18), foram identificados ao longo da série de 2001 a 2017 que a parte central da bacia apresenta as condições de seca severa (VHI entre 10–20) e extrema (VHI  $< 10$ ). Durante o período prolongado de maior umidade ocorrido durante 2008 e 2011 segundo o IAC, é visível uma redução da seca extrema (VHI  $< 10$ ) e um aumento da seca moderada (VHI entre 20–30) e seca suave (VHI entre 30–40) para quase toda a bacia.

Figura 18-Estimativa do VHI para o período de 2001 a 2017 na bacia do Alto Rio Paraíba.



Fonte: A autora.

Apesar de o VHI apresentar condições de seca vegetativa na parte leste e central da bacia como também foi apresentado pelo VSWI, analisando a variabilidade do VHI (Figura 18) ficou perceptível que o índice superestimou a presença de vegetação em condições de seca suave (VHI entre 30-40), e não apresentou os efeitos acumulativos da seca para vegetação durante o período de 2012 e 2017, sendo subestimadas as condições de seca para esse período. Assim, o VHI não apresentou a mesma relação empírica entre LST e NDVI exibida pelo VSWI nas suas estimativas.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando a complexidade de se avaliar a seca, o objetivo deste estudo foi avaliar as características espaciais e temporais da seca na bacia do Alto Rio Paraíba usando os índices VSWI e VHI baseados em produtos MODIS para analisar as diferenças na vegetação decorrentes dos eventos de seca e determinar o regime climático a partir do IAC.

O IAC apresentou a ocorrência de períodos recorrentes de secas na bacia do Alto Paraíba, com períodos alternados de umidade entre 2001 e 2017. Porém considerando os eventos secos e úmidos da bacia houve um período maior de eventos secos em relação aos eventos úmidos determinados pelo IAC. O que resulta em todos os problemas de abastecimento e impactos na produtividade agrícola e pecuária para a região.

O VSWI e o VHI de forma geral retrataram a seca vegetativa na bacia, no entanto, o VSWI apresentou maior conformidade para análise de seca na bacia, uma vez que os seus resultados refletem especificamente a relação das mudanças na condição da vegetação decorrentes da ausência de chuvas, que provocam uma diminuição nos teores de umidade no solo, e conseqüentemente uma redução na biomassa e um aumento na temperatura de superfície. Sendo essa relação demonstrada através do VSWI.

Além disso, o VSWI retrata bem os impactos provocados na vegetação por períodos prolongados de seca, como foi observado durante o período de 2012 a 2017, bem como reflete os impactos das chuvas na vegetação durante os períodos de maior umidade, como foi observado no período de 2009, 2010 e 2011. O índice também apresentou o impacto desses anos consecutivos de maior umidade na bacia para 2012, que mesmo marcando o início da seca prolongada e sendo considerado pelo IAC nesse estudo como um ano extremamente seco não apresentou espacialmente as piores condições de seca para o período de 2001 a 2017. Isso ocorreu devido 2012 ter sido antecedido por períodos de maior umidade (2009-2011).

Sendo assim, o VSWI representou melhor a variabilidade espaço-temporal das secas vegetativas para a Sub-bacia do Alto Paraíba, pois o índice se demonstrou sensível para detectar as mudanças térmicas na vegetação e no seu vigor decorrentes das reduções de umidade para o seu desenvolvimento, oriundos dos períodos sem precipitações prolongadas, provocando desta forma secas vegetativas.

O estudo traz como contribuições uma análise das secas vegetativas na Sub-bacia do Alto Paraíba baseadas em índices de seca e sensoriamento remoto, fornecendo informações a respeito do regime climático da bacia, a ocorrência de anos secos e chuvosos

através do IAC, e como os índices de seca vegetativas associadas a ferramenta do sensoriamento remoto podem ser utilizados para analisar os impactos espaciais dos eventos de seca na vegetação da bacia. Sendo possível através das informações espaço-temporais dos eventos de seca ocorridas na bacia observar as regiões mais afetadas pelas secas vegetativas, e partir dessas informações gerar planos que minimizem os impactos sofridos nessas áreas, principalmente se forem áreas na bacia onde existe a agricultura de sequeiro, que a atividade mais impactada por esse tipo de seca.

O estudo apresenta a necessidade de uma análise baseada em métodos estatísticos para validar os apontamentos levantados entre os índices VSWI e VHI, bem como analisar a correlação dos mesmos com os indicadores hidrometeorológicos (NDVI e LST) utilizados para analisar espaço temporalmente as secas nesse estudo. Além disso, com base nos resultados atingidos até o momento também se viu a necessidade de propor uma análise das secas vegetativas baseadas apenas nos limites das áreas de vegetação natural e com produção agrícola na bacia, desconsiderando principalmente os corpos hídricos presentes na mesma, pois eles podem interferir nas estimativas dos índices.

Foi perceptível a aplicabilidade do sensoriamento remoto nos estudos de eventos como o de secas, devido à facilidade em se obter os produtos, a sua capacidade de recobrirem grandes áreas e principalmente na aptidão dos sistemas sensores de produzir produtos em diversas faixas espectrais, tornando possível o estudo e a análise de diferentes elementos, em diferentes faixas espectrais. O que possibilitou a caracterização espaço temporal e o mapeamento das áreas afetadas na bacia do alto rio Paraíba pelas secas vegetativas.

Os resultados demonstraram que o relacionamento LST-NDVI pode ser efetivamente explorado como um indicador das características espaciais temporais das condições de estresse hídrico na região semiárida. O índice VSWI teve um bom efeito no monitoramento qualitativo da seca, e também é um índice com uma simplicidade na sua aplicação, e tem a capacidade de representar o estresse da vegetação e de forma indireta as condições de umidade do solo para a bacia, que podem servir para planos de gerenciamento agrícolas da bacia.

## REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, A. N. **O Domínios morfoclimáticos das caatingas brasileiras**. São Paulo: IG/IGEUG, Geomorfologia, nº 19. São Paulo: IGEOG-USP, 1974.

ABBAS, S.; NICHOL, J.E.; QAMER, F.M.; XU, J. Characterization of drought development through remote sensing; a case study in Central Yunnan, China. **Remote Sensing**, v. 6, n. 6, p. 4998-5018, 2014.

AESA – Agência Executiva de Águas do Estado da Paraíba. **Relatório anual sobre a situação dos recursos hídricos no estado da Paraíba, ano hidrológico: 2008-2009**. p. 1-95. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/documentos/relatorios/relatorio-hidrologico/>> acesso em: 04/04/2019.

ALAMDARLOO, E. H.; MANESH, M. B.; KHOSRAVI, H. 2018. Probability assessment of vegetation vulnerability to drought based on remote sensing data. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190:702, 2018.

ALLEY, W. M. The palmer drought severity index: limitations and assumptions. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 23, n. 7, p. 1100-1109, 1984.

ALVES, J. J. A.; ARAÚJO, M. A.; NASCIMENTO, S. S. Degradação da Caatinga: uma avaliação ecogeográfica. **Caminhos da Geografia**, v. 9, n. 2, p. 143-155, 2008.

ALVES, J. O.; PEREIRA, P. C.; QUEIROZ, M. G.; SILVA, T. G. F.; FERREIRA, J. M. S.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N. Índice de anomalia de chuvas diferentes mesorregiões do Estado de Pernambuco. **Pensar Acadêmico**, v. 14, n. 1, p. 37-47, 2016.

ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V.; SANTOS, C. A. C.; SANTOS, F. A. C. Comportamento sazonal do albedo e dos índices de vegetação na bacia hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 5, p.1015-1027, 2014.

ANGELOTTI, F.; SÁ, I.; PETRERE, V. **Mudanças climáticas e o semiárido brasileiro: o papel da Embrapa Semiárido e suas ações de pesquisa**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 28, 2009.

AQUINO, C. M. S.; ALMEIDA, J. A. P.; OLIVEIRA, J. G. B. Estudo da cobertura vegetal/uso da terra nos anos de 1987 e 2007 no núcleo de degradação/desertificação de São Raimundo Nonato - Piauí. **RA'EGA**, v. 25, p. 252-278, 2012.

ARAGÃO, J. O. R. A influência dos Oceanos Atlântico e Pacífico sobre a circulação atmosférica e a chuva na Região Semiárida do Nordeste do Brasil: Simulação e Observação. **Anais... IX Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 6-13 de novembro de 1996, Campos do Jordão - SP, 830-833, 1996.

ARAÚJO, A. L.; SILVA, M. T.; SILVA, B. B.; SANTOS, C. A. C.; DANTAS, M. P. Análise das mudanças de parâmetros biofísicos sobre o Nordeste brasileiro de 2002 a 2011 com dados MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, v. 4, p. 589-599, 2018.

ARAÚJO, L. E.; SILVA, D. F.; MORAES NETO, J. M.; SOUSA, F. A. S. Análise da variabilidade espaço-temporal da precipitação na Bacia do Rio Paraíba usando IAC. **Revista de Geografia**, v. 24, n. 1, p. 47-59, 2007.

ARAÚJO, L.E.; MORAES NETO, J.M.; SOUSA, F.A.S. Classificação da precipitação anual e da quadra chuvosa da bacia do rio Paraíba utilizando índice de Anomalia de Chuva (IAC). **Revista Ambiente & Água**, v. 4, n.3, p. 93-110, 2009.

ARSLAN, M.; ZAHID, R.; GHOURI, B. Assessing the occurrence of drought based on NDVI, LST and rainfall pattern during 2010–2014. **Anais... IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, p. 4233-4236, 2016.

AZEVEDO, P. V.; SILVA, V. P. R. Índice de seca de Bhalme e Mooley: uma adaptação regional. **Anais... Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 8, 1995, Belo Horizonte. **Anais... Belo Horizonte: SBMET**, p.696-699, 1994.

AZEVEDO, P. V.; SILVA, V. P. R. Índice de seca para a microrregião do agreste da Borborema, no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 9, n. 1, p.66-72, 1994.

BAI, J.-J.; YU, Y.; DI, L. Comparison between TVDI and CWSI for drought monitoring in the Guanzhong Plain, China. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 16, n. 2, p. 389-397, 2017.

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.

BELAL, A. A.; EL-RAMADY, H. R.; MOHAMED, E. S.; AHMED, M. S. Drought risk assessment using remote sensing and GIS techniques. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 35, n. 1, p. 35-53, 2012.

BHALME, H. N.; MOOLEY, D. A. Large-scale drought/floods and monsoon circulation. **Monthly Weather Review**, v. 108, n. 8, p. 1197-1211, 1980.

BHALME, H. N.; MOOLEY, D. A. Large-scale drought/floods and monsoon circulation. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 108, n. 8, p. 1197-1211, 1980.

BHUIYAN, C.; SAHA, A. K.; BANDYOPADHYAY, N.; KOGAN, F. N. Analyzing the impact of thermal stress on vegetation health and agricultural drought—a case study from Gujarat, India. **GIScience & Remote Sensing**, v. 54, n. 5, p. 1-22, 2017.

BOKEN, V. K. **Agricultural drought and its monitoring and prediction: some concepts**. In: BOKEN, V. K.; CRACKNELL, A. P.; HEATHCOTE, R. L. (Ed.). **Monitoring and predicting agricultural drought: a global study**. New York: Oxford University Press, p. 3-10, 2005.

BOKUSHEVA, R.; KOGAN, F.; VITKOVSKAYA, I.; CONRADT, S.; BATYRBAYEVA, M. Satellite-based vegetation health indices as a criteria for insuring against drought-related yield losses. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 220, p. 200-206, 2016.

BYUN, H. R.; WILHITE, D. A. Objective quantification of drought severity and duration. **Journal of Climate**, Boston, v. 12, n. 9, p. 2747-2756, Sept. 1999.

CALBETE, N.O.; SATYAMURTY, P. Vórtices Ciclônicos da Alta Troposfera que atuam sobre a Região Nordeste do Brasil. **Climanálise**, v. especial, p. 168-172, 1996.

CANAMARY, E. A. **Avaliação de índices para fins de monitoramento e previsão de secas no Nordeste setentrional**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-174/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015, 133p.

CARLSON, T. N.; GILLIES, R. R.; PERRY, E. M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. **Remote Sensing Reviews**, v. 9, n. 1-2, p. 161-173, 1994.

CASTRO, A. L. C. **Manual de desastres: desastres naturais**. Brasília (DF): Ministério da Integração Nacional, 2003. 182p.

CHANDRASEKAR, K.; SETHA SAI, M. V. R.; ROY, P. S.; DWEVEDI, R.S. Land Surface Water index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS vegetation index product. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, p. 3987-4005, 2010.

CHOI, M., JACOBS, J. M., ANDERSON, M. C., BOSCH, D. D. Evaluation of drought indices via remotely sensed data with hydrological variables. **Journal of Hydrology**, 476, 265-273, 2013.

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

CONG, D.; ZHAO, S.; CHEN, C.; DUAN, Z. Characterization of Droughts During 2001-2014 based on remote sensing: A Case Study of Northeast China. **Ecological Informatics**, v. 39, p. 56-67, 2017.

CORREIA, I. A. Populações e recursos hídricos no semiárido setentrional: distribuição espacial, déficit e consumo sustentável. **Anais... XX Encontro Nacional de Estudos Populacionais**. Foz do Iguaçu, p. 1-19, 2016.

CORREIA, R. C.; KIILL, L. H. P.; MOURA, M. S. B.; CUNHA, T. J. F.; JESUS JUNIOR, L. A.; ARAÚJO, J. L. P. **A região semiárida brasileira**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/916891/a-regiao-semiarida-brasileira>. 2011. Acesso em: 10 de nov. de 2018.

COUTINHO, M. D. L.; GAN, M. A.; RAO, V. B. Método objetivo de identificação dos vórtices ciclônicos de altos níveis na região Tropical Sul: validação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 311-323, 2010.

CUNHA, A. P. M.; ALVALÁ, R.C.; NOBRE, C.A.; CARVALHO, M. A. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 214, p. 494-505, 2015.

DANTAS, J. C. **Gestão da água, gestão da seca: a centralidade do açude no gerenciamento dos recursos hídricos do semiárido**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, 2018. 135p.

DAVENPORT, M. L.; NICHOLSON, S. E. On the relation between rainfall and the Normalized Difference Vegetation Index for diverse vegetation types in East Africa. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, p. 2369-2389, 1993.

DE NYS, E.; ENGLE, N. L.; MAGALHÃES, A. R. **Secas no Brasil: política e gestão proativas**. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE; Banco Mundial, 2016. 292p.

DU, L.; TIAN, Q.; YU, T.; MENG, Q.; JANCOS, 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.

DU, T. L. T.; BUI, D. D.; NGUYEN, M. D.; LEE, H. Satellite-Based, Multi-Indices for Evaluation of Agricultural Droughts in a Highly Dynamic Tropical Catchment, Central Vietnam. **Water**, v. 10, 659, 2018.

ESPINOZA, E. S. **Distúrbios nos ventos de leste no Atlântico Tropical**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1996. 127p.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. da; AMORIM, A. de O.; CARDOSO, A. S. **Índices para quantificação de seca**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009. 48p.

FRANCISCO, P. R. M. **Classificação e mapeamento das terras para mecanização do Estado da Paraíba utilizando sistemas de informações geográficas**. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, 2010. 122f.

FREITAS, M. A. S. **A Previsão de secas e a gestão hidroenergética: O caso da bacia do Rio Paraíba no Nordeste do Brasil**. **Anais... Seminário Internacional Sobre Represas y Operación de Embalses**, Puerto Iguazú: CACIER, 2004.

FREITAS, M. A. S. Previsão de secas por meio de métodos estatísticos e redes neurais e análise de suas características através de diversos índices (Ceará - Nordeste do Brasil). **Anais... Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 9, 1996, Campos do Jordão: SBMET, p.163-165, 1996.

FREITAS, M. A. S. Um sistema de suporte à decisão para monitoramento de secas Meteorológicas em Regiões semiáridas. **Revista Tecnologia**, v. 19, n. 1, p. 19-30, 1998.

FREITAS, M. A. S. Um Sistema de Suporte à Decisão para o Monitoramento de Secas Meteorológicas em Regiões Semiáridas. **Revista Tecnologia**, v. suplem, p. 84-95, 2005.

GALVÍNCIO, J. D. **Balanço hídrico à superfície da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa utilizando informações digitais do terreno**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), Campina Grande-PB: UFCG, 2005. 174p.

- GARCÍA-LEÓN, D.; CONTRERAS, S.; HUNINK, J. Comparison of meteorological and satellite-based drought indices as yield predictors of Spanish cereals. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 388-396, 2019.
- GIBBS, W. J.; MAHER, J. V. **Rainfall deciles as drought indicators**. Melbourne: Commonwealth of Australia, 1967. 84 p. (Bureau of Meteorology. Bulletin, 48).
- GIULIETTI, A. M.; CONCEIÇÃO, A.; QUEIROZ, L. P. **Diversidade e caracterização das fanerógamas do Semiárido brasileiro**. Recife: Associação Plantas do Nordeste, 2006. 488p.
- GODIM, J.; FIOREZE, A. P.; ALVES, R. F. F.; SOUZA, W. G. A seca atual no Semiárido nordestino-Impactos sobre os recursos hídricos. **Parcerias Estratégicas**, v. 22, n. 44, p. 277-300, 2017.
- GOMES, A. C. C., BERNARDO, N., ALCÂNTARA, E. Accessing the southeastern Brazil 2014 drought severity on the vegetation health by satellite image. **Journal of Natural Hazards**, 89(3), 1401–1420, 2017.
- GOMES, A. C. C.; BERNARDO, N.; ALCÂNTARA, E. Accessing the southeastern Brazil 2014 drought severity on the vegetation health by satellite image. **Natural Hazards**, v. 89, n. 3, p. 1401-1420, 2017.
- HAGMAN, G. **Prevention better than cure: report on human and environmental disasters in the Third World**. Stockholm: Swedish Red Cross, 1984.
- HAIED, N.; FOUFOU, A.; CHAAB, S.; AZLAOUI, M.; KHADRI, S.; BENZAHIA, K.; BENZAHIA, I. Drought assessment and monitoring using meteorological indices in a semi-arid region. **Energy Procedia**, v. 119, p. 518-529, 2017.
- HASTENRATH, S.; CASTRO, L. C.; ACEITUNO, P. The Southern Oscillation in the tropical Atlantic sector. **Contributions to Atmospheric Physics**, v. 60, p. 447-463, 1987.
- HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in north-east Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological**, v. 110, p. 411-425, 1977.
- HATMOKO, W.; RADHIKA; RAHARJA, B.; TOLLENAAR, D.; VERNIMMEN, R. Monitoring and prediction of hydrological drought using a drought early warning system in Pemali-Comal river basin, Indonesia. **Procedia Environmental Sciences**, v. 24, p. 56-64, 2015.
- HAYES, M. J. **Drought Indices**. Van Nostrand's Scientific Encyclopedia. John Wiley & Sons, Inc., p. 13, 2006.
- HAYES, M. J.; SVOBODA, M. D.; WARDLOW, B. D.; ANDERSON, M. C.; KOGAN, F. Drought monitoring: historical and current perspectives. In: WARLOW, B. D.; ANDERSON, M. C.; VERDIN, J. P. (Ed.). **Remote sensing of drought: innovative monitoring approaches**. Boca Raton: CRC PRESS, 2012, p. 1-10.
- 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.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Semiárido Brasileiro**. Portal Geociências. Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15974-semiarido-brasileiro.html?=&t=o-que-e>>, Acesso em: 06/07/2018.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Censo Agropecuário, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em novembro 2018.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Anomalia da precipitação trimestral**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/desvioChuvaTrimestral>> acesso em: 06/11/2017.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: synthesis report: summary for policymakers, contribution of working groups I-III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC fourth assessment report climate change 2007**. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.

KARL, T. R.; KNIGHT, R. W. **Atlas of monthly Palmer Hydrological Drought Indices (1931–1983) for the contiguous United States**. Asheville: National Climatic Data Center, p. 319 (Historical climatology, Series 3–7), 1985.

KOBIYAMA, M. *et al.* Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109 p.

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

KOGAN, F. N. Global drought and flood-watch from NOAA polar-orbiting satellites. **Advances in Space Research**, v. 21, n. 3, p. 477-480, 1998.

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

KOGAN, F. N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, p. 1405-1419, 1990.

KUMAR, K. K.; SILVA, J. A. T.; SILVA, B. B. Estudo de seca e aridez em Fortaleza, CE. **Anais... Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, 6, 1989, Maceió: SBAGRO, p.175-184, 1989.

KUNDZEWICZ, Z. W.; MATA, L. J.; ARNELL, N.W.; DÖLL, P.; KABAT, P.; JIMÉNEZ, B.; MILLER, K. A.; OKI, T.; SEN, Z.; SHIKLOMANOV, I. A. **Freshwater resources and their management**. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007, p. 173-210.

LE COMTE, D. Weather highlights around the world. **Weatherwise**, v. 47, p. 23-26, 1994.

- LE COMTE, D. Weather highlights around the world. **Weatherwise**, v. 47, p. 20-22, 1995.
- LI, X.; WANG, Y.; TANG, S.; SHEN, S. NDVI-LST feature space based drought monitoring using MERSI data in Hunan Province of China. **Anais...** International Conference on Geoinformatics, Nanjing, China, p. 1-5, 2012.
- LIMA, M. C.; SANTOS, R. C.; MORAES, J. C. Estudo de secas no Estado de Alagoas. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 6, 1989, Maceió. **Anais...** Maceió: SBAGRO, p.160-169,1989.
- LIMA, R. C. S. A. et al. Abastecimento de água em Campina Grande (PB): Um panorama histórico. Campina Grande hoje e amanhã. [Livro Eletrônico] – Campina Grande: EDUEPB, p.15-27, 2013. Disponível em:<[http://www.uepb.edu.br/download/outros\\_documentos\\_2013/0612%20CAMPINA\\_GRANDE\\_HOJE\\_AMANHÃ.pdf](http://www.uepb.edu.br/download/outros_documentos_2013/0612%20CAMPINA_GRANDE_HOJE_AMANHÃ.pdf)> acesso em: 04/04/2018.
- LIN, Y., GAO, W., SHI, J. P., & WANG, J. Remote sensing monitoring of drought based on MODIS and FY-2D satellite rainfall data. **Journal of Arid Land Resources and Environment**, 28(12), 51–57, 2014.
- LIU, J.; WU, J.; WU, Z.; LIU, M. Response of NDVI dynamics to precipitation in the Beijing–Tianjin sandstorm source region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, p. 5331-5350, 2013.
- LIU, M.; YANG, S.; HUANG, H.; He, H.; Li, S.; CUI, Y. 2015. Joint use of soil moisture and vegetation growth condition by remote sensing on the agricultural drought monitoring. **Anais...** SPIE 9815, MIPPR 2015: Remote Sensing Image Processing, Geographic Information Systems, and Other Applications, 98151T, 2015.
- LOPES, A. A.; ANDRADE, R. G.; TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; DUENHA, T. V. Monitoramento do índice de condição da vegetação (ICV) utilizando imagens PROBA-V em áreas de pastagens. **Anais...** Congresso Internacional de Iniciação Científica, 9, Campinas, 2015.
- MACEDO, M. J. H.; GUEDES, R. V. S.; SOUSA, F. A. S.; DANTAS, F. R. C. Análise do índice padronizado da precipitação para o Estado da Paraíba, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 5, n. 1, p. 204-214, 2010.
- MARCUZZO, F. F. N.; MELO, D. C. R.; ROCHA, H. M. Distribuição espaço-temporal e sazonalidade das chuvas no Estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 4, p. 157-167, 2011.
- MARIN, A. M. P.; SANTOS, A. P. S.; 2013. **O semiárido brasileiro: riquezas, diversidades e saberes**. Campina Grande: INSA/MCTI, 73 p.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales, **Anais...** 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Anaheim, 1993.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to the time scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8., 1993, Anaheim, CA. **Proceedings**. Boston: American Meteorological Society, 1993. p. 179-184.

MEDEIROS, A. M. T.; BRITO, A. C. A seca no Estado da Paraíba-Impactos e ações de resiliência. **Parcerias Estratégicas**, v. 22, n. 44, p. 139-154, 2017.

MEDEIROS, S. de S. *et al.* **Sinopse do censo demográfico para o semiárido Brasileiro**. Campina Grande: INSA, 2012.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. Oficina de Textos, 206, 2007.

MENEZES, H. E. A.; BRITO, J. I. B.; SANTOS, C. A. C.; SILVA, L. L. A relação entre a temperatura da superfície dos oceanos tropicais e a duração dos veranicos no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 2, p. 152-161, 2008.

MEZA, F. Recent trends and ENSO influence on droughts in Northern Chile: An application of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **Weather and Climate Extremes**, v. 1, p. 51-58, 2013.

Ministério da Integração Nacional. **S2ID – Sistema Integrado de Informações sobre Desastres**. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil do Ministério da Integração Nacional. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br>. Acesso em março de 2017.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, v. 391, n. 1-2, p. 202-216, 2010.

MOREIRA, A. A.; GUASSELLI, L. A.; SILVA FILHO, L. C. P.; ANDRADE, A. C. F.; ARRUDA, D. C. Índice de Condição da Vegetação (VCI) para mapeamento de seca no Norte do estado de Minas Gerais. **Anais... XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, João Pessoa-PB: INPE, 2015.

MOREIRA, **Mesorregiões e microrregiões da Paraíba**: delimitação e caracterização. João Pessoa: Gasplan, 1989. 74p.

NAGARAJAN, R. **Drought assessment**. New Delhi, India, Capital Publishing Company, 2009.

NASCIMENTO, S. S.; LIMA, E. R. V.; LIMA, P. P. S. Uso do NDVI na análise temporal da degradação da caatinga na bacia do Alto Rio Paraíba. **Revista OKARA: Geografia em debate**, v. 8, n. 1, p. 72-93, 2014.

NICHOL, J.; ABBAS, S. Integration of remote sensing datasets for local scale assessment and prediction of drought. **Science of the Total Environment**, v. 505, p. 503-507, 2015.

NIEMEYER, S. **New drought indices**. In: LÓPEZ-FRANCOS, A. (Ed.). **Drought management: scientific and technological innovations**. Zaragoza: CIHEAM, 2008. P. 267-274. (Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens, n. 80). Disponível em: <http://om.ciheam.org/om/pdf/a80/00800451.pdf>. Acesso em Junho de 2019.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Bulletin of the American Meteorology Society**, v. 22, p. 173-179, 1996.

PALMER, W. C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new Crop Moisture Index. **Weatherwise**, Washington, v. 21, p. 156–161, 1968.

PALMER, W. C. **Meteorological Drought**. US Department of Commerce, Weather Bureau, Research Paper No. 45, 1965. 58p.

PALMER, W.C. **Meteorological Drought**. U. S. Dep. of Commer., Wash., D. C, Res. Pap. 45, 58 pp., 1965.

PARAÍBA. Gerência Executiva Estadual de Proteção e Defesa Civil do Estado da Paraíba - GEEDEC-PB. **Relatório de estiagem (2012 / 2015)**. Relatório Interno, 2016. 16p.

PEDRO-MONZONÍS, M.; SOLERA, A.; FERRER, J.; ESTRELA, T.; PAREDES-ARQUIOLA, J. A. Review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 482-493, 2015.

PEREIRA, G.; SILVA, M. E. S.; MORAES, E. C.; CARDOZO, F. S. Avaliação dos dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 139-148, 2013.

REMBOLD, F.; ATZBERGER, C.; SAVIN, I.; ROJAS, O. Using low resolution satellite imagery for yield prediction and yield anomaly detection. **Remote Sensing**, v. 5, n. 4, 2013.

REPELLI, C. A.; FERREIRA, N. S.; ALVES, J. M. B.; NOBRE, C. A. Índice de anomalia de precipitação para o Estado do Ceará. **Anais...** Congresso Brasileiro de Meteorologia e Congresso da FLLSMET, Brasília, 1998.

REPELLI, C.A.; NOBRE, C.A. Um novo índice de anomalia de precipitação para o Nordeste do Brasil. **Anais...** Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 7, Viçosa: SBAGRO, p. 21-25, 1991.

RODAL, M. J. N.; SAMPAIO, E. V. S. B. A. **A vegetação do bioma caatinga**. In: SAMPAIO, E. V. S. B. A.; GIULIETTI, A. M.; VIRGÍNIO, J.; GAMARRA-ROJAS, C. F. L. (Ed.). *Vegetação e flora na caatinga*. Recife: PNE/CNIP, p. 11-34, 2002.

ROOY, M. P.; VAN. A. Rainfall Anomaly Index Independent of Time and Space. **Notes**, v. 14, p. 1-43, 1965.

ROSSATO, L.; MARENGO, J. A.; ANGELIS, C. F.; PIRES, L. B. M.; MENDIONDO, E. M. Impact of soil moisture over Palmer Drought Severity Index and its future projections in Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, e36, 2017.

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

SANCHES, F. O.; VERDUM, R.; FISCH, G. O índice de anomalia de chuva (IAC) na avaliação das precipitações anuais em Alegrete/Rs (1928–2009). **Caminhos de Geografia**, v. 15, n. 51, p. 73-84, 2014.

SANTOS, C. A. G.; BRASIL NETO, R. M.; SILVA, R. M.; SANTOS, D. C. Innovative approach for geospatial drought severity classification: a case study of Paraíba state, Brazil. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 33, p. 545-562, 2018.

SANTOS, C. A.; BRITO, J. I. B. Análise dos índices de extremos para o semi-árido do Brasil e suas relações com TSM e IVDN. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 3, p. 303-312, 2007.

SHAFER, B. A.; DEZMAN, L. E. **Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas**. In: Western Snow Conf. Colorado State University, Reno, p. 164-175, 1982.

SHAFER, B.A.; DEZMAN, L. E. **Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to Assess the Severity of Drought Conditions in Snowpack Runoff Areas**. Proceedings of the Western Snow Conference, Colorado State University, Fort Collins, CO, p. 164–175, 1982.

SHOLIHAN, R. I.; TRISASONGKO, B. H.; SHIDDIQ, D.; IMAN, L. O. S.; KUSDARYANTO, S.; MANIJO; PANUJU, D. R. Identification of agricultural drought extent based on vegetation health indices of Landsat data: case of Subang and Karawang, Indonesia. **Procedia Environmental Sciences**, 33, p. 14-20, 2016.

SIVAKUMAR, M. V. K.; RAYMOND, P. M.; DONALD, A.; WILHITE, D. A. (Eds.). **Agricultural Drought Indices**. Anais... WMO/UNISDR Expert Group Meeting on Agricultural Drought Indices, Murcia, Spain: World Meteorological Organization. AGM-11, WMO/TD No. 1572; WAOB-2011. 197p.

SOARES, A. S. D.; PAZ, A. R.; PICCILLI, D. G. A. Avaliação das estimativas de chuva do satélite TRMM no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 2, p. 288-299, 2016.

SOUSA JÚNIOR, M. de A.; LACRUZ, M. S. P. **Sensoriamento remoto para seca/estiagem**. In: SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. Sensoriamento Remoto para Desastres. São Paulo: Oficina de Textos, p. 149-174, 2015.

SOUZA, B. I. **Cariri paraibano: do silêncio do lugar à desertificação**. Tese de Doutorado. UFRGS, Porto Alegre, 2008.

UNGANAI, L. S.; KOGAN, F. N. Drought monitoring and corn yield estimation in southern Africa from AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 63, p. 219-232, 1998.

USDA – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. **Major world crop areas and climatic profiles**. World Agricultural Outlook Board, US Department of Agriculture. Agricultural Handbook 664, p. 157-170, 1994.

VALADÃO, C. E. A. et al. **Uma análise comparativa de alguns índices de aridez aplicados às capitais do nordeste do Brasil**. Anais... XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010. Disponível em: <http://www.sbmet.org.br/cbmet2010/1.html>. Acesso em: 15 de Jan. de 2019.

- WAN, Z., ZHANG, Y., ZHANG, Q., LI, Z. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature, **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, p. 261-274, 2004.
- WANG, H.; LIN, H.; LIU, D. Remotely sensed drought index and its responses to meteorological drought in Southwest China. **Remote Sensing Letters**, v. 5, n. 5, p. 413-422, 2014.
- WANG, H.; VICENTE-SERRANO, S. M.; TAO, F.; ZHANG, X.; WANG, P.; ZHANG, C.; CHEN, Y.; ZHU, D.; EL KENAWY, A. Monitoring winter wheat drought threat in Northern China using multiple climate-based drought indices and soil moisture during 2000–2013. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 228–229, p. 228-229, 2016.
- WANG, J., BAI, J., LI, L., YU, Y. Vegetation supply water index based on MODIS data Analysis of the in Yunnan in spring of 2012. **Anais... IEEE- The Third International Conference on Agro-Geoinformatics, Agro-Geoinformatics**, p. 1-7, 2014.
- WEGHORST, K. M. **The reclamation drought index: guidelines and practical applications**. Denver: Bureau of Reclamation, 6 p., 1996.
- WEI, S.; DE-YONG, Y.; ZHONG-PING, S.; JUN-GE, Z.; XIAO-XUAN, L.; QIAN, L. Vegetation changes in the 598 Analysis of Biophysical Parameters Changes Over Northeastern Brazil From 2002 to 2011 With Modis Data agricultural-pastoral areas of northern China from 2001 to 2013. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 15, p. 1145-1156, 2016.
- WILHITE, D. A. **Drought as a natural hazard**. In: WILHITE, D. A. (Ed.). *Drought: a global assessment*. London: Routledge, p. 3-18, 2000.
- WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. **Water International**, v. 10, p. 111-120, 1985.
- WMO – World Meteorological Organization. **Drought monitoring and early warning: concepts, progress and future challenges**, 2006.
- WMO – World Meteorological Organization. **Handbook of drought indicators and indices. Integrated drought management tools and guidelines**. In: Svoboda, M.; Fuchs, B.A. (Eds.), *World Meteorological Organization and Global Water Partnership*, 2016.
- WU, J.; ZHOU, L.; MO, X.; ZHOU, H.; ZHANG, J.; JIA, R. Drought monitoring and analysis in China based on the Integrated Surface Drought Index (ISDI). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 41, p. 23-33, 2015.
- XAVIER, T.M.B.S.; XAVIER, A.F.S. Classificação de anos secos e chuvosos na Região Nordeste do Brasil e sua distribuição espacial. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 3, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBMET, 1984. p.267-275.
- ZHANG, D.; MENG, L.; QU, J. J.; ZHANG, W.; WANG, L. Estimation of Surface Soil Moisture in Cornfields Using a Modified MODIS-Based Index and Considering Corn Growth Stages. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 10, n. 12, p. xx-xx, 2017.

ZHANG, L.; JIAO, W.; ZHANG, H.; HUANG, C.; TONG, Q. Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 190, p. 96-106, 2017.

ZHOU, L.; WU, J.; ZHANG, J.; LENG, S.; LIU, M.; ZHAO, L.; ZHANG, F.; SHI, Y. The integrated surface drought index (ISDI) as an indicator for agricultural drought monitoring: theory, validation, and application in Mid-Eastern China. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**. v. 6, n. 3, p. 1254-1262, 2013.